

平成30年度原子力施設等防災対策等委託成果報告書

耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る
防潮堤水理試験（砂移動影響）

（平成30年度分）

京都大学

平成31年3月

本報告書は, 原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです.

本報告書に関する問い合わせは, 原子力規制庁までお願いします.

【水理試験編】

目次

第1章 業務概要	1
1-1 業務の目的.....	1
1-2 業務内容	1
第2章 予備実験	4
2-1 通過波の設定	4
第3章 固定床砂丘模型試験.....	11
3-1 通過波の津波変形（防潮堤なし）	11
3-2 防潮堤による津波変形・作用波圧	17
第4章 移動床砂丘模型試験.....	35
4-1 実験の概要.....	35
4-2 実験結果	38
第5章 結果のまとめ	67
参考資料.....	1

第 1 章 業務概要

1-1 業務の目的

平成 25 年 7 月，新規制基準や関連する審査ガイドが施行された。また，平成 25 年 11 月改正の核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律では，「発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価」を事業者に求め，「原子力規制委員会で定める時期ごとに，当該発電用原子炉施設の安全性について，自ら評価をしなければならない」としている。

さらに，平成 25 年 11 月策定の「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」（以下「運用ガイド」という。）では，新規制基準を適用したプラントの安全性向上を「外部事象に係る確率論的リスク評価（PRA）」（以下「リスク評価」という。）等を用いて評価することが求められており，リスク評価に資する施設・設備のフラジリティ評価手法の高度化が必要となっている。

本業務は，防潮堤に関する耐津波設計・フラジリティ評価手法の高度化を目的に，水理試験及びシミュレーション解析を実施し，防潮堤に作用する①砂丘の影響を考慮した波力，および②砂移動の影響を考慮した波力に関する試験データを取得する。これらの結果を整理・分析することで，防潮堤に対するこれらの因子の影響評価手法について検討することを目的とする。

1-2 業務内容

本業務では，防潮堤を対象とした砂丘地形および砂移動の影響に関する水理試験，シミュレーション解析を行う。

水理試験には，京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置されている津波再現水槽を用いる。またシミュレーション解析は京都大学防災研究所宇治地区研究所本館に設置されている計算機（Dell 社製 PowerEdge R930 4 台）を使用し，京都大学防災研究所で開発された完全 3 次元流体解析モデル（H-FRESH）を用いる。

(1) 水理試験

水理試験により防潮堤に作用する波力及び津波変形の状況を，砂丘の影響を考慮して計測する。試験模型のイメージを図 1-1 に示す。

本試験に先立って予備実験を行い，実験で用いる入力津波波形を，関係者間で協議の上で 3 種類選定する。この予備実験において，詳細な測定は行わない。

【固定床試験】

本試験の固定床試験ケースは，防潮堤なしの実験を 6 ケース（入力津波波形 3 種類×繰り返し回数 2），防潮堤を設置した実験を 6 ケース（入力津波波形 3 種類×防潮堤位置 2 箇所×繰り返し回数 1）の計 12 ケースとする。測定項目は

水位，流速の測定および水面形の動画撮影とする．詳細な測定位置等は，関係者間で協議の上決定する．

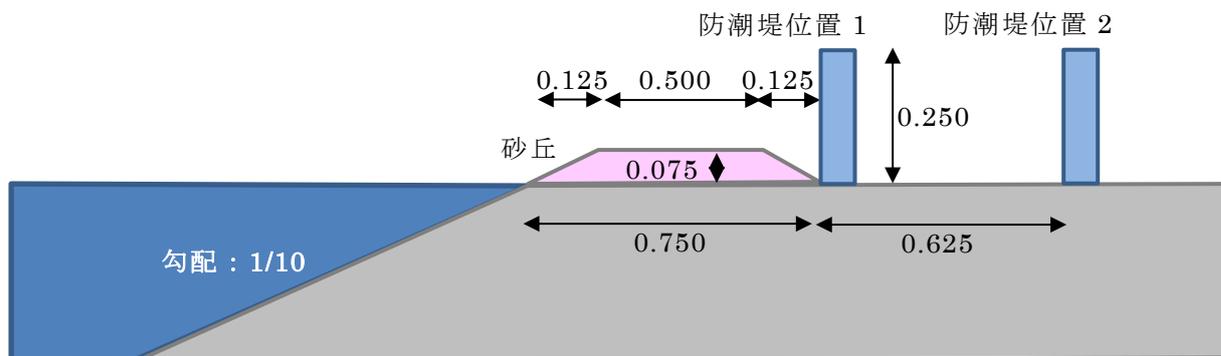


図 1-1 実験模型のイメージ（断面図，単位：m）

【移動床試験】

防潮堤よりも海側に段丘が存在する場合を想定し，防潮堤に作用する砂移動の影響を考慮した波力に関する試験データを取得する．水理試験では防潮堤に作用する波力，土圧及び砂移動の状況について整理し，砂移動が防潮堤に与える影響を評価・検討する．試験の断面イメージは図 1-1 と同様であり，平面イメージを図 1-2 に示す．

水理試験は 6 ケース（入力津波波形 3 種類，防潮堤位置 2 箇所）とし，各ケースあたり 4 回の試行を行う．入力津波波形は，固定床試験の結果を踏まえて 3 種類設定する．測定項目は水位，流速，津波作用後の砂丘形状の測定および水面形状の動画撮影とする．詳細な測定位置等は，関係者間で協議の上決定する．

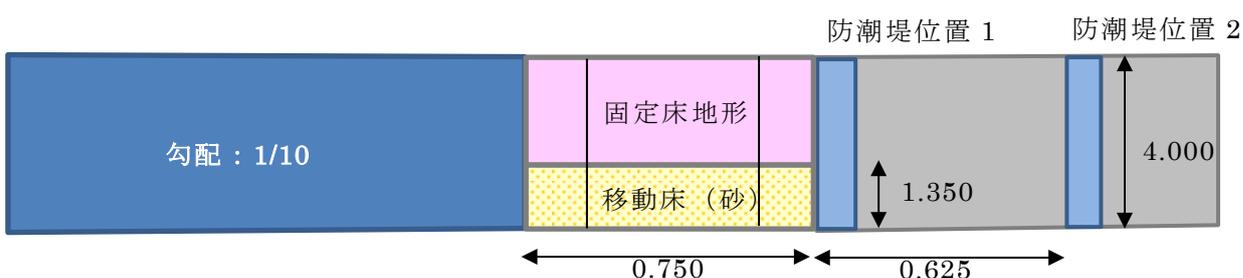


図 1-2 実験模型のイメージ（平面図，単位：m）

(2)シミュレーション解析

【固定床試験】

固定床試験を対象としたシミュレーション解析を実施する。解析ケースは、防潮堤なしの実験を対象とした3ケース（入力津波波形3種類）、防潮堤を設置した実験を対象とした6ケース（入力津波波形3種類×防潮堤位置2箇所）の計9ケースとする。

【移動床試験】

移動床試験を対象としたシミュレーション解析を実施する。また試験では実施しない海底勾配1/40のケース、砂粒径を変化させたケース、砂層を考慮したケースも併せて解析する。解析ケースは、以下に示す計27ケースとする。

1)実験比較ケース：6ケース

海底勾配1（1/10）×入力津波波形3×防潮堤位置2×砂粒径1

2)砂粒径変化ケース：18ケース

海底勾配1（1/40）×入力津波波形3×防潮堤位置2×砂粒径3

3)砂層考慮ケース：3ケース

海底勾配1（1/40）×入力津波波形3×防潮堤位置1×砂粒径1

なお本編は、上記業務内容のうち水理試験の結果について取りまとめたものである。

第 2 章 予備実験

2-1 通過波の設定

2-1-1 実験の概要

津波波力特性の把握を目的に水理試験を行うのに先立ち，以下の 4 種類の津波を試験水槽内で再現し，波高の設定を行った．

孤立波 波高 7.5cm 【沖波】

10.0cm ”

12.5cm ”

15.0cm ”

なお，実験は京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー内に設置されている津波再現水槽で行い，海底地形勾配は 1/10（単純勾配）で行う．

2-1-2 実験条件

(1) 実験水槽（津波再現水槽）

実験に用いた水槽は，長さ 45m，幅 4.0m，水深 0.8m の津波再現水槽である．図 2-1-1 に実験水槽の概要を示す．

※汀線に砂丘模型を設置した条件で実施した．

(2) 計測機器設置位置

図 2-1-2 に実験に用いた計測機器及びその設置位置を示す．

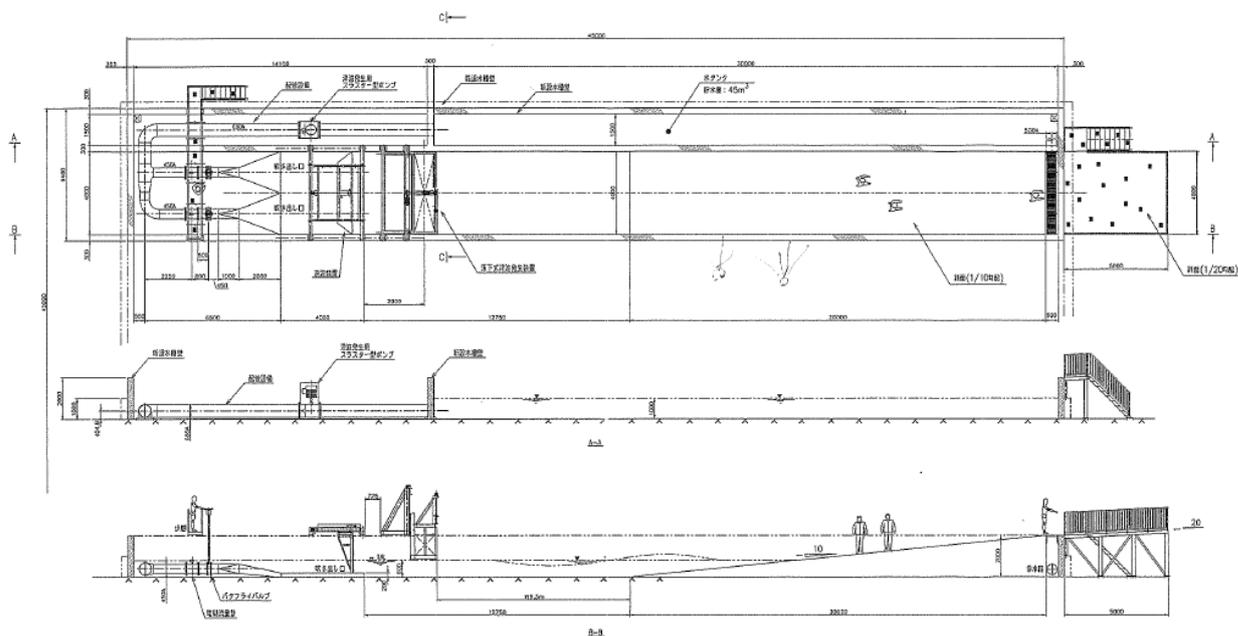
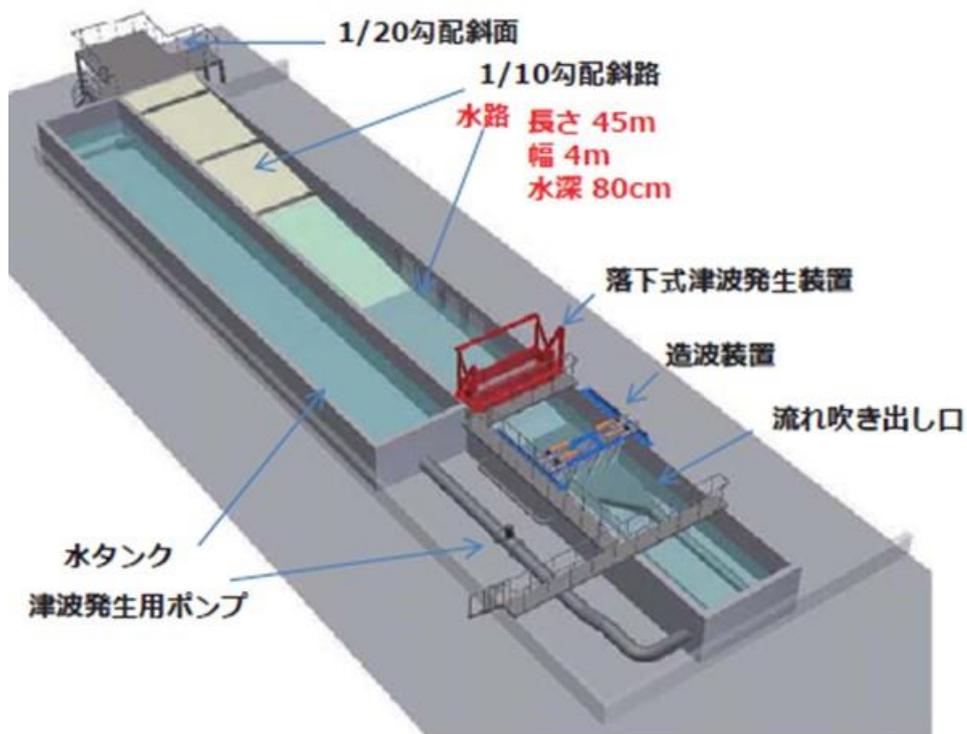


図 2-1-1 実験水槽（津波再現水槽）

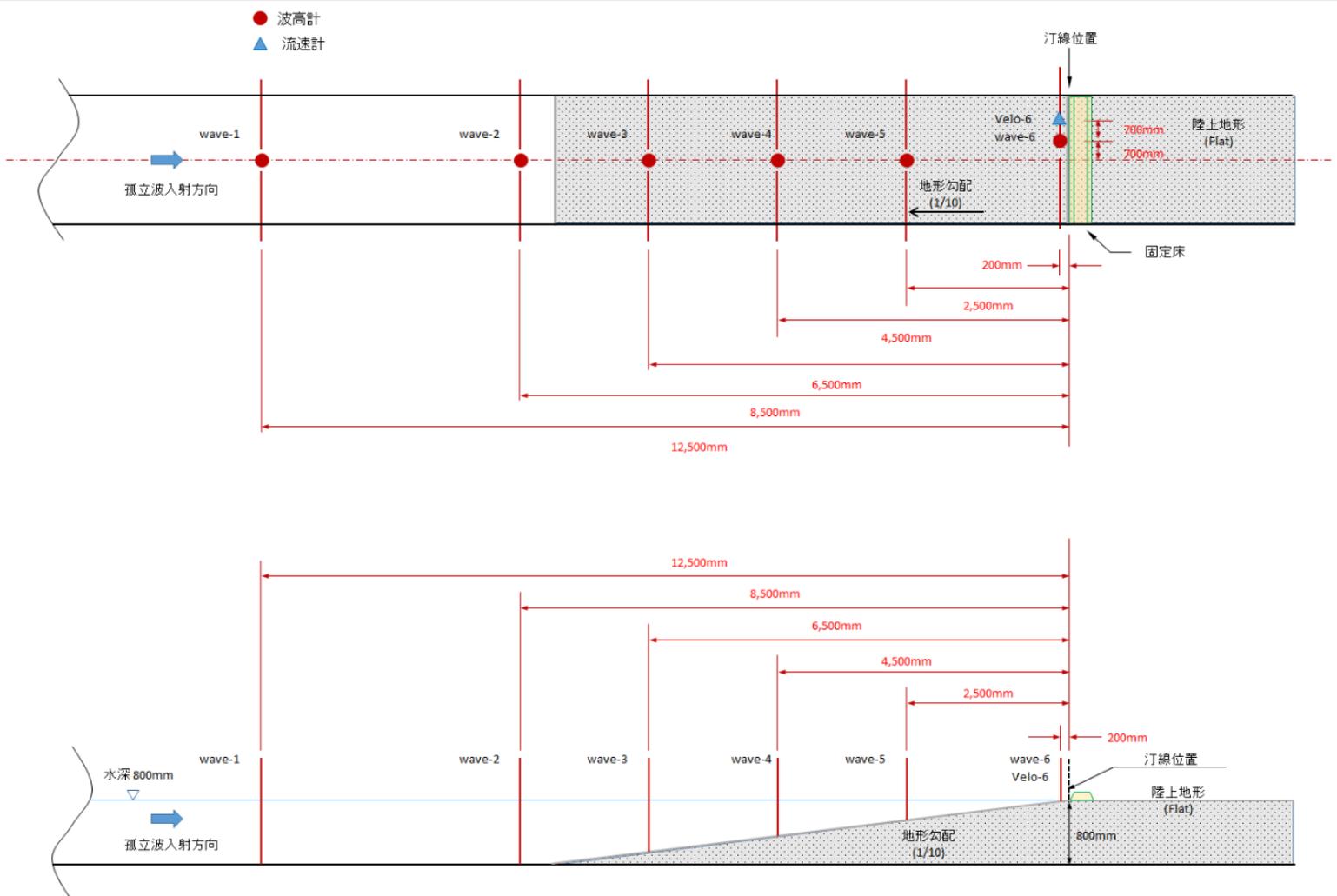


図 2-1-2 計測機器・設置状況

2-1-3 実験結果

入力津波波形（孤立波）に関する設定予備実験の結果を以下に示す。

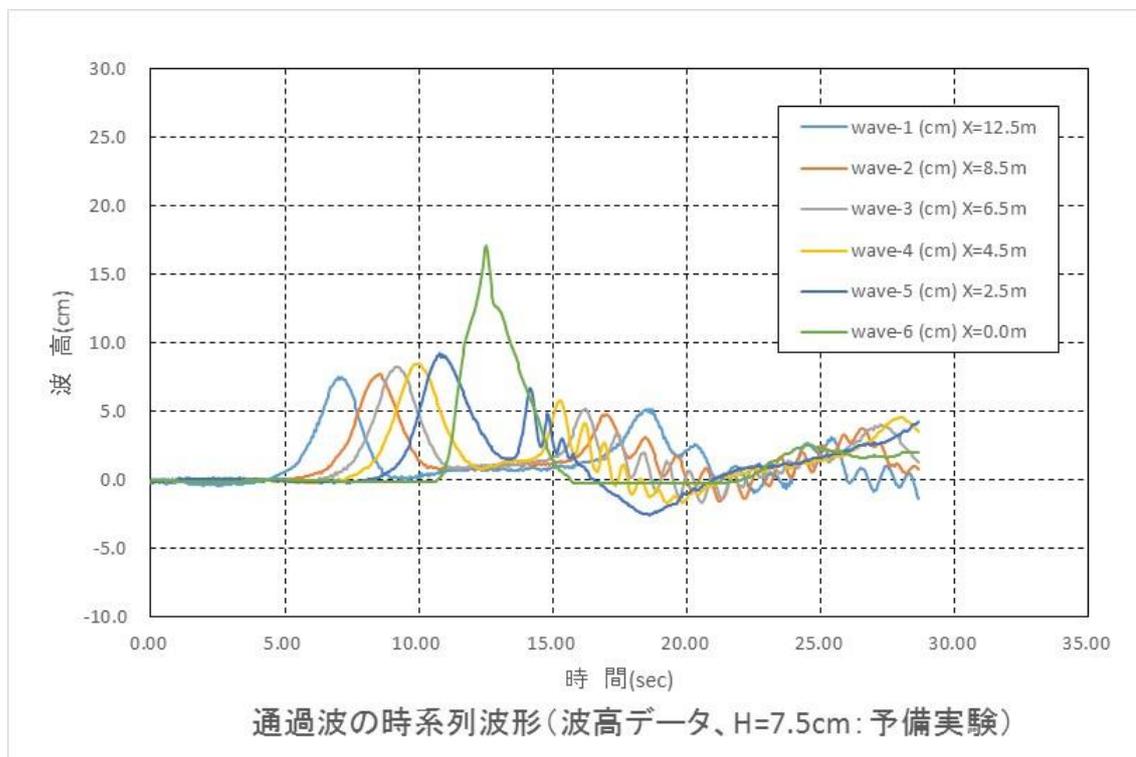


図 2-1-3(1) 波高設定予備実験結果 (H=7.5cm)

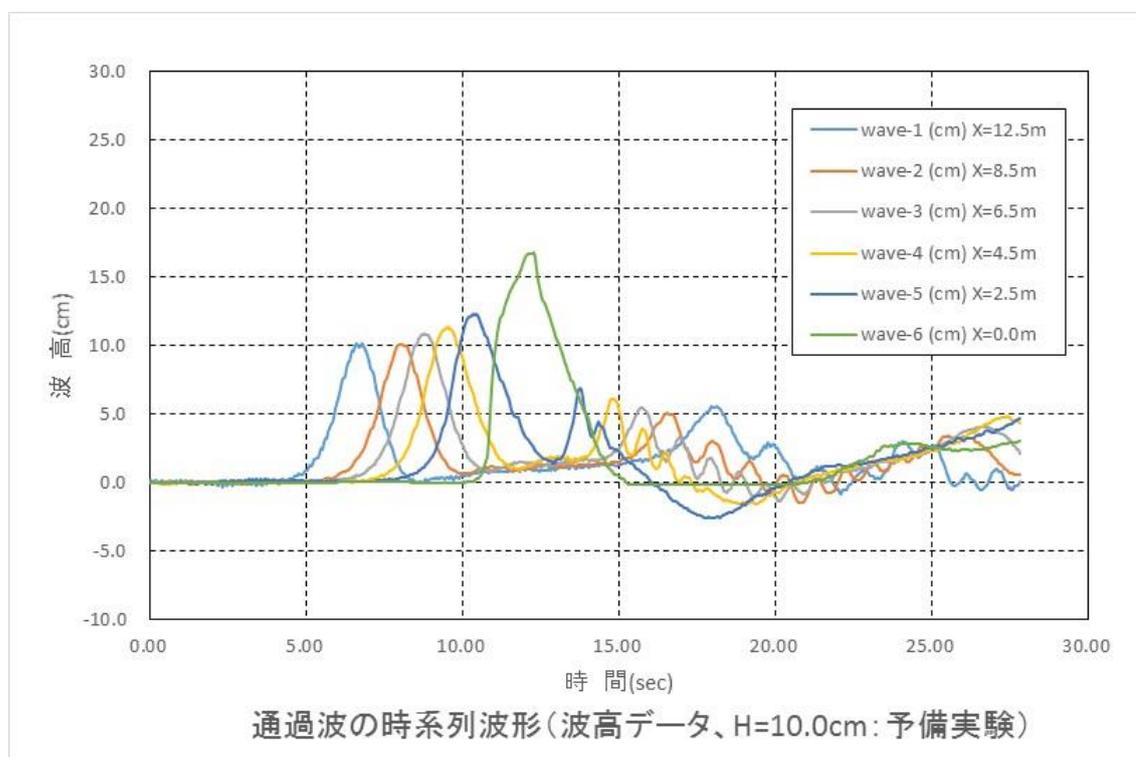


図 2-1-3(2) 波高設定予備実験結果 (H=10.0cm)

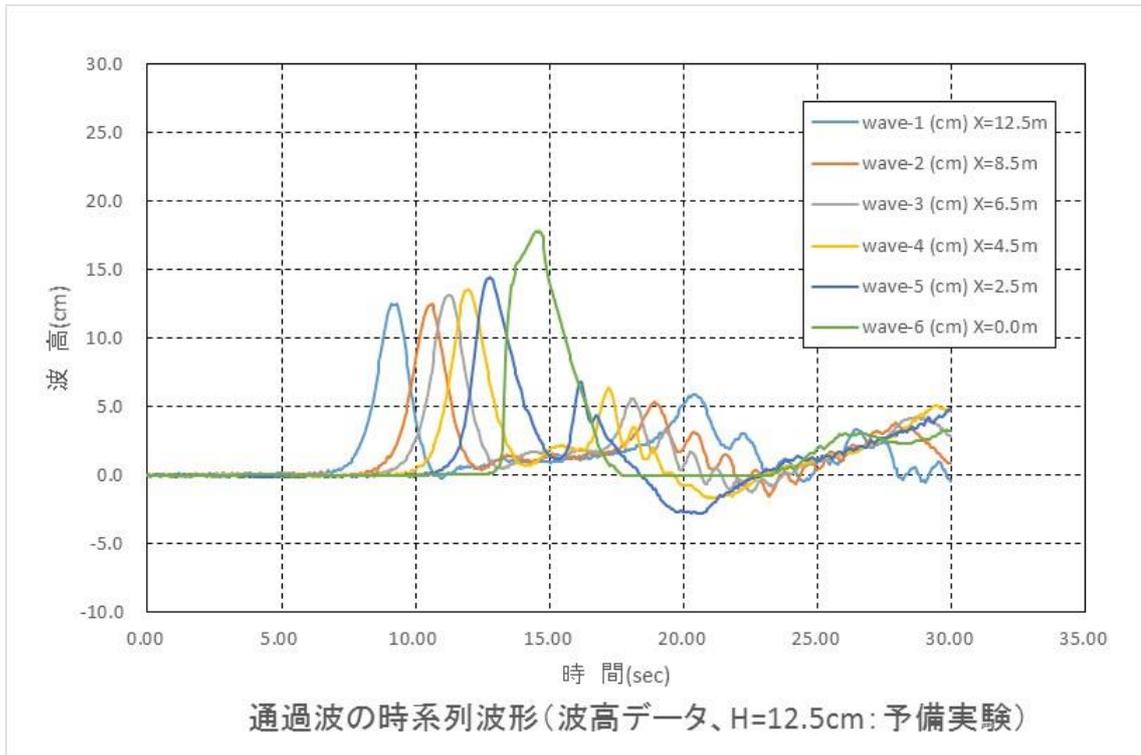


図 2-1-3(3) 波高設定予備実験結果 (H=12.5cm)

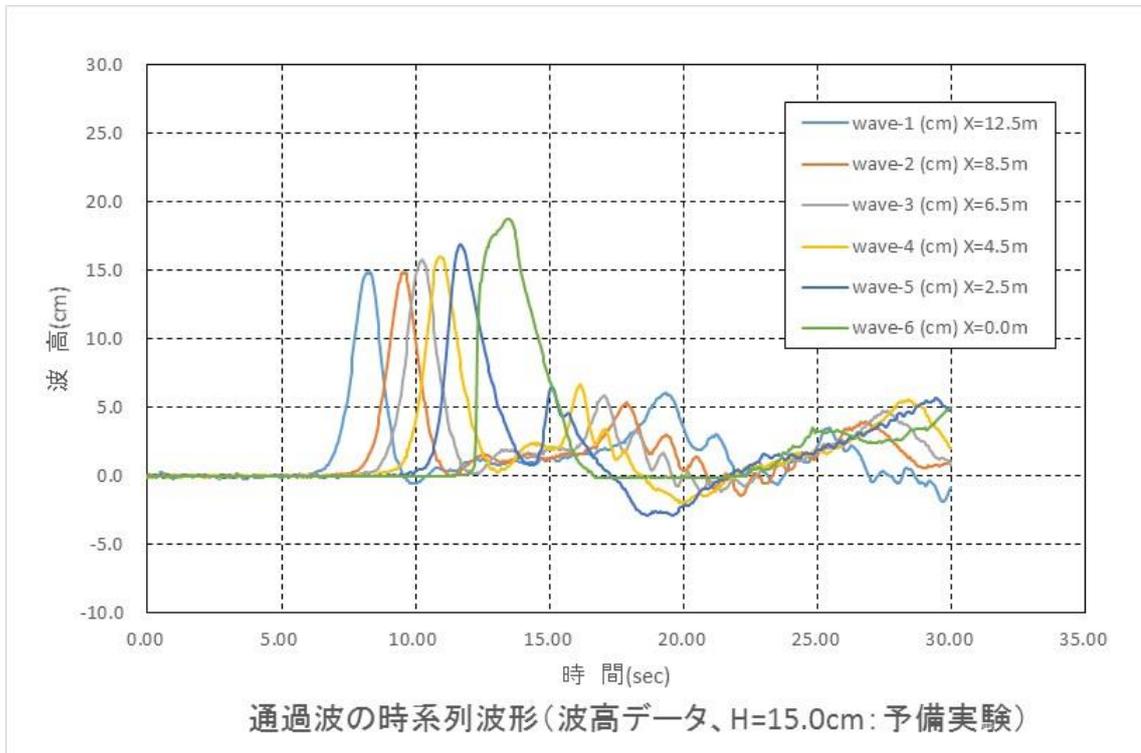


図 2-1-3(4) 波高設定予備実験結果 (H=15.0cm)

図 2-1-4 に汀線上の流速の時間波形を示す．波高が大きい条件ほど波の到達時間が早くなり，流速の最大値も大きくなる状況が確認できる．

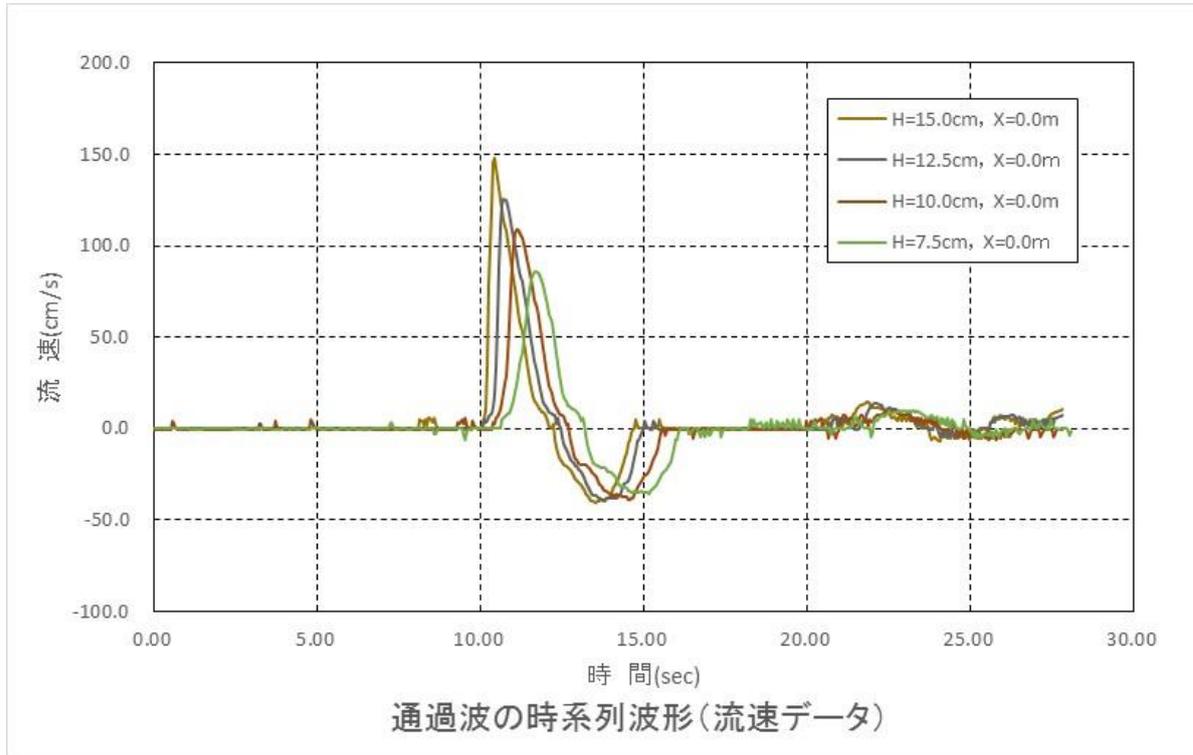


図 2-1-4 波高設定予備実験結果（汀線上の流速）

設定した孤立波沖波波高と汀線上の波高, 流速, フルード数 (何れも最大値) の関係を図 2-1-5 に示す. 沖波波高 12.5cm→15.0cm でフルード数^{*}が 1 を超え, 砕波条件となる様子が伺える.

※ フルード数 $Fr = v / \sqrt{gH}$, v ; 流速, H ; 波高, \sqrt{gH} ; 波速

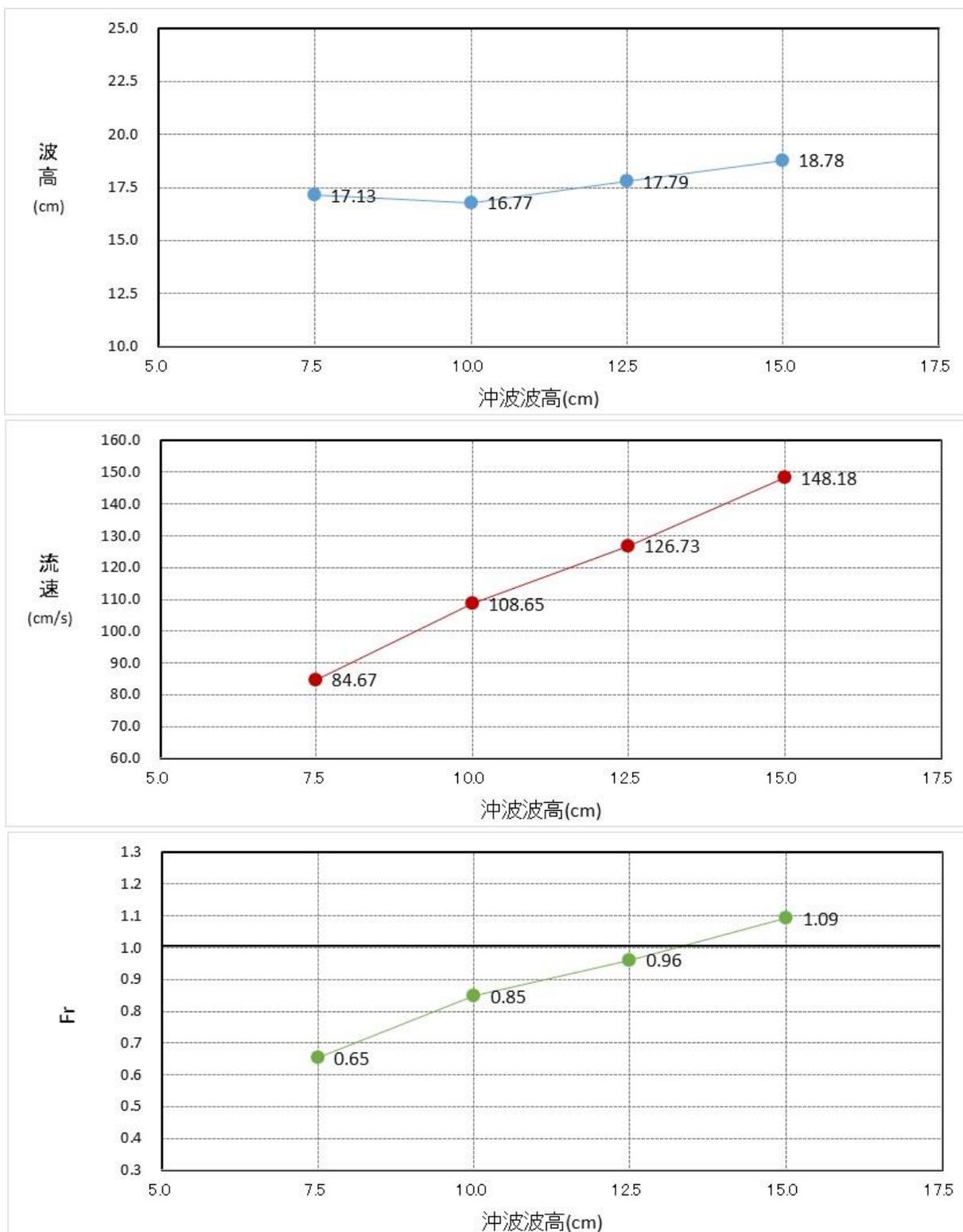


図 2-1-5 沖波波高と汀線上の波高, 流速, フルード数の関係

第 3 章 固定床砂丘模型試験

3-1 通過波の津波変形（防潮堤なし）

3-1-1 実験の概要

予備実験で設定した下記の津波条件について，それぞれ 2 回試行し，津波変形の計測を行った．なお実験結果のデータのまとめは，予備実験の 1 回の試行も加え，合計 3 回のデータ分としている．なお何れのケースも砂丘ありの条件で行っている．

孤立波	波高	7.5cm 【沖波】	(試行：2 回)
		10.0cm	〃
		12.5cm	〃
		15.0cm	〃

3-1-2 実験結果

図 3-1-1～3-1-4 に各波高条件における波高分布を，図 3-1-5 に波高分布（平均値）の比較図を，図 3-1-6 に各波高と汀線上の流速の関係を示す．また，写真 3-1-1～3-1-2 に各波高条件における通過波の状況を示す．

機器名 Unit	wave-1 (cm)	wave-2 (cm)	wave-3 (cm)	wave-4 (cm)	wave-5 (cm)	wave-6 (cm)	velo-6 (cm/s)	備考
汀線からの距離(mm)	12500	8500	6500	4500	2500	200	200	
1回目(W2018112808)	7.50	7.73	8.21	8.45	9.20	17.13	84.67	入射波形検定試験 高速ビデオ撮影時
2回目(W2018112816)	7.63	7.74	8.42	8.85	9.73	17.33	85.93	
3回目(W2018112817)	7.42	7.57	8.13	8.39	9.46	17.41	82.63	
平均値	7.51	7.68	8.25	8.56	9.46	17.29	84.41	

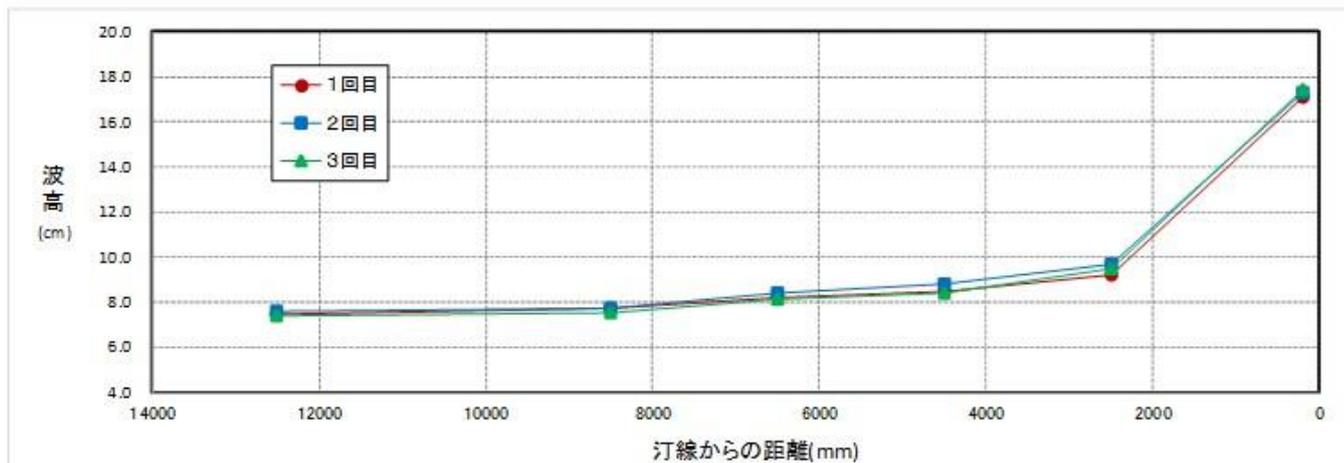


図 3-1-1 沖波波高 H=7.5cmにおける波高分布

機器名 Unit	wave-1 (cm)	wave-2 (cm)	wave-3 (cm)	wave-4 (cm)	wave-5 (cm)	wave-6 (cm)	velo-6 (cm/s)	備考
汀線からの距離(mm)	12500	8500	6500	4500	2500	200	200	
1回目(W2018112806)	10.21	10.04	10.84	11.35	12.32	16.77	108.65	入射波形検定試験 高速ビデオ撮影時
2回目(W2018112814)	10.06	10.07	10.80	11.15	12.07	16.77	103.65	
3回目(W2018112815)	10.20	10.10	10.88	11.28	12.13	16.65	108.99	
平均値	10.16	10.07	10.84	11.26	12.18	16.73	107.10	

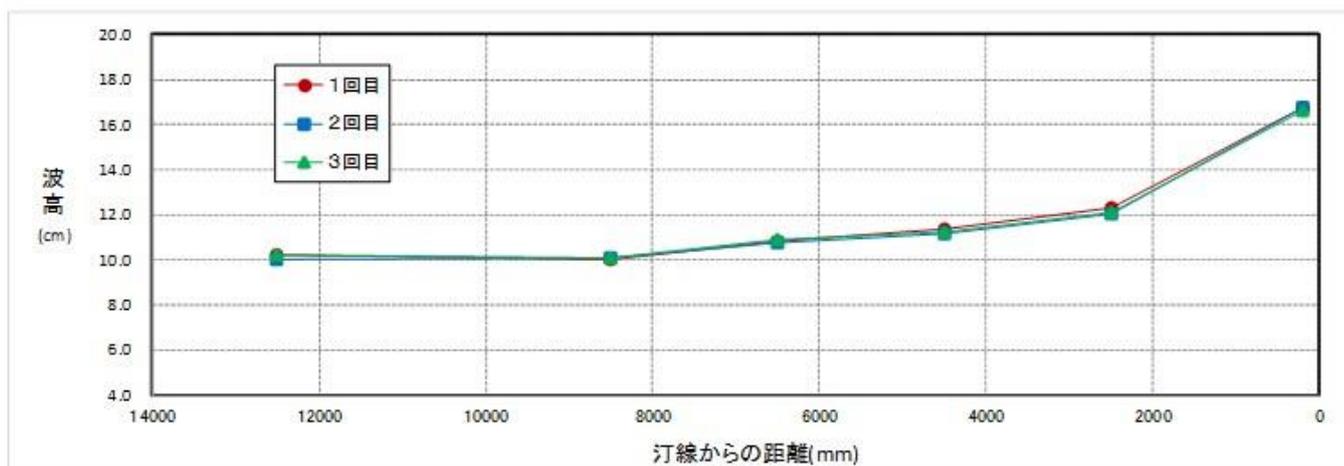


図 3-1-2 沖波波高 H=10.0cmにおける波高分布

機器名 Unit	wave-1 (cm)	wave-2 (cm)	wave-3 (cm)	wave-4 (cm)	wave-5 (cm)	wave-6 (cm)	velo-6 (cm/s)	備考
汀線からの距離(mm)	12500	8500	6500	4500	2500	200	200	
1回目(W2018112805)	12.49	12.49	13.11	13.52	14.41	17.79	126.73	入射波形検定試験 高速ビデオ撮影時
2回目(W2018112811)	12.61	12.54	13.31	13.69	14.52	18.03	125.40	
3回目(W2018112813)	12.55	12.42	13.22	13.53	14.32	17.97	125.80	
平均値	12.55	12.48	13.21	13.58	14.41	17.93	125.98	

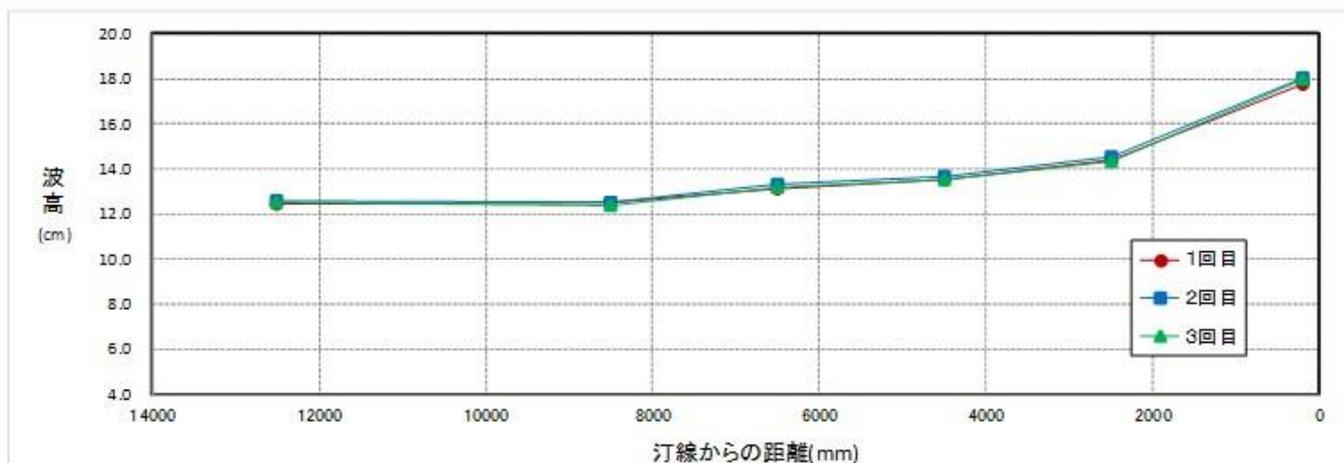


図 3-1-3 沖波波高 H=12.5cmにおける波高分布

機器名 Unit	wave-1 (cm)	wave-2 (cm)	wave-3 (cm)	wave-4 (cm)	wave-5 (cm)	wave-6 (cm)	velo-6 (cm/s)	備考
汀線からの距離(mm)	12500	8500	6500	4500	2500	200	200	
1回目(W2018112803)	14.90	14.89	15.75	16.02	16.87	18.78	148.18	入射波形検定試験 高速ビデオ撮影時
2回目(W2018112809)	14.96	14.83	15.62	16.01	16.81	18.83	145.76	
3回目(W2018112810)	15.07	14.94	15.69	16.02	16.75	18.61	148.07	
平均値	14.98	14.89	15.69	16.02	16.81	18.74	147.34	

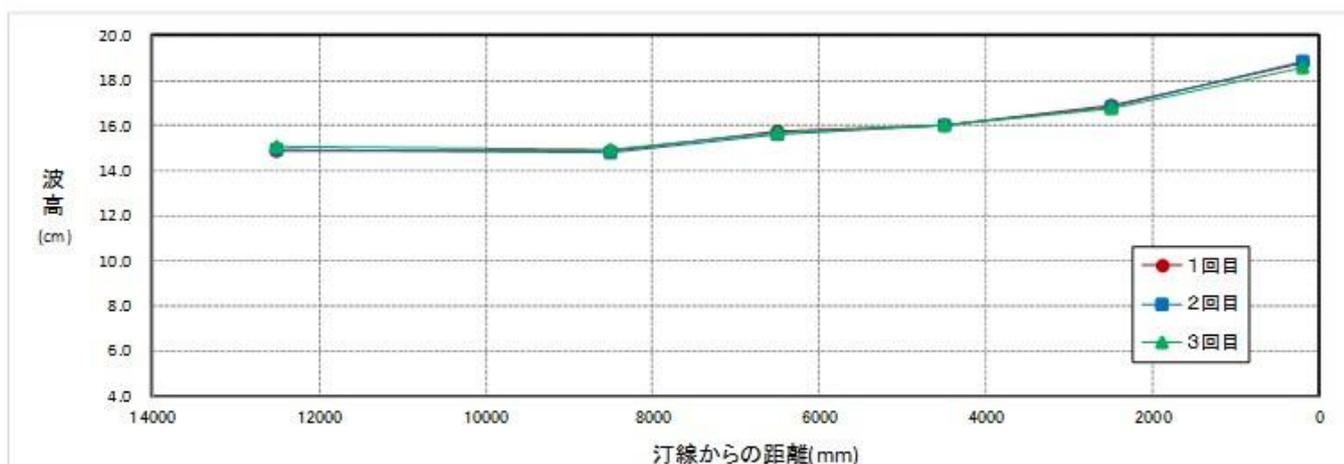


図 3-1-4 沖波波高 H=15.0cmにおける波高分布

機器名	wave-1	wave-2	wave-3	wave-4	wave-5	wave-6
Unit	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
汀線からの距離(mm)	12500	8500	6500	4500	2500	200
H=7.5cm	7.51	7.68	8.25	8.56	9.46	17.29
H=10.0cm	10.16	10.07	10.84	11.26	12.18	16.73
H=12.5cm	12.55	12.48	13.21	13.58	14.41	17.93
H=15.0cm	14.98	14.89	15.69	16.02	16.81	18.74

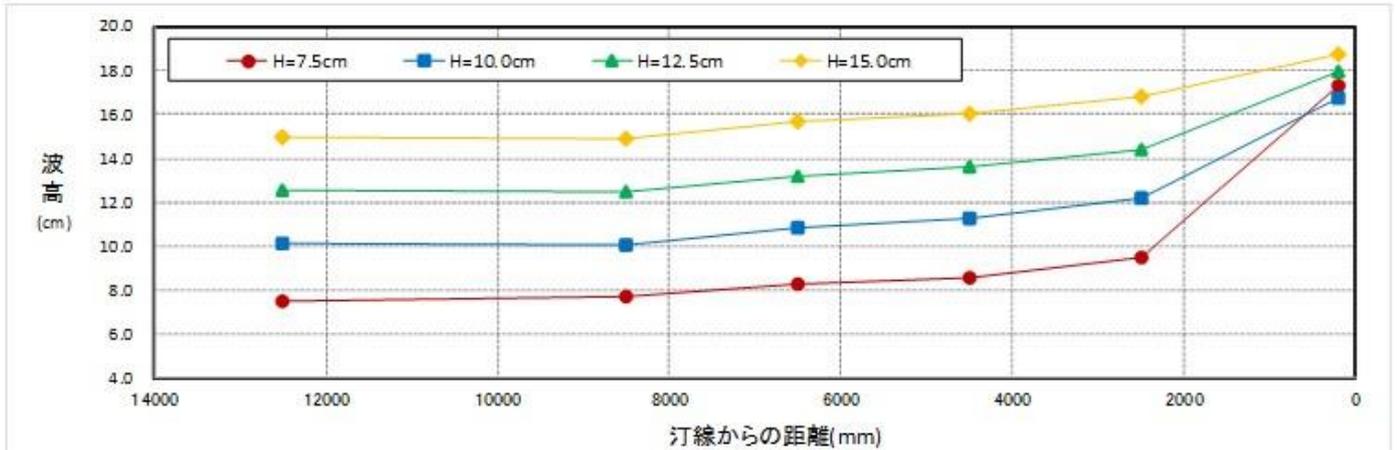


図 3-1-5 波高(平均値)分布・比較図

入射波高	7.5cm	10.0cm	12.5cm	15.0cm	備考
機器名	velo-6				
Unit	(cm/s)				
汀線からの距離(mm)	200				
1回目	84.67	108.65	126.73	148.18	入射波形検定試験
2回目	85.93	103.65	125.40	145.76	高速ビデオ撮影時
3回目	82.63	108.99	125.80	148.07	

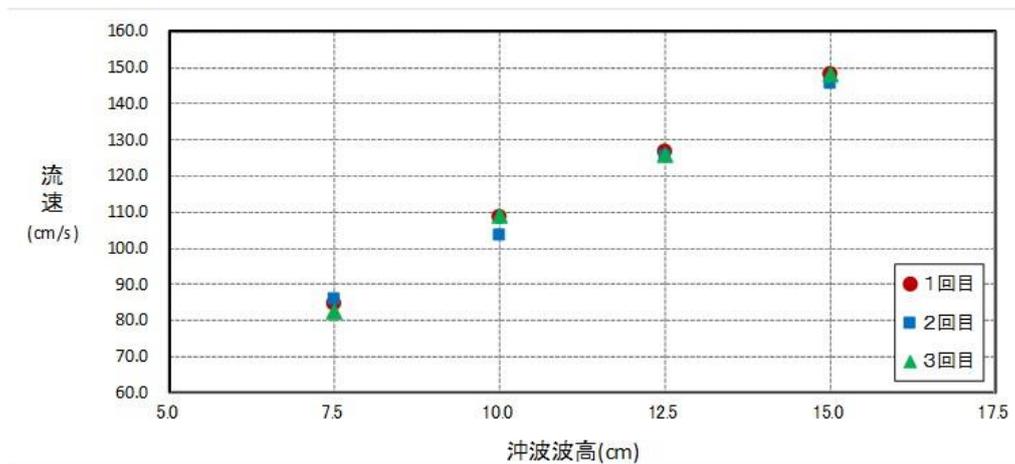


図 3-1-6 流速測定結果の比較図

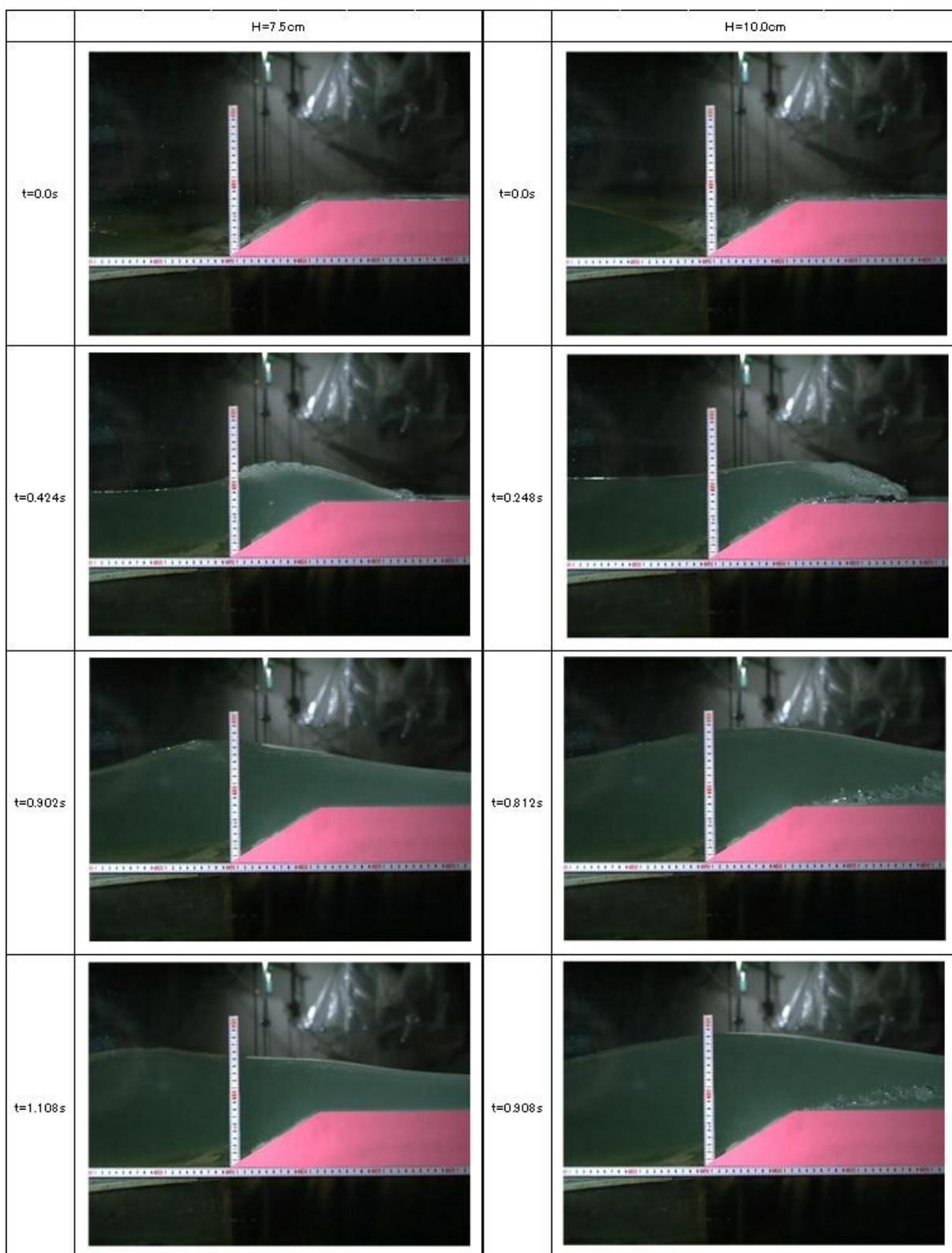


写真 3-1-1 津波変形状況（時系列写真）【H=7.5cm, 10.0cm】

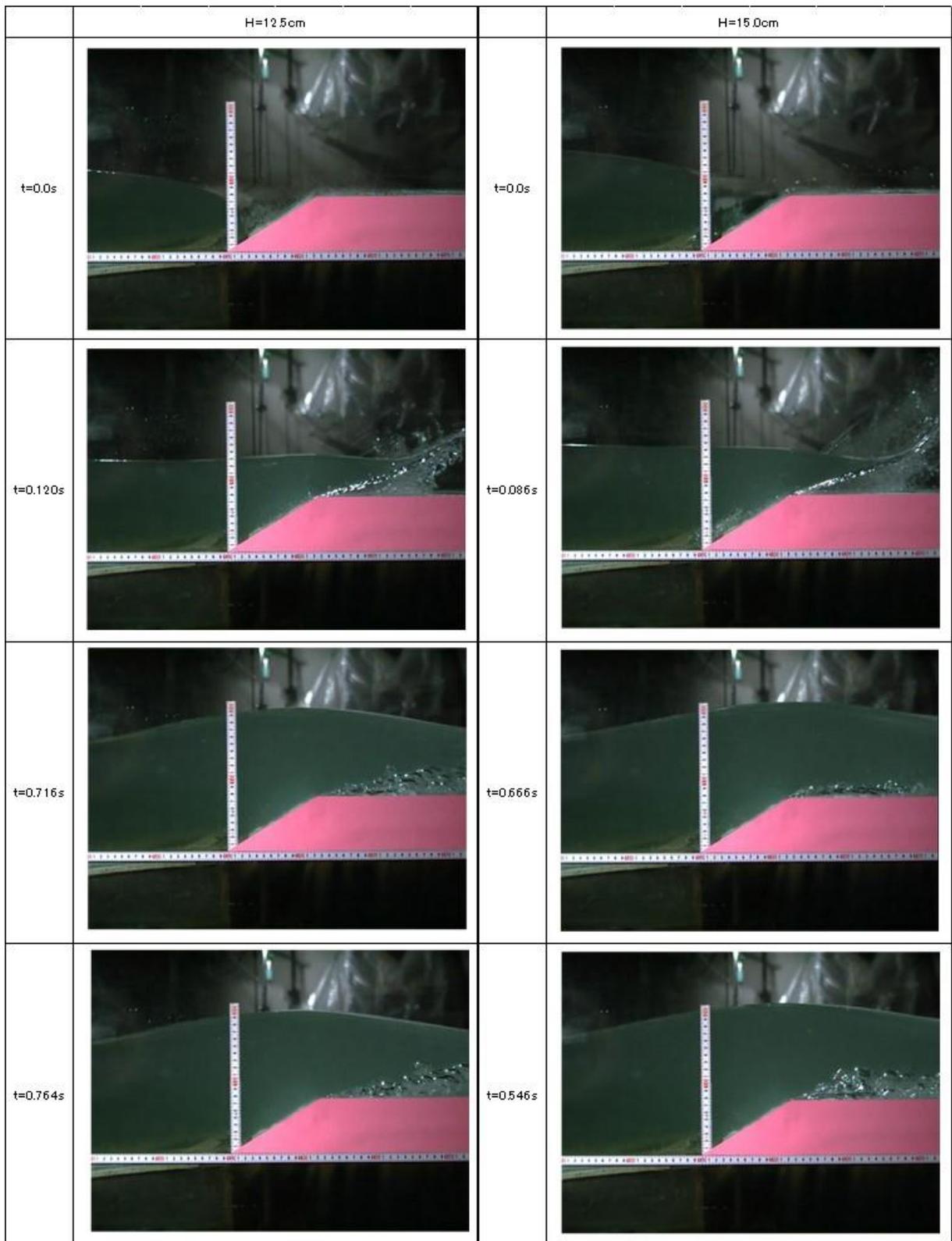


写真 3-1-2 津波変形状況（時系列写真）【H=12.5cm, 15.0cm】

3-2 防潮堤による津波変形・作用波圧

3-2-1 実験の概要

(1) 実験条件・実験ケース

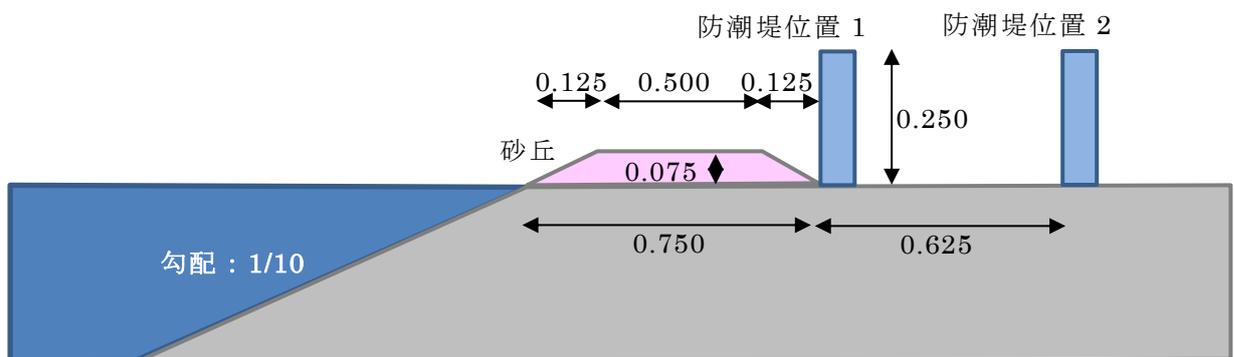
下記に示した津波条件について、それぞれ1回試行し、津波変形および防潮堤に作用する波圧の計測を行った。なお何れのケースも砂丘ありの条件で行っている。

・津波条件

孤立波	波高	7.5cm【沖波】	(試行：1回)
		10.0cm	〃
		12.5cm	〃
		15.0cm	〃

・防潮堤位置

- 1：汀線 - 75.0cm (砂丘地形直下流)
 - 2：汀線 - 137.5cm (砂丘地形-62.5cm)
- ※防潮堤高さは 25cm



実験模型のイメージ (断面図, 単位: m)

(2) 測定機器

波圧測定を行った機器の仕様，およびその配置を以下に示す．

☆圧力計の仕様

- ・株式会社 KYOWA製
- ・型式：PS-05KC
- ・容量：50KPa

※図中の単位は mm

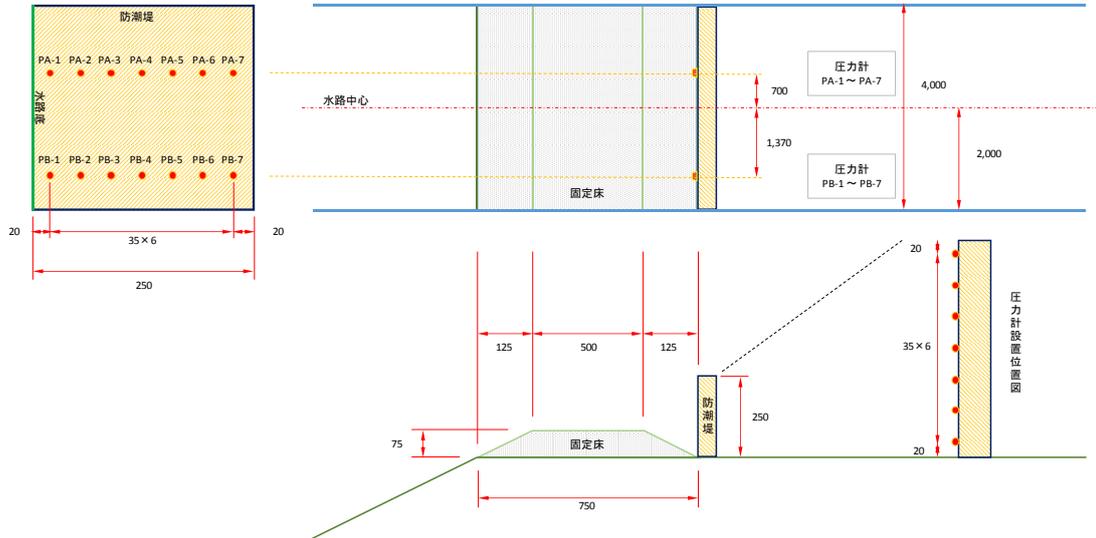


図3-2-1 汀線部付近の地盤・防潮堤の設置状況図

● : 圧力計
※図中の単位は mm

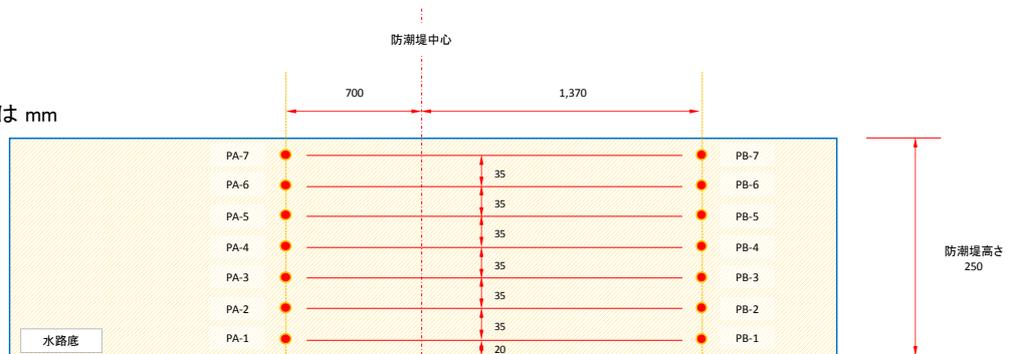


図3-2-2 造波板から見た防潮堤の圧力計取付位置

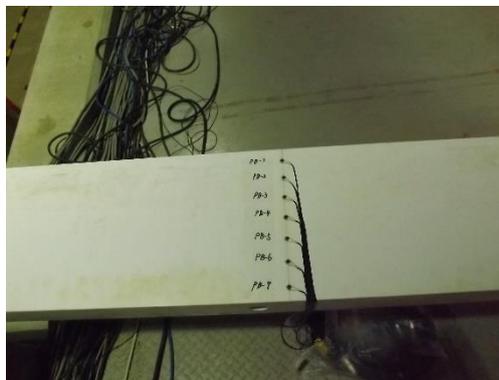


写真 3-2-1 防潮堤圧力計取り付け状況

3-2-2 実験結果

写真 3-2-1～3-2-4 に各ケースにおける防潮堤付近の津波変形状況を示す。また図 3-2-3～3-2-4 に防潮堤に作用する波圧分布を、図 3-2-5～3-2-12 に各測点の作用波圧の時系列データを示す。また、各ケースの 2 測線の平均値の比較を図 3-2-13 に示す。

なお波圧データは昨年度同様に圧力計のドリフト分による補正、移動平均処理を行った値で評価を行っている。また、波圧の時系列データで見られた、明らかにノイズ成分（実際の波圧成分ではない）と判断される値は除いて、最大値を評価している。

防潮堤に作用する波圧分布の傾向としては、砂丘からの距離がある防潮堤位置 2（汀線-137.5cm）の方が防潮堤位置 1（汀線-75cm）よりも総じて小さくなり、砂丘～防潮堤の水平区間で流下に伴う損失が生じている状況が伺える。

また、防潮堤位置 1（汀線-75cm）では砂丘上の砕波状態によって最大波圧位置が変化するが、防潮堤位置 2（汀線-137.5cm）では砕波の如何に関わらず、防潮堤の堤脚部が最大波圧位置となる。

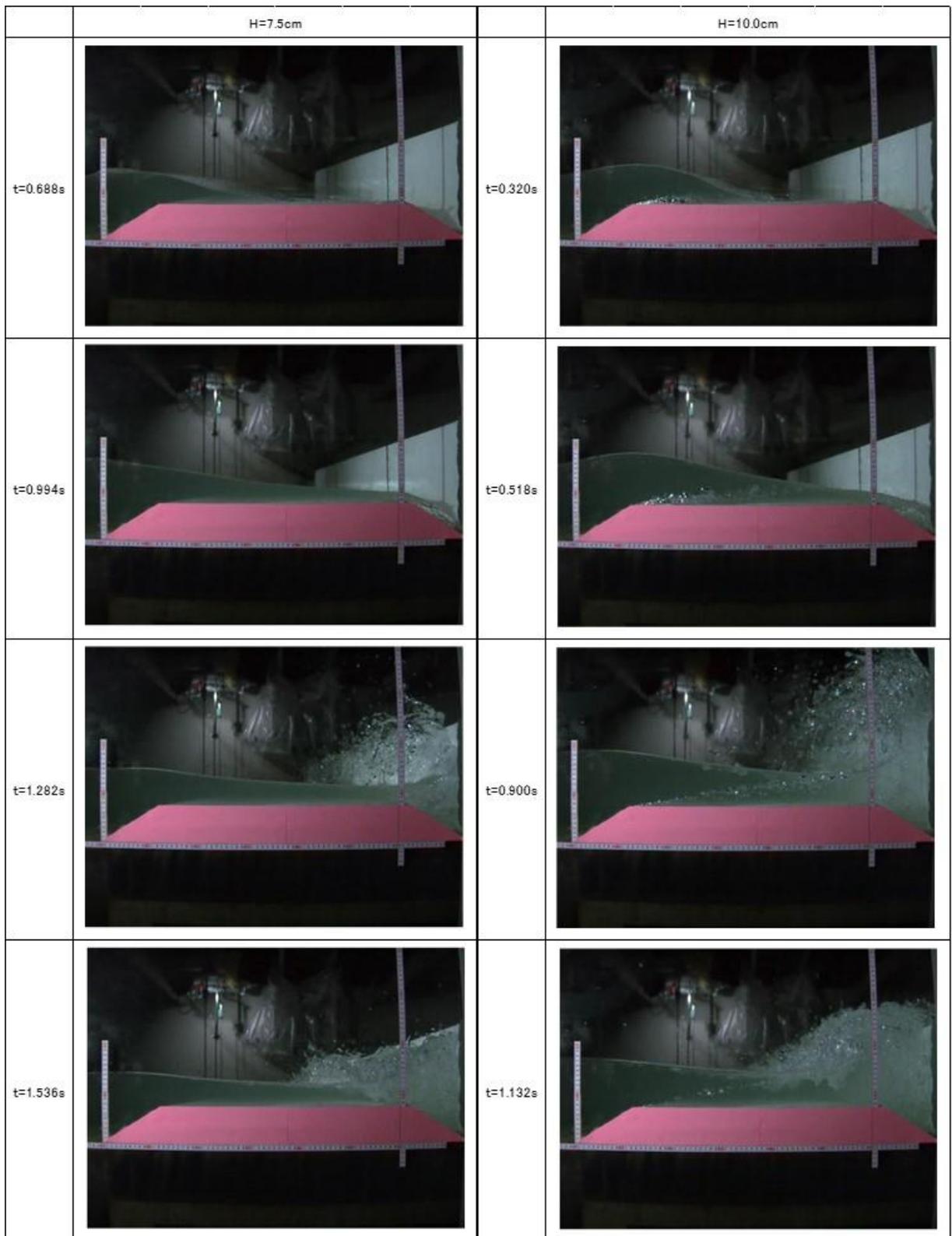


写真 3-2-1 津波変形状況（防潮堤位置 1；汀線-75cm）
【H=7.5cm, 10.0cm】

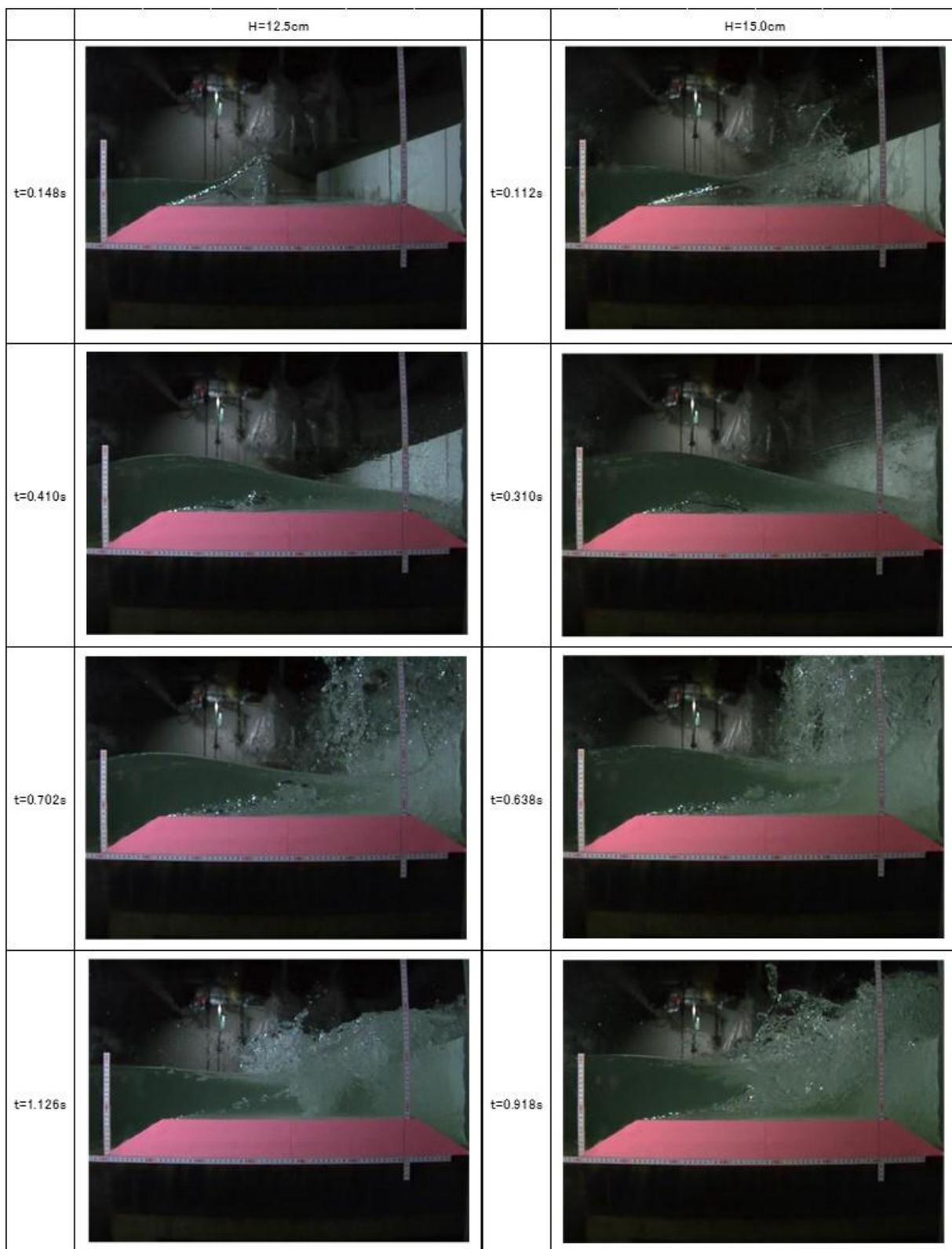


写真 3-2-2 津波変形状況（防潮堤位置 1；汀線-75cm）
【H=12.5cm, 15.0cm】

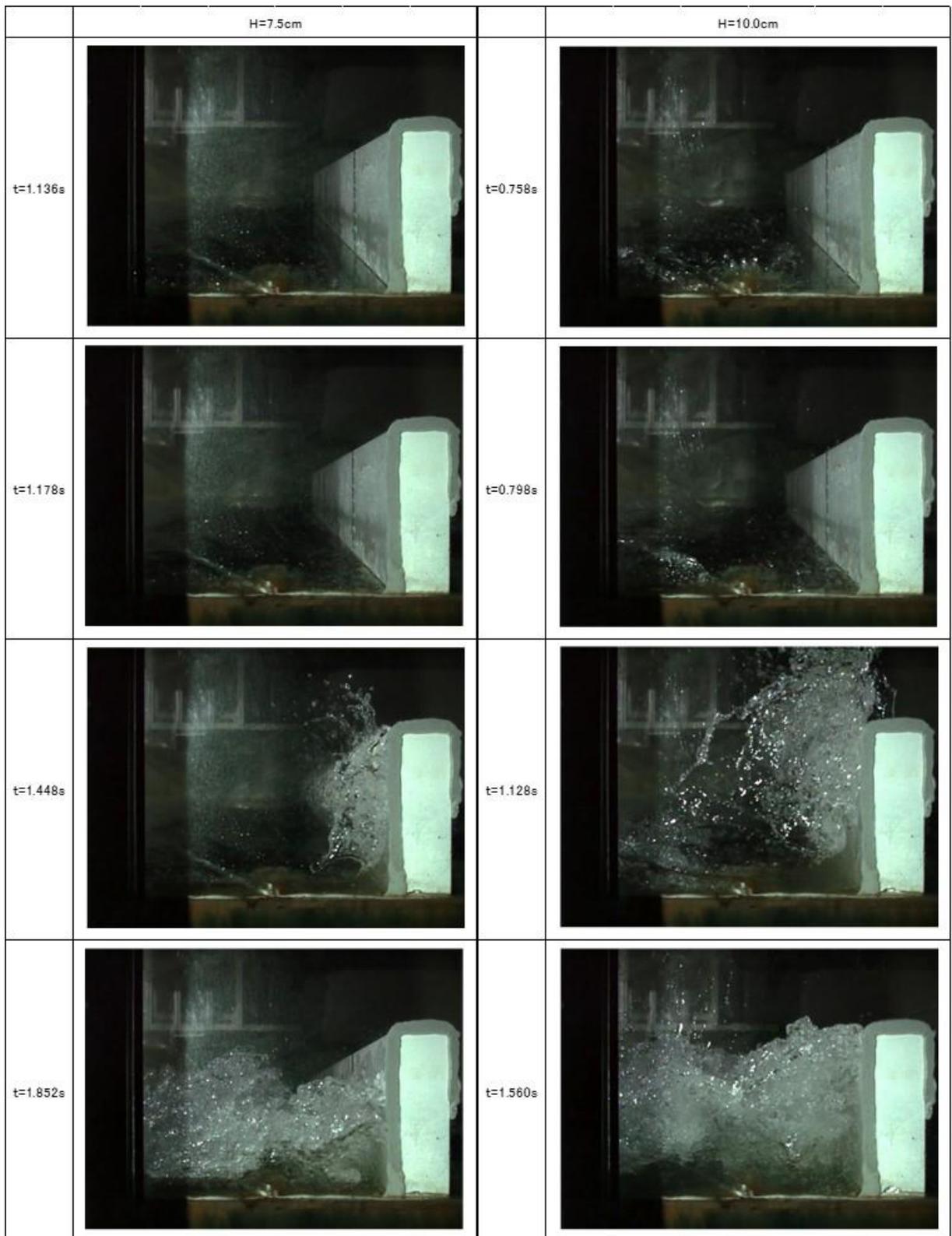


写真 3-2-3 津波変形状況（防潮堤位置 2；汀線-137.5cm）
【H=7.5cm, 10.0cm】

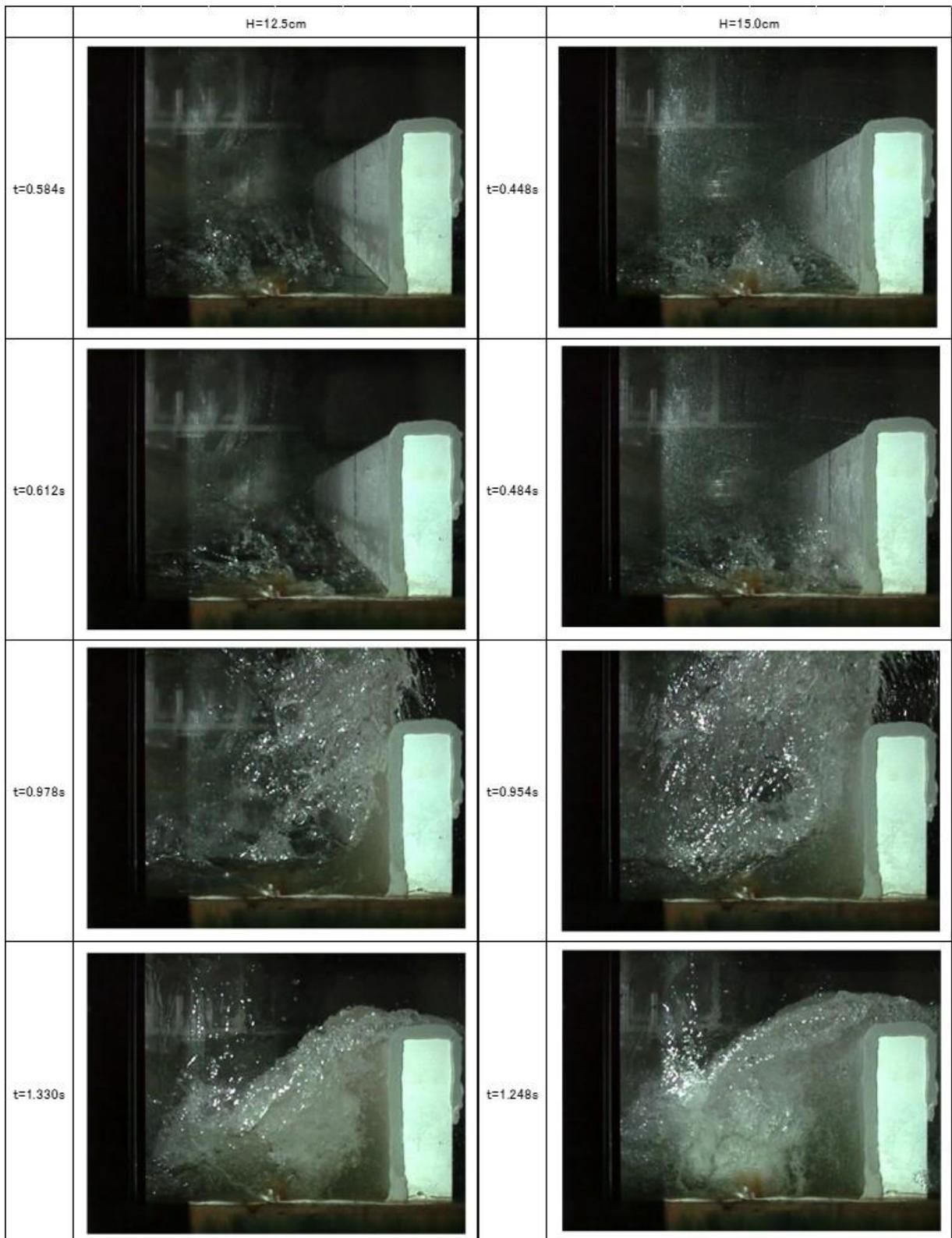
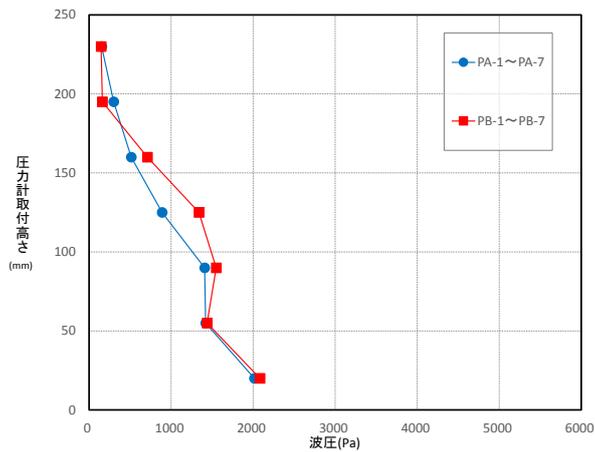
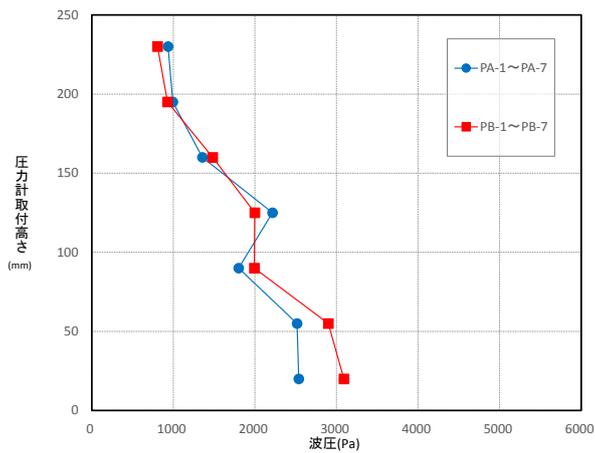


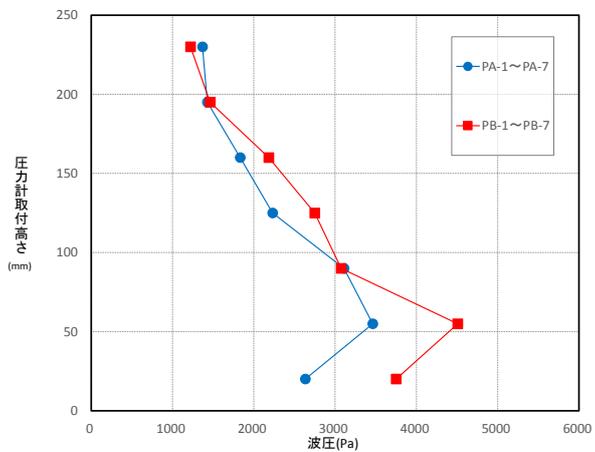
写真 3-2-4 津波変形状況（防潮堤位置 2；汀線-137.5cm）
【H=12.5cm, 15.0cm】



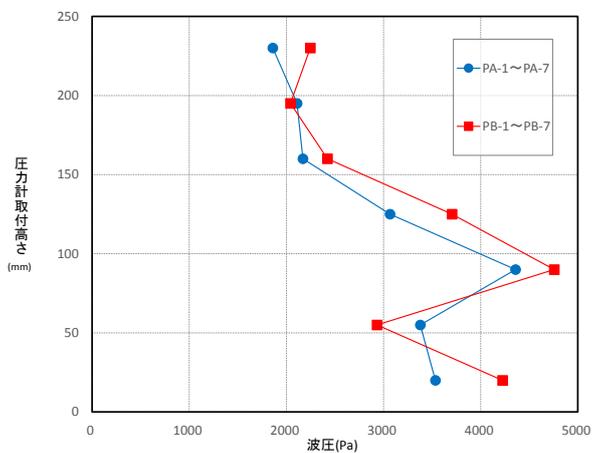
H=7.0cm



H=10.0cm

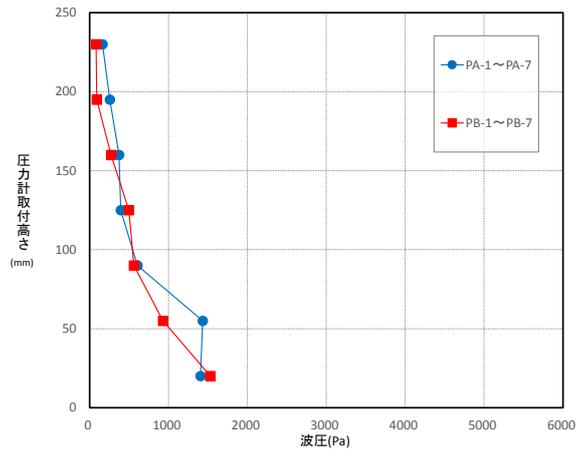


H=12.5cm

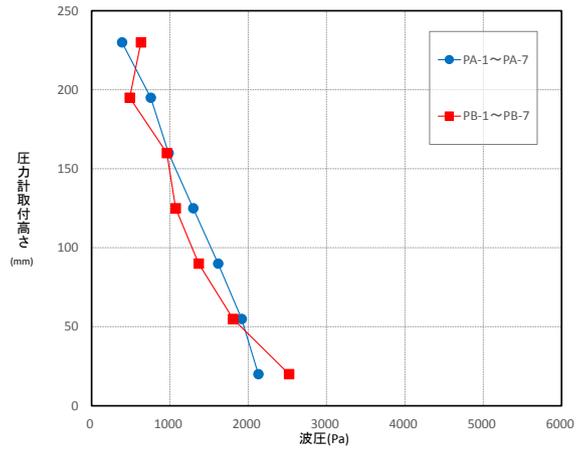


H=15.0cm

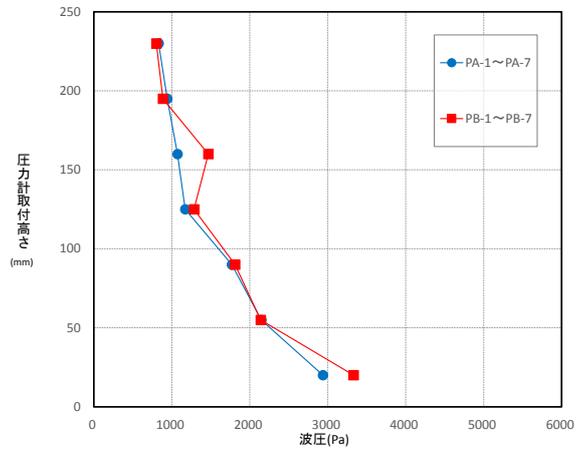
図 3-2-3 防潮堤に作用する波圧測定結果 (防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)



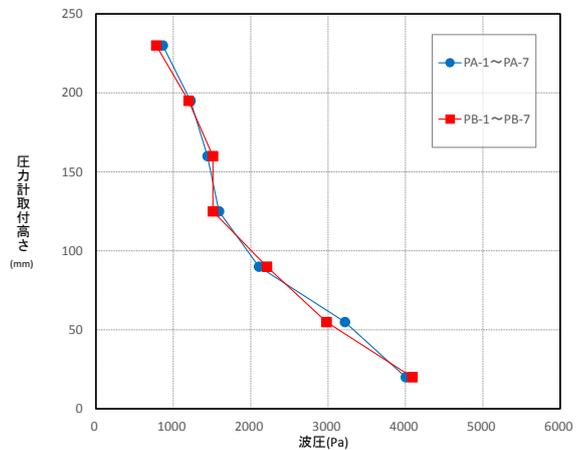
H=7.0cm



H=10.0cm



H=12.5cm



H=15.0cm

図 3-2-4 防潮堤に作用する波圧測定結果 (防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)

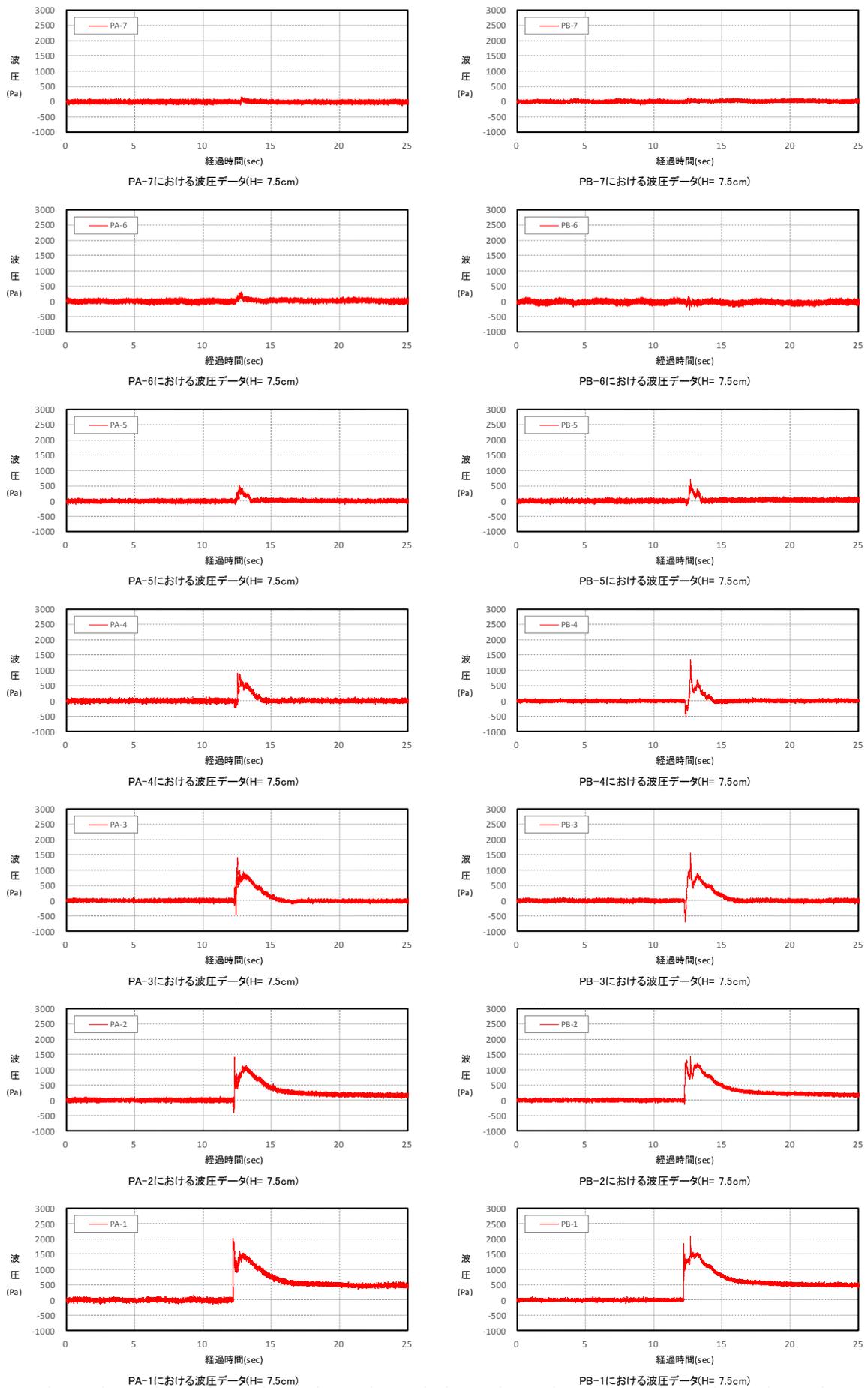
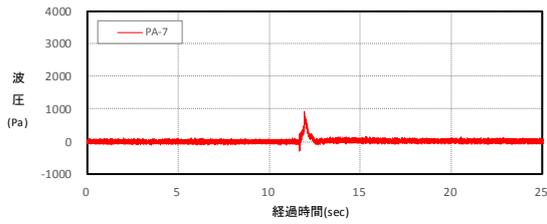
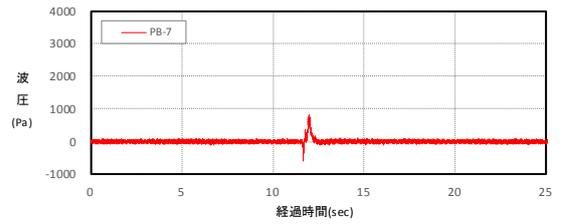


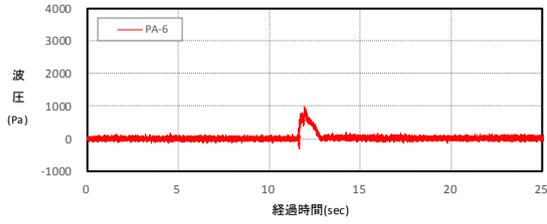
図 3-2-5 波圧時系列データ (H=7.5cm, 防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)



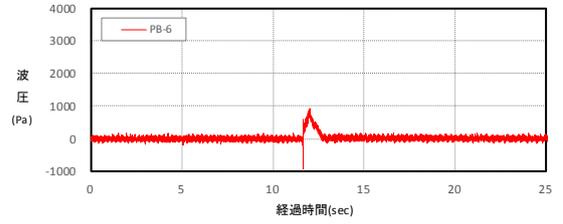
PA-7における波圧データ(H=10.0cm)



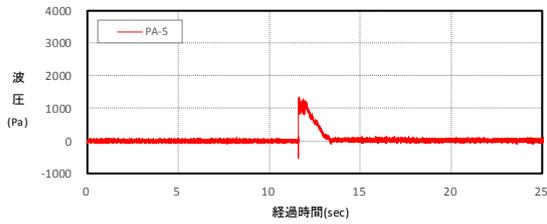
PB-7における波圧データ(H=10.0cm)



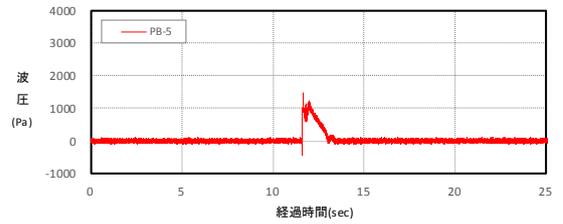
PA-6における波圧データ(H=10.0cm)



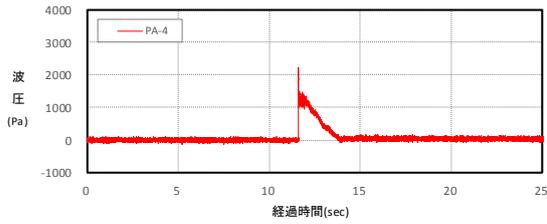
PB-6における波圧データ(H=10.0cm)



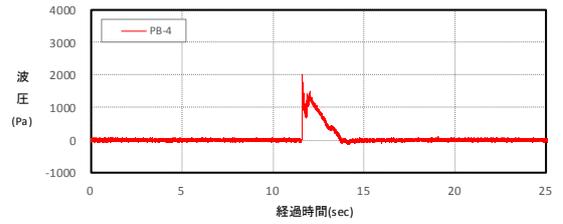
PA-5における波圧データ(H=10.0cm)



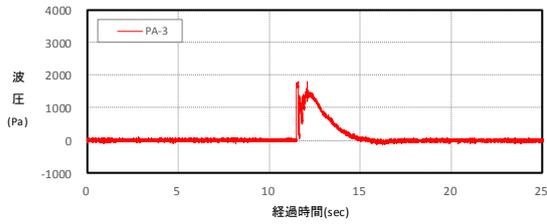
PB-5における波圧データ(H=10.0cm)



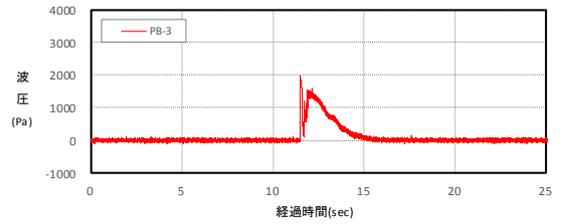
PA-4における波圧データ(H=10.0cm)



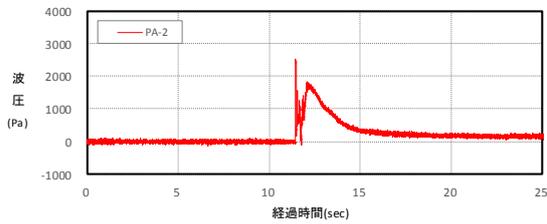
PB-4における波圧データ(H=10.0cm)



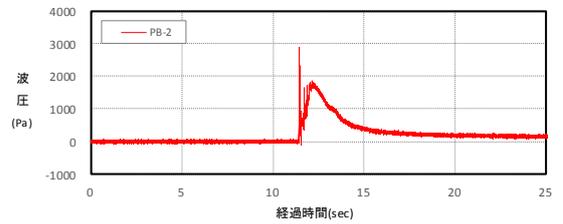
PA-3における波圧データ(H=10.0cm)



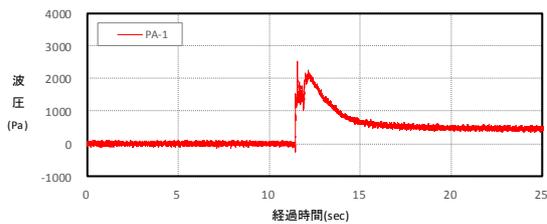
PB-3における波圧データ(H=10.0cm)



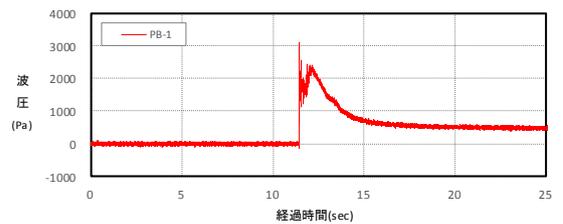
PA-2における波圧データ(H=10.0cm)



PB-2における波圧データ(H=10.0cm)



PA-1における波圧データ(H=10.0cm)



PB-1における波圧データ(H=10.0cm)

図 3-2-6 波圧時系列データ (H=10.0cm, 防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)

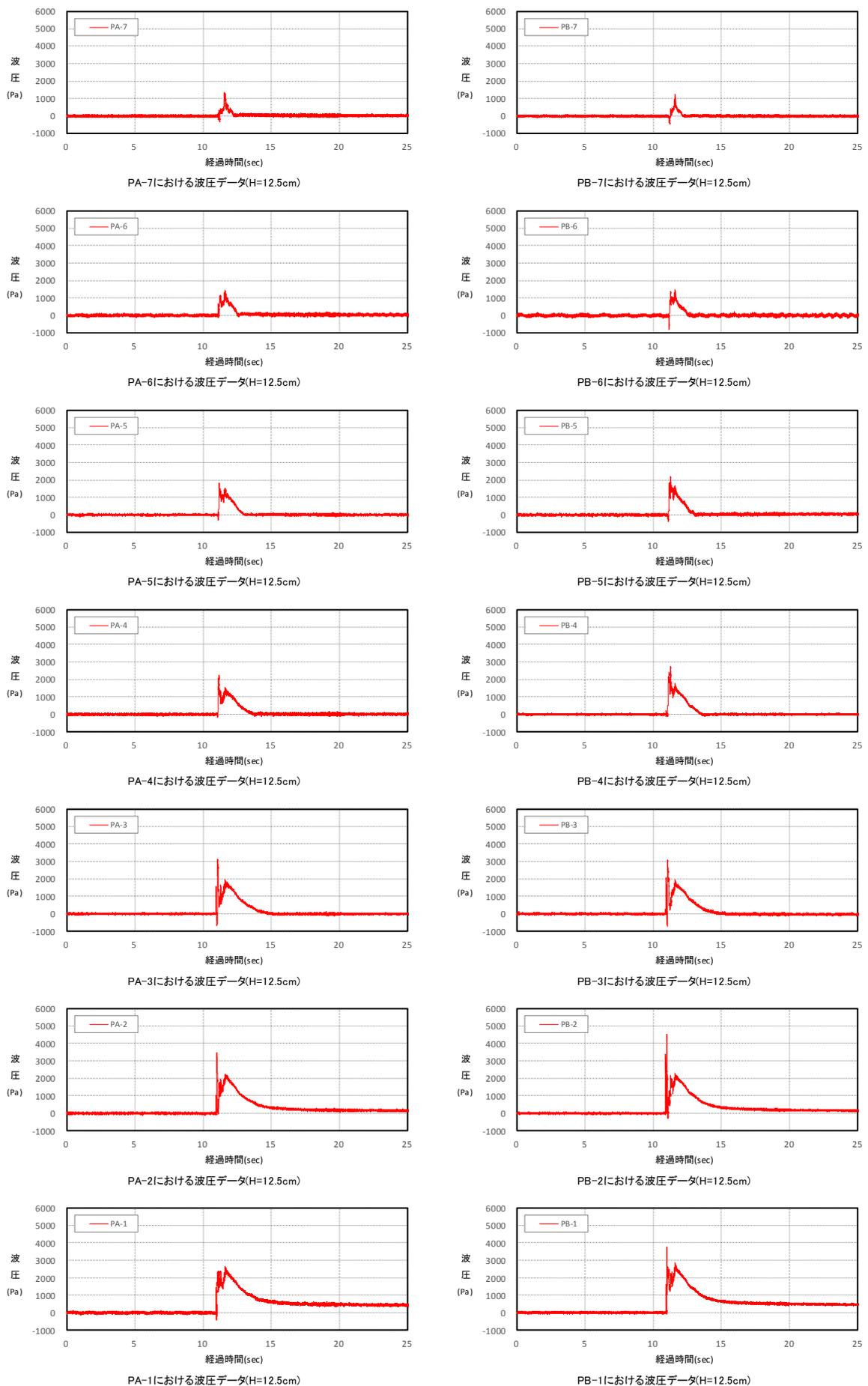
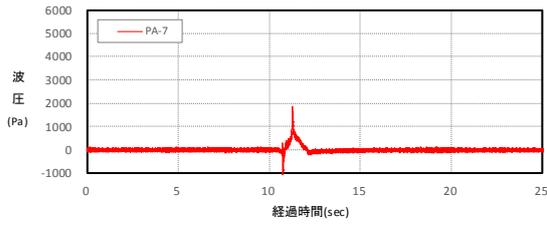
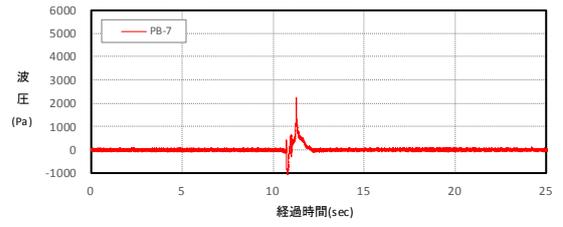


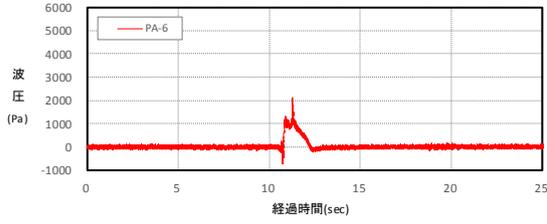
図 3-2-7 波圧時系列データ (H=12.5cm, 防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)



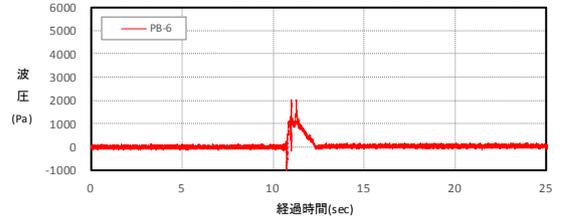
PA-7における波圧データ(H=15.0cm)



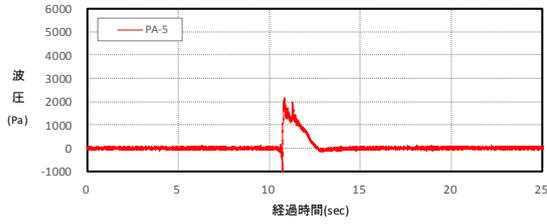
PB-7における波圧データ(H=15.0cm)



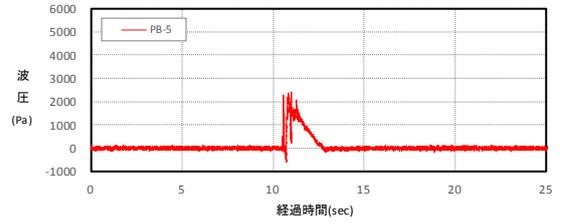
PA-6における波圧データ(H=15.0cm)



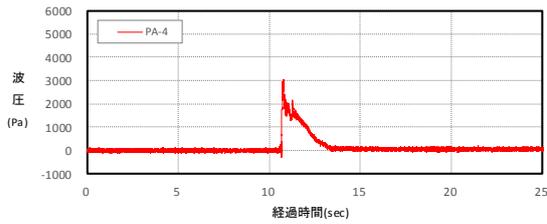
PB-6における波圧データ(H=15.0cm)



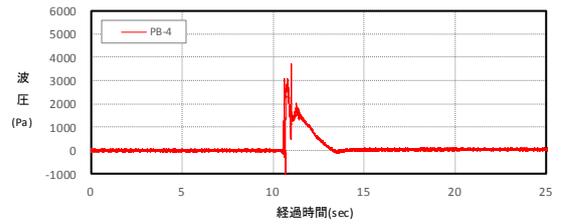
PA-5における波圧データ(H=15.0cm)



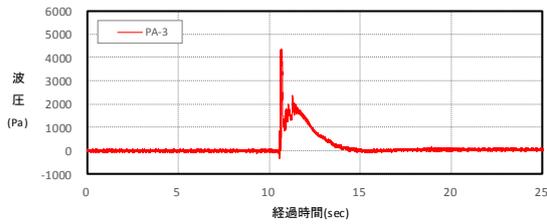
PB-5における波圧データ(H=15.0cm)



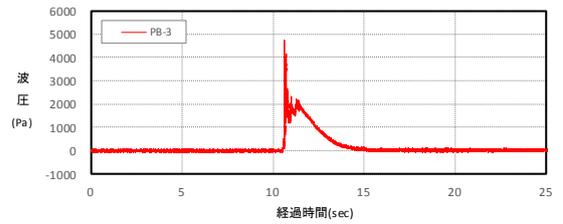
PA-4における波圧データ(H=15.0cm)



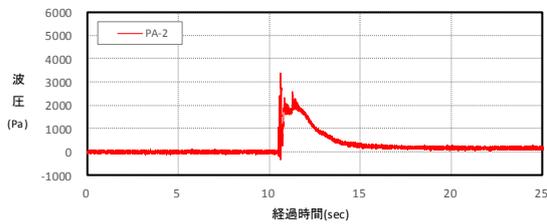
PB-4における波圧データ(H=15.0cm)



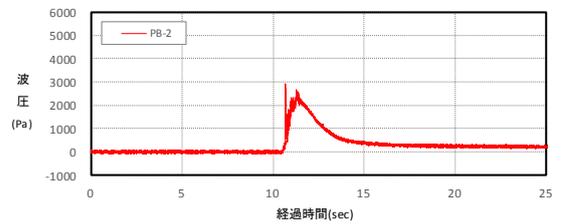
PA-3における波圧データ(H=15.0cm)



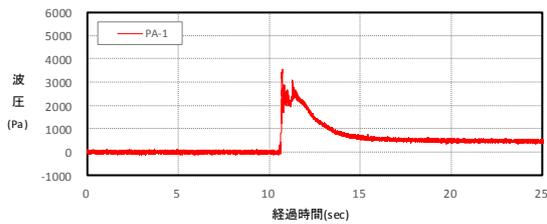
PB-3における波圧データ(H=15.0cm)



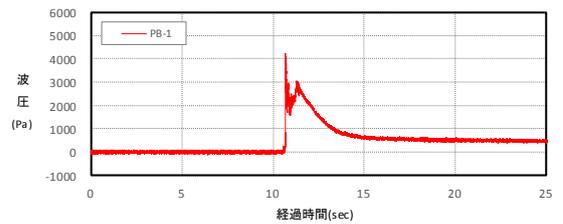
PA-2における波圧データ(H=15.0cm)



PB-2における波圧データ(H=15.0cm)



PA-1における波圧データ(H=15.0cm)



PB-1における波圧データ(H=15.0cm)

図 3-2-8 波圧時系列データ (H=15.0cm, 防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)

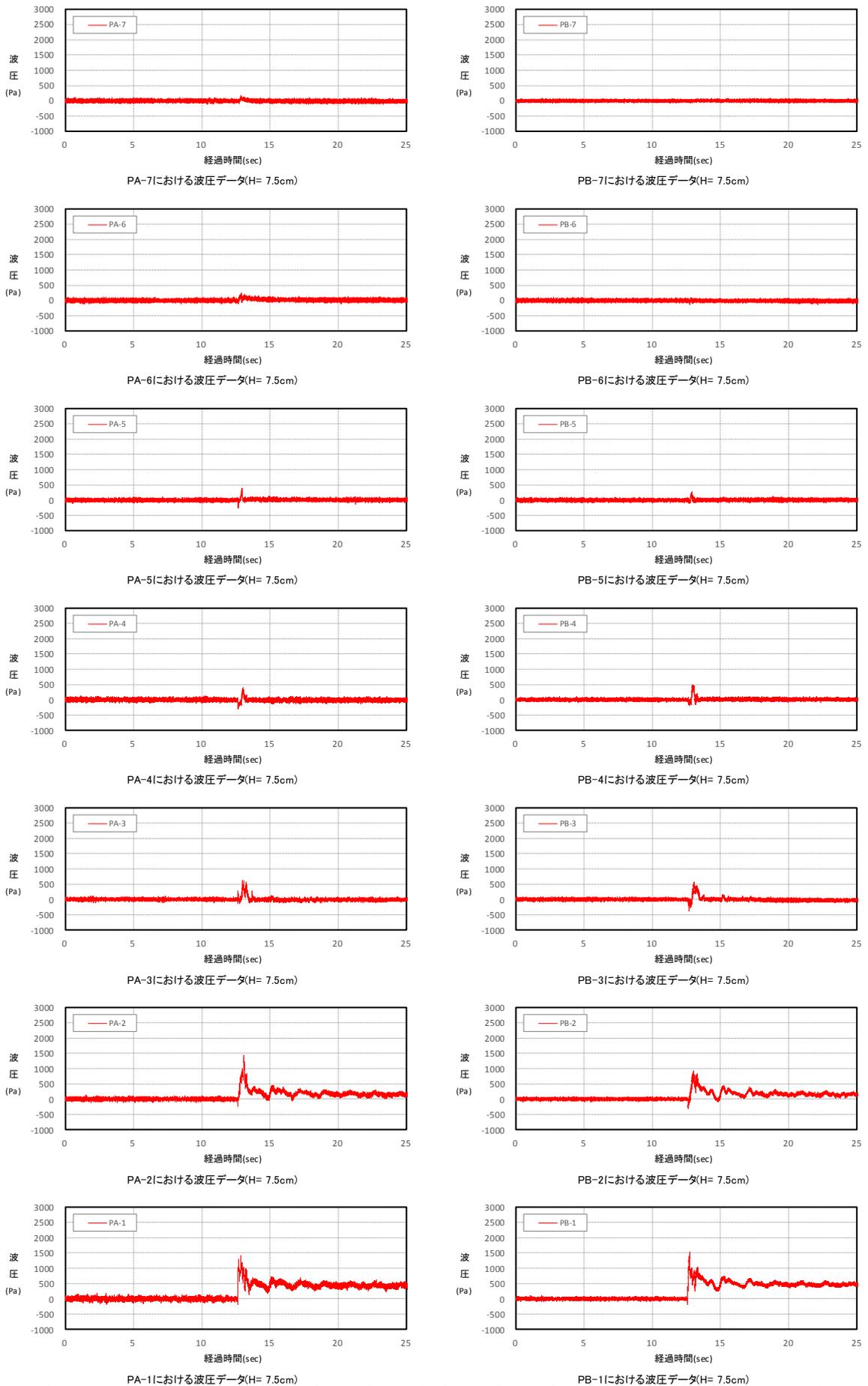


図 3-2-9 波圧時系列データ (H=7.5cm, 防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)

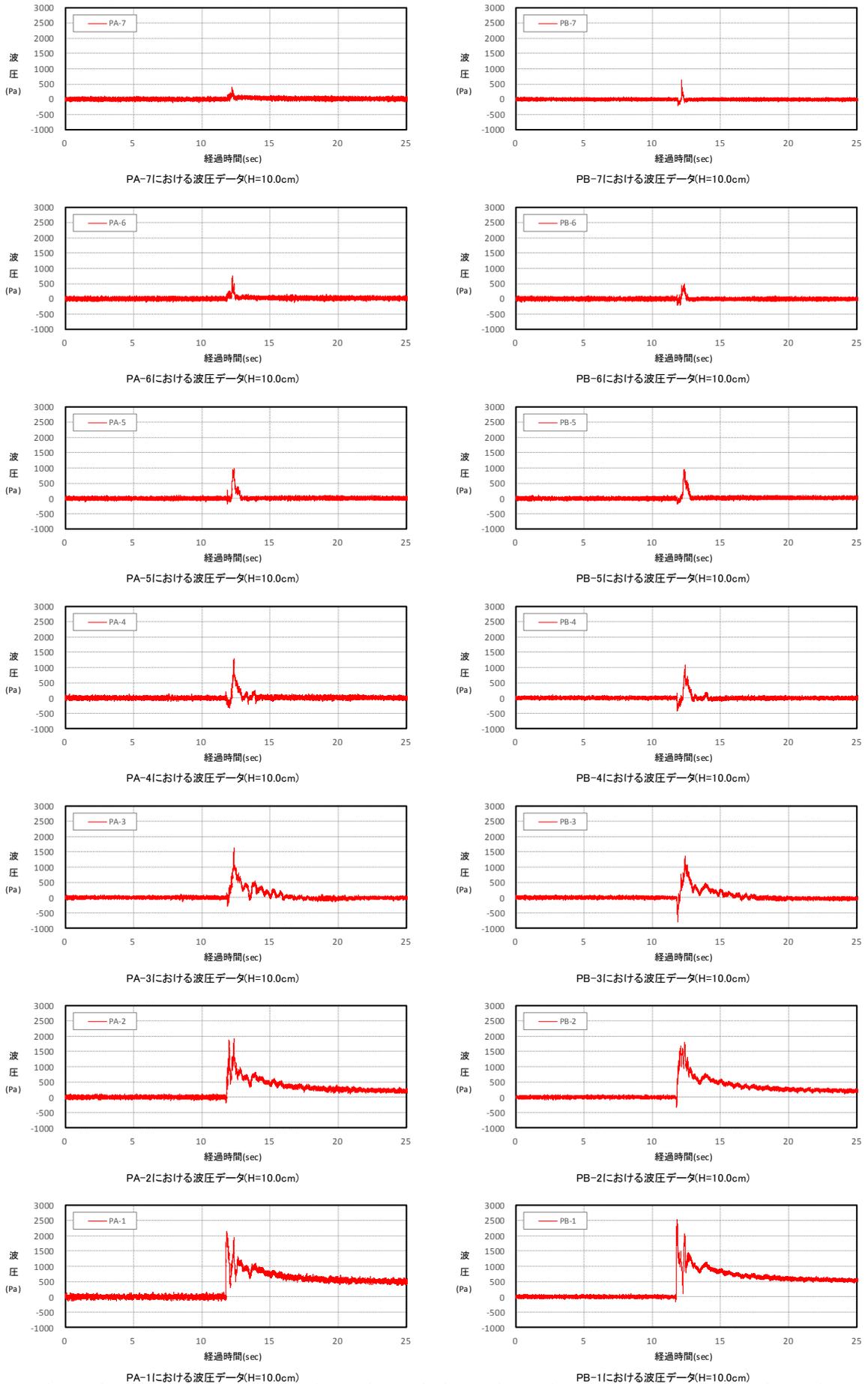


図 3-2-10 波圧時系列データ (H=10.0cm, 防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)

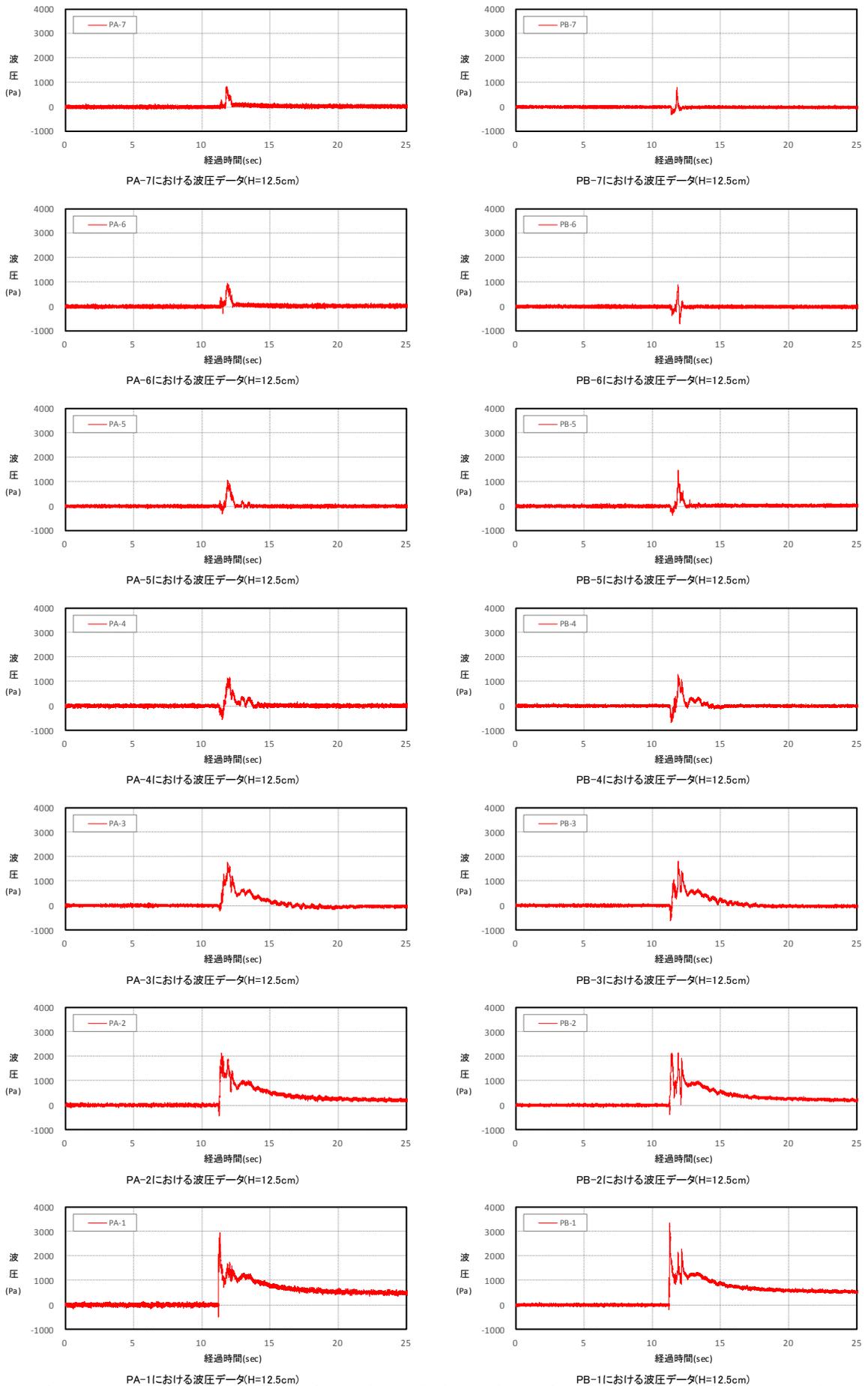


図 3-2-11 波圧時系列データ (H=12.5cm, 防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)

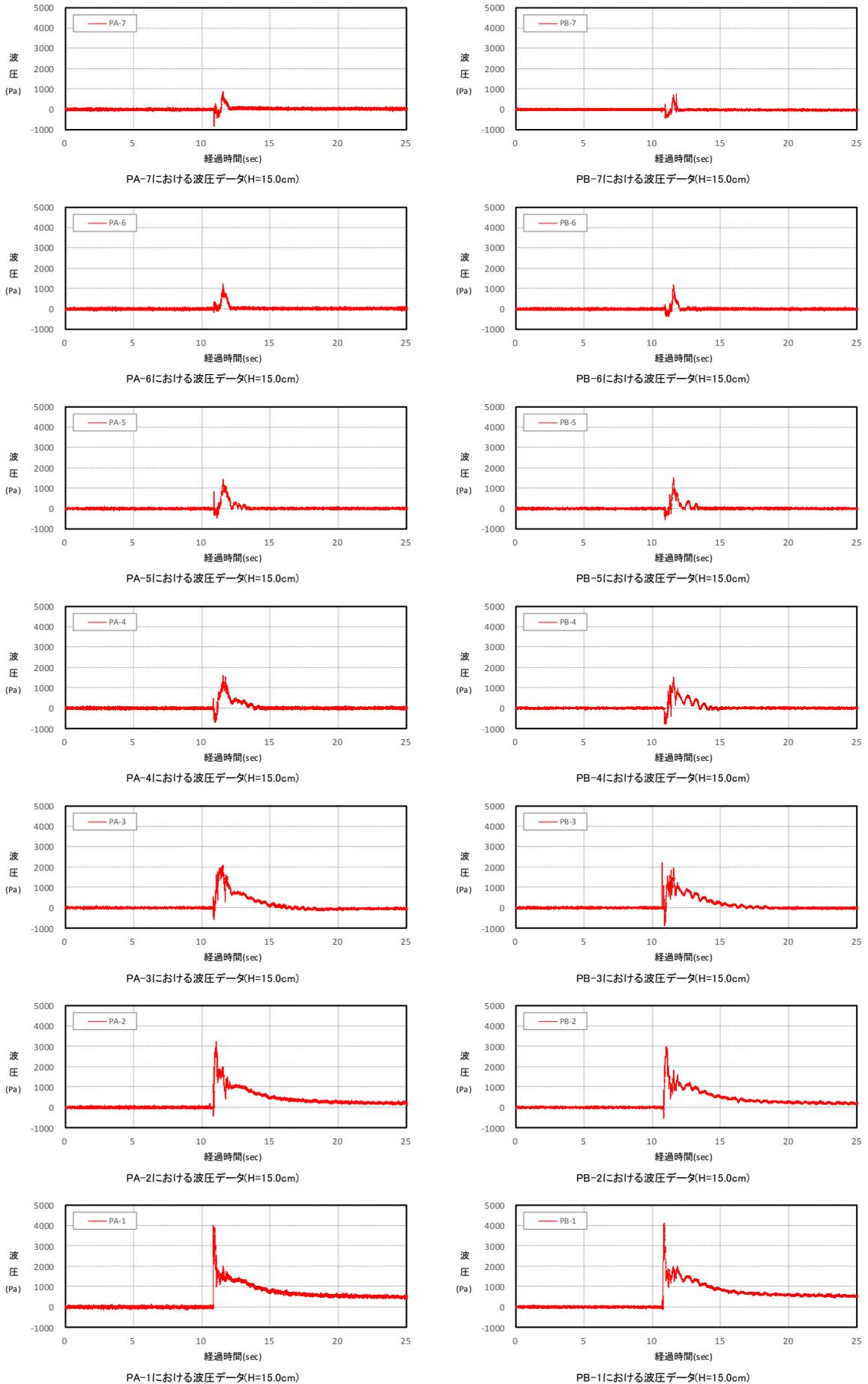
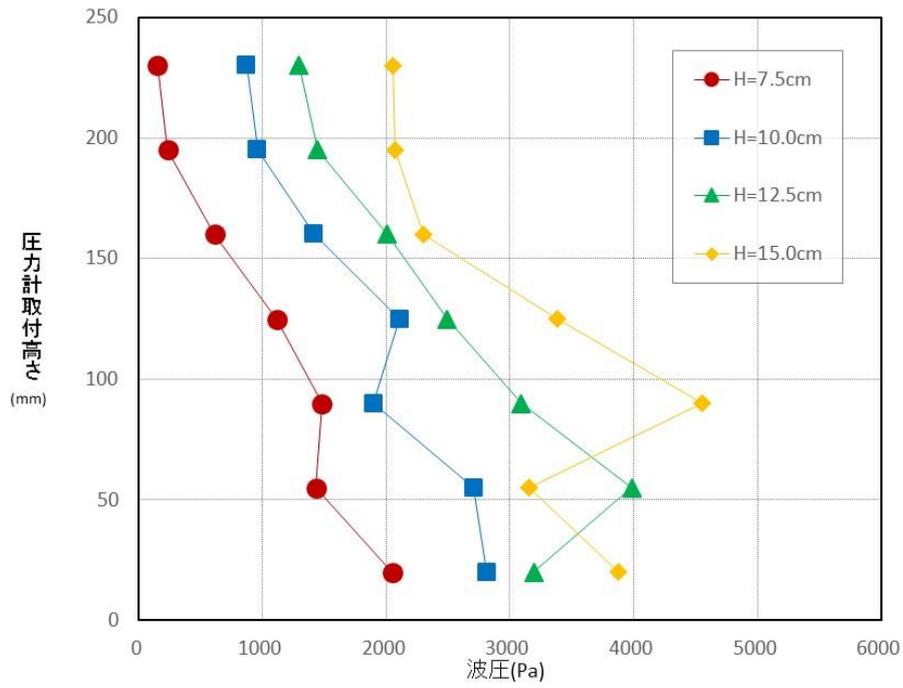
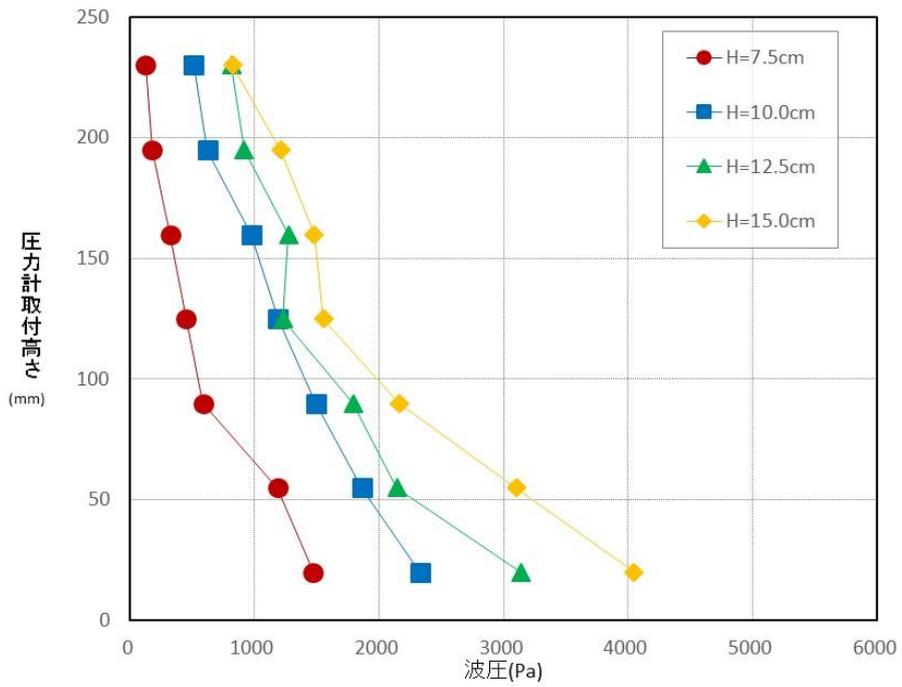


図 3-2-12 波圧時系列データ (H=15.0cm, 防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)



(防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)



(防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)

図 3-2-13 防潮堤に作用する波圧測定結果 (各ケース 2 測線の平均値比較)

第 4 章 移動床砂丘模型試験

4-1 実験の概要

4-1-1 実験ケース

下記に示した津波条件について、それぞれ 4 回試行し、津波変形、防波堤および砂丘底面に作用する圧力、津波作用後の砂丘形状の計測を行った。なお、移動床においては、防潮堤を越えない津波条件を対象としたため、波高は 15.0cm を除く下記 3 種類とした。

- ・ 津波条件

孤立波 波高 (3 種類 ; 固定床試験結果を踏まえて設定)

7.5cm 【沖波】 (試行 : 4 回)

10.0cm " "

12.5cm " "

- ・ 防波堤位置 (2 種類)

1 : 汀線 - 75.0cm (砂丘地形直下流)

2 : 汀線 - 137.5cm (砂丘地形 - 62.5cm)

※防波堤高さは 25cm

入力津波波高 (3 種類) × 防波堤位置 (2 種類) × 試行 : 4 回 = 24 ケース

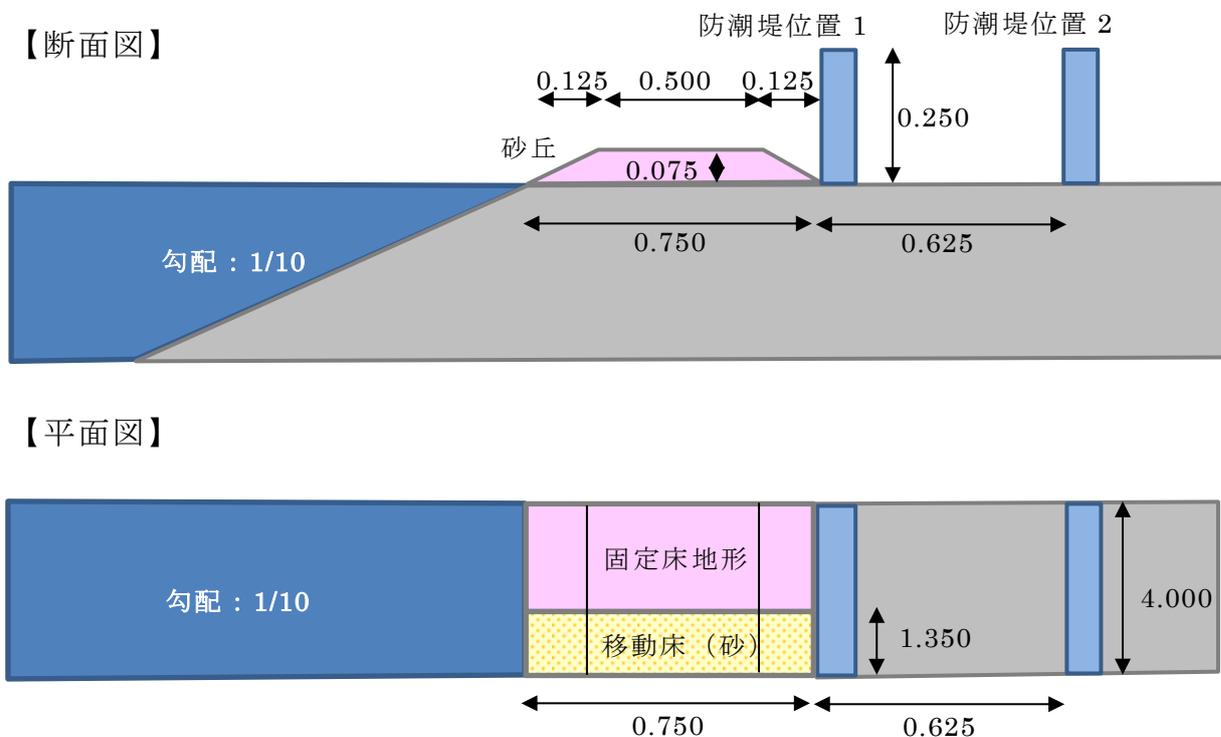


図 4-1-1 実験模型のイメージ (移動床試験, 単位 : m)

4-1-2 実験条件

(1) 実験水槽（津波再現水槽）

実験に用いた水槽は、長さ 45m、幅 4.0m、水深 0.8m の津波再現水槽である。実験水槽の概要を図 2-1-1（前出）に示す。

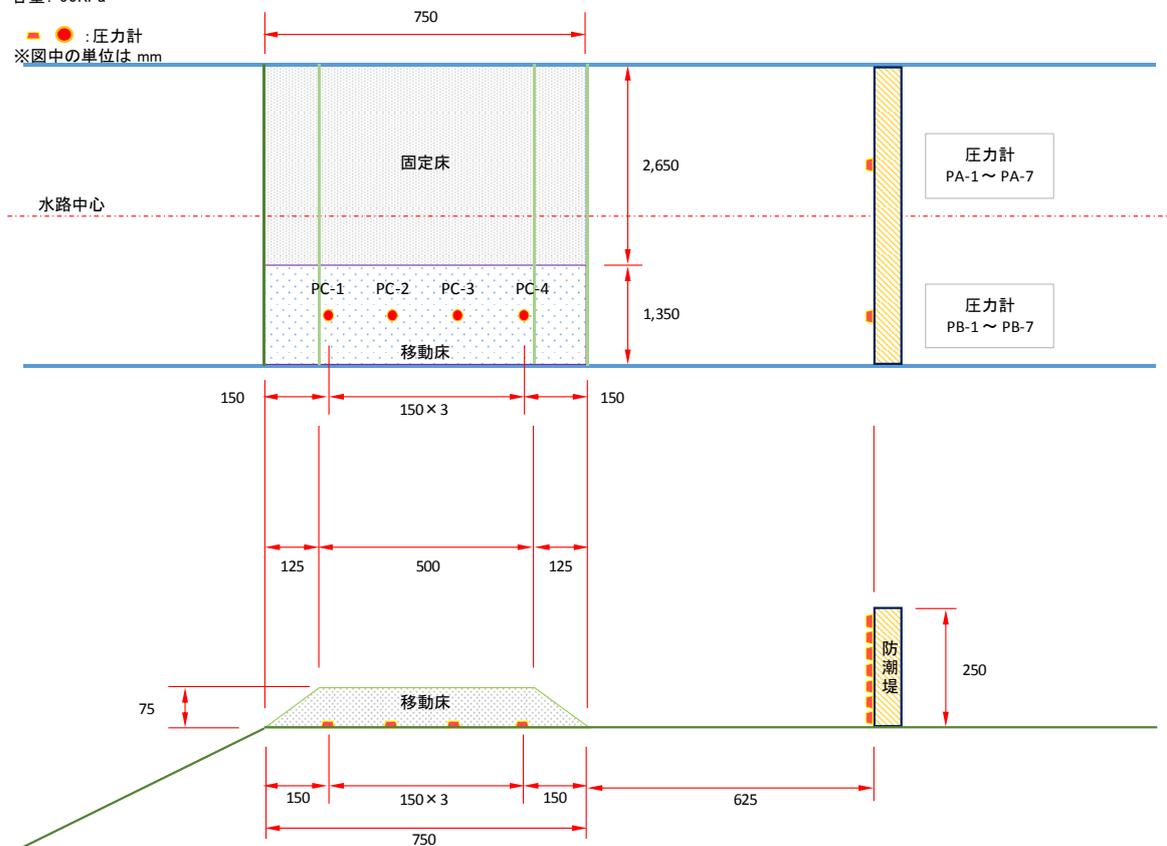
※汀線に砂丘模型を設置した条件で実施した。

(2) 計測機器設置位置

図 2-1-2（波高計，流速計；前出），図 3-2-1～3-2-2（防潮堤圧力計；前出），および図 4-1-2（底面圧力計）に実験に用いた計測機器及びその設置位置を示す。

☆圧力計の仕様
 ・株式会社 KYOWA 製
 ・型式: PS-05KC
 ・容量: 50KPa

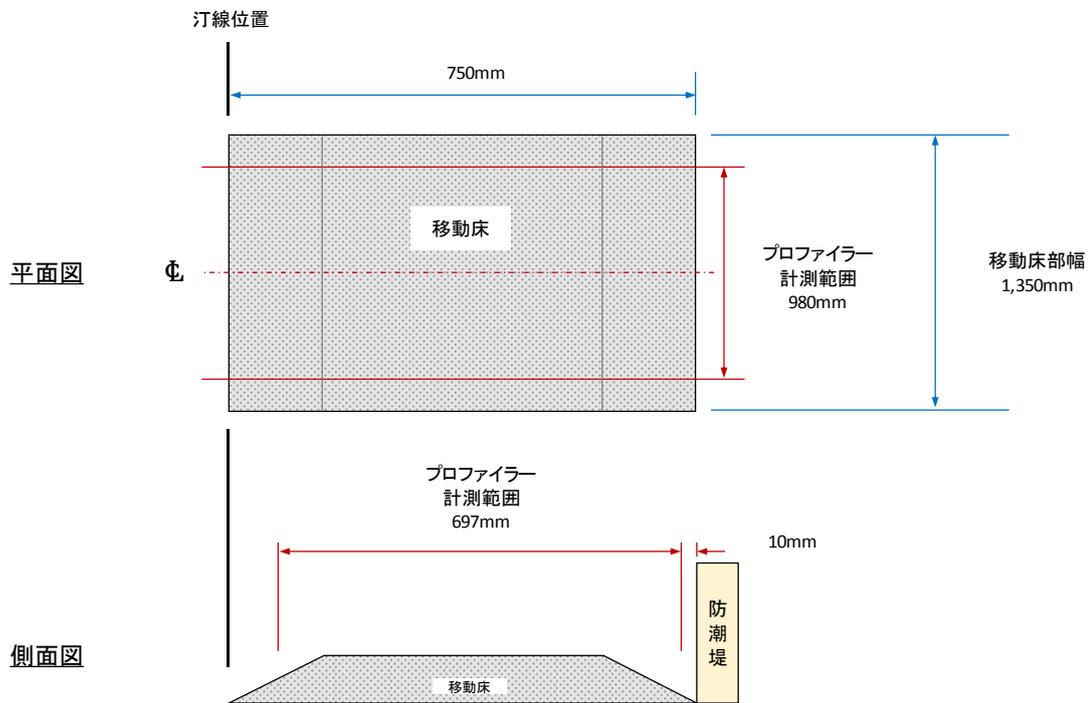
● : 圧力計
 ※図中の単位は mm



(圧力計取付け状況)

図 4-1-2 計測機器 設置位置(底面圧力計)

通水後の砂丘形状については、縦断方向に2測線、ポイントゲージとレベルで計測を行うとともに、昨年度と同様に3Dレーザープロファイラーで面的に計測を行った。3Dレーザープロファイラーの計測範囲を以下に示す。



プロファイラーの計測範囲



3Dレーザープロファイラー

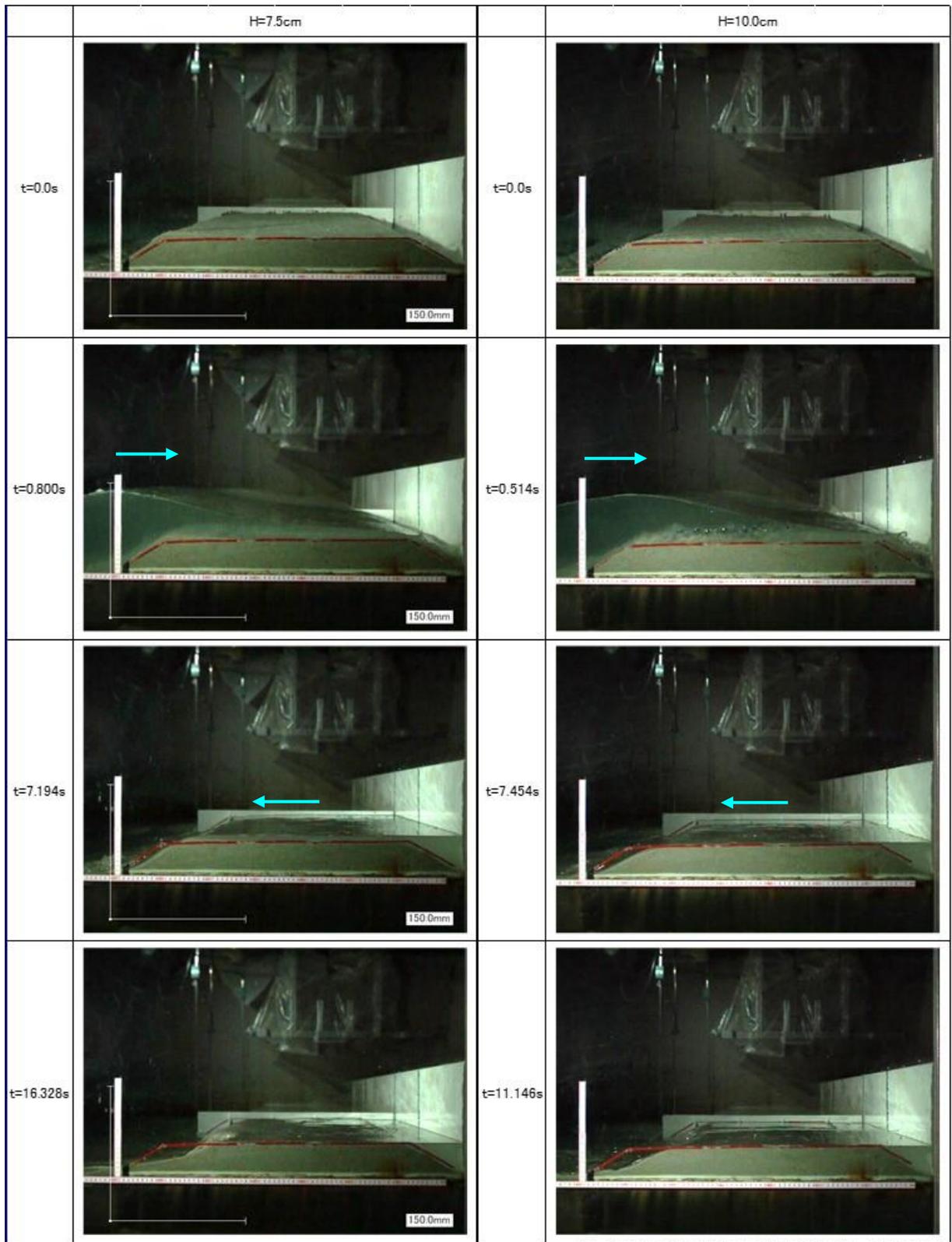
4-2 実験結果

(1) 津波変形と砂の移動状況

各実験ケースにおける津波変形と砂丘地形の砂の移動状況を写真 4-2-1～4-2-4 に示す。

津波が通過する際、および防潮堤で反射されて引き波となる際のいずれにおいても、砂丘材料が（固定床→移動床）に変わったことによって、津波変形の状況に顕著な変化は見られない。これは、この波の往復の間に砂丘が侵食される（変形する）度合いが表層のごく僅かな部分に限定されることによる。

砂丘地形の変形が著しいのは、砂丘地形と防潮堤との間の窪みに溜まった水が戻り流れで沖側に流下する時であり、汀線側の砂丘地形が法肩から徐々に侵食されて岸側に進行する。



※t: 津波が汀線に到達したときの時間を基準(t=0)とした時刻

写真 4-2-1 津波変形状況（防潮堤位置 1；汀線-75.0cm）
【H=7.5cm, 10.0cm】

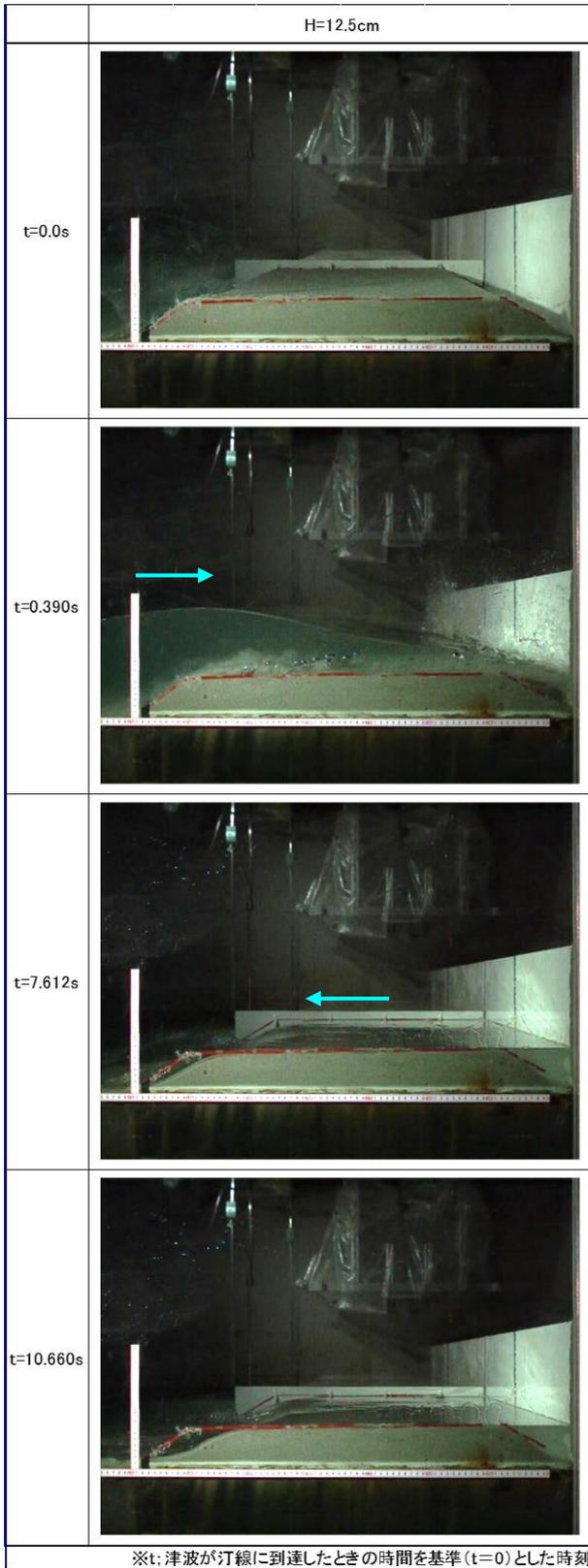
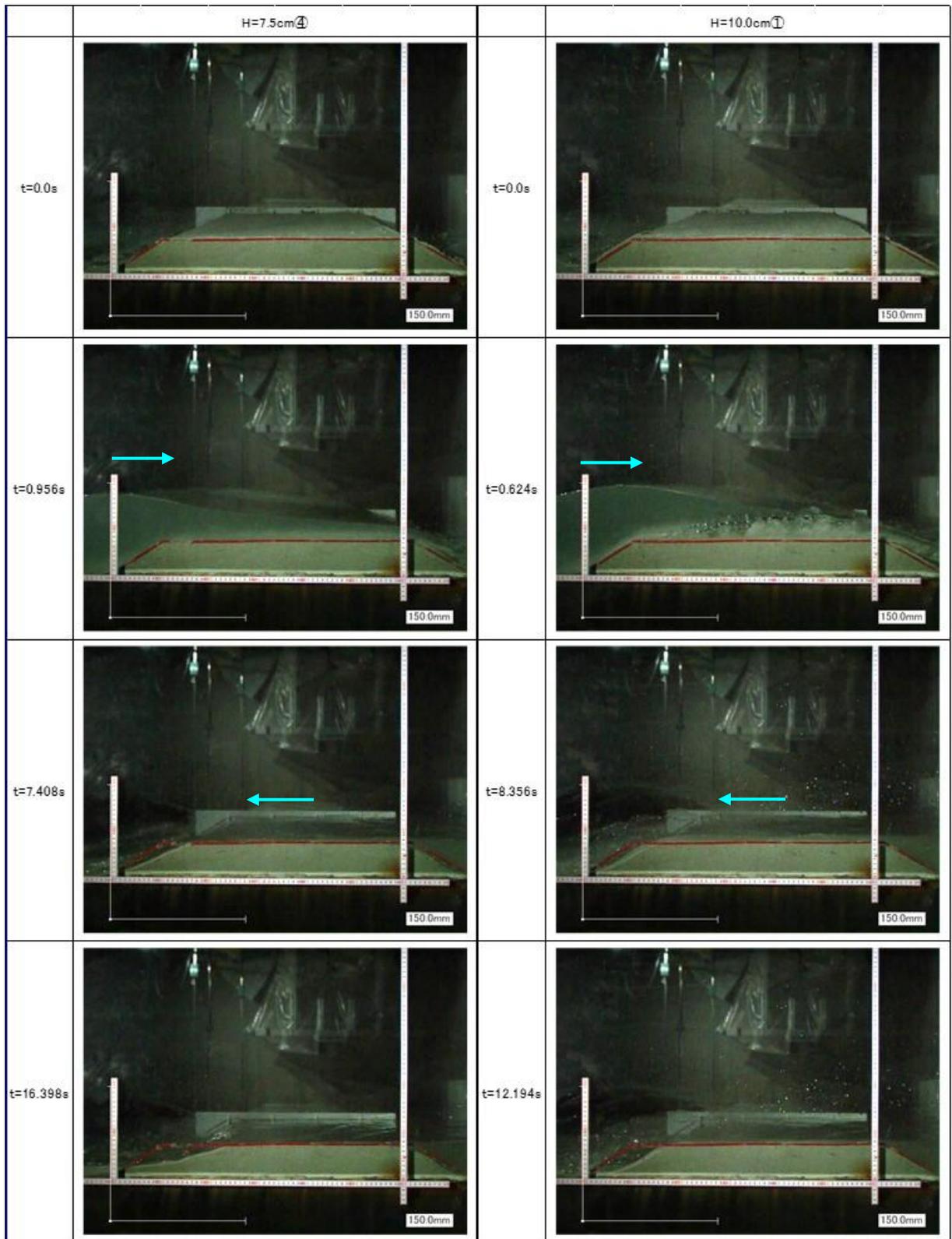


写真 4-2-2 津波変形状況 (防潮堤位置 1 ; 汀線-75.0cm)
【H=12.5cm】



※t: 津波が汀線に到達したときの時間を基準 (t=0) とした時刻

写真 4-2-3 津波変形状況 (防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)
【H=7.5cm, 10.0cm】

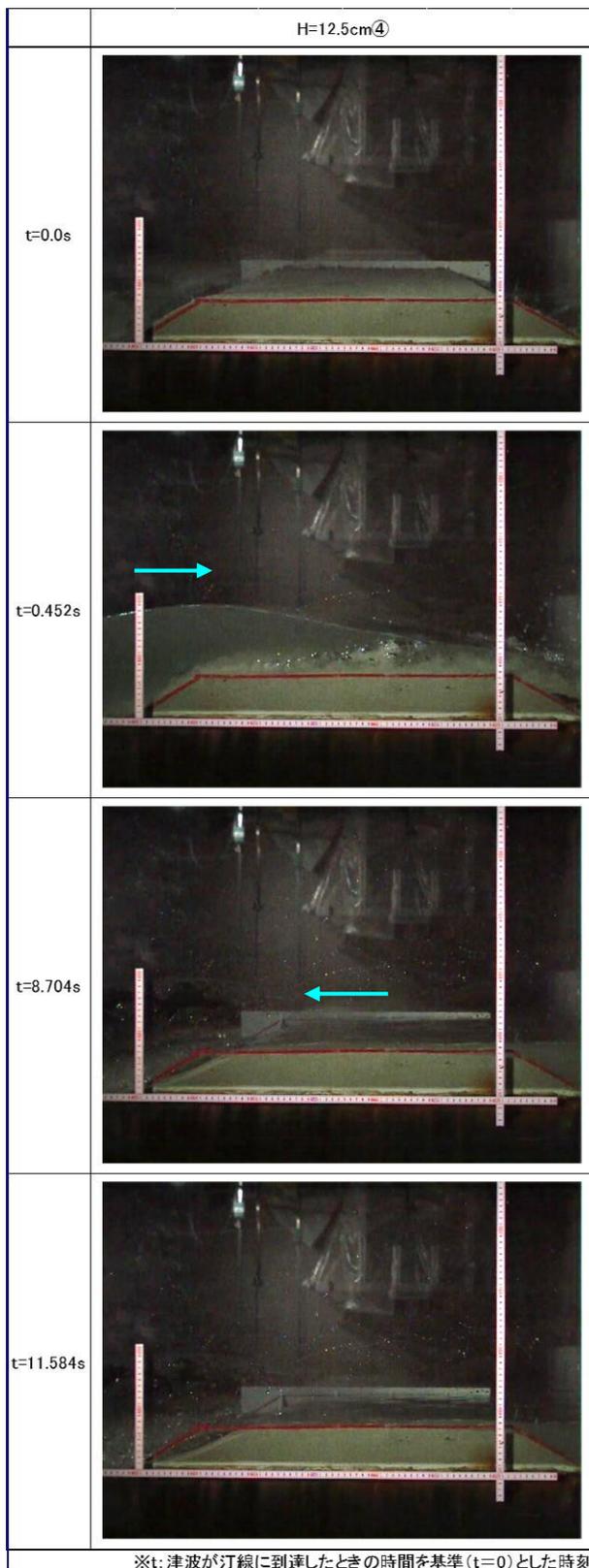


写真 4-2-4 津波変形状況 (防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)
【H=12.5cm】

(2) 津波作用後の砂丘形状および砂丘底面に作用する圧力

通水後の砂丘地形の縦断および平面測定結果を図 4-2-1～4-2-4 に示す。

防潮堤位置が-75cm の場合、波高が大きいほど砂丘地形と防潮堤との間の窪みに一時的に溜まる水の量が多くなるので、波の戻り流れによる侵食度合いもやや大きくなる。防波堤位置が-137.5cm の場合には、砂丘地形と防潮堤との間が広く開くため、波高による侵食の度合いの差は小さくなる。

砂丘底面に作用する圧力分布を図 4-2-5～4-2-8 に示す。なお圧力値は記録した時系列データのうち、最大値と波通過後(データサンプリング時間 20～25sec の平均値, 図 4-2-9 ; 砂丘底面に作用する圧力時系列データの一例を参照) の 2 種類で示している。また津波作用後の砂丘形状と重ね書きすることで、その関連性を示した。

砂丘底面に作用する圧力分布の最大値は、概ね砂丘を通過する際の波の最大自由水面高に相当するが、砂丘地形の先端ではそれより下がる傾向にある。これは写真 4-2-1～4-1-4 に示したように、砂丘地形の先端(法肩)で流れの剥離が生じて気泡が発生しており、その影響で作用圧力の低下が生じているためと推察される。

砂丘底面に作用する圧力分布の波通過後の値は、概ね砂丘地形内に残存する浸透水面を示していると推察される。なお、砂丘地形の先端(法肩)では侵食が生じているため、この部分の圧力は初期値より下がり、マイナスを示している(初期値を圧力 0 とし、マイナスの圧力の絶対値は評価できない)。

これらの結果より、津波が砂丘上を通過することによって負の圧力が作用することはなく、それに伴って吸出し等による侵食も生じることはない。砂丘の侵食は、主に津波の戻り流れ等の掃流力によって生じている。

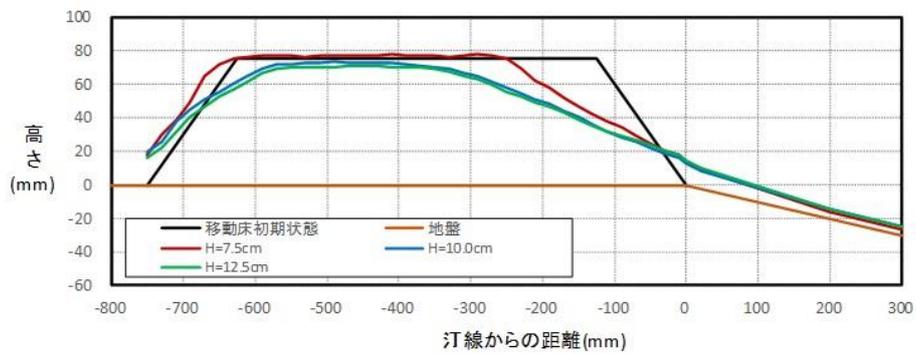
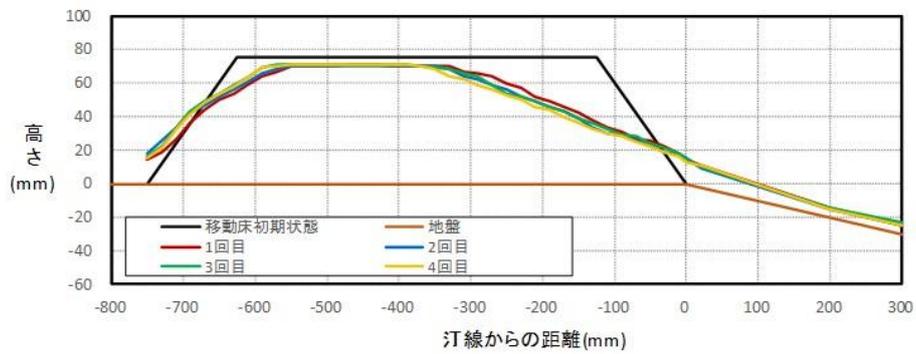
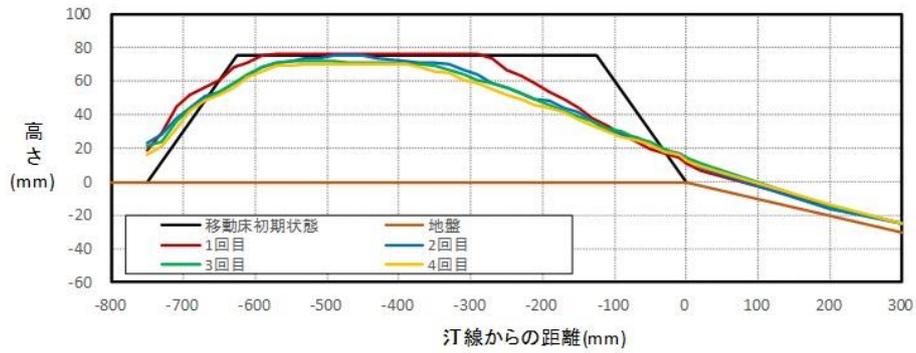
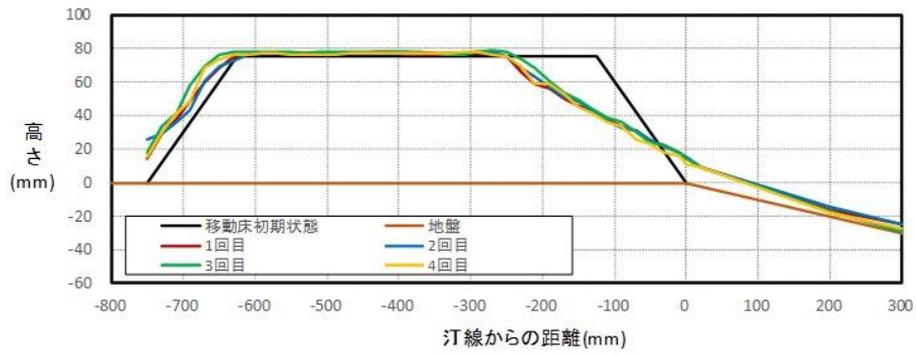
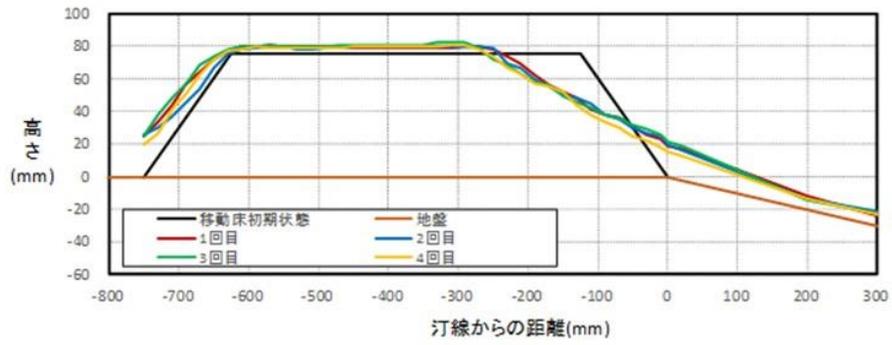
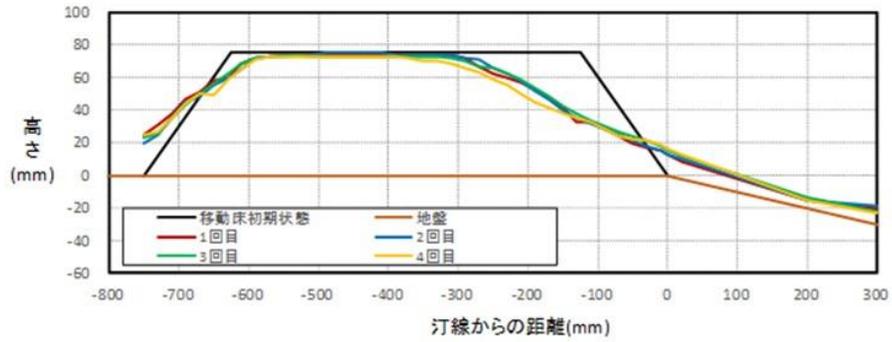


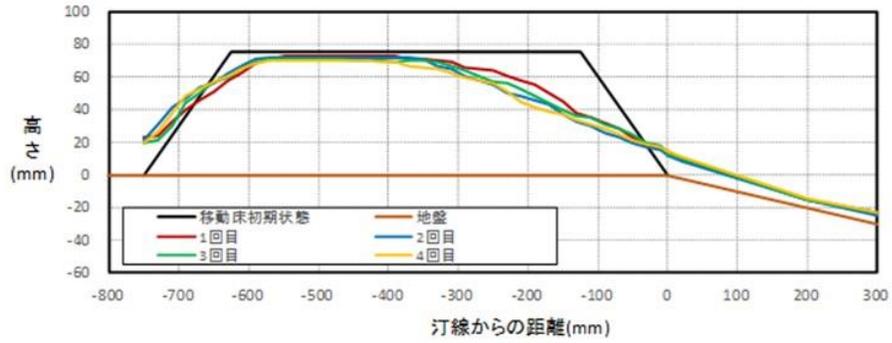
図 4-2-1(1) 通水後の砂丘地形の縦断測定結果
(防潮堤位置 1 ; 汀線-75.0cm, 測線 ; ガラス面側)



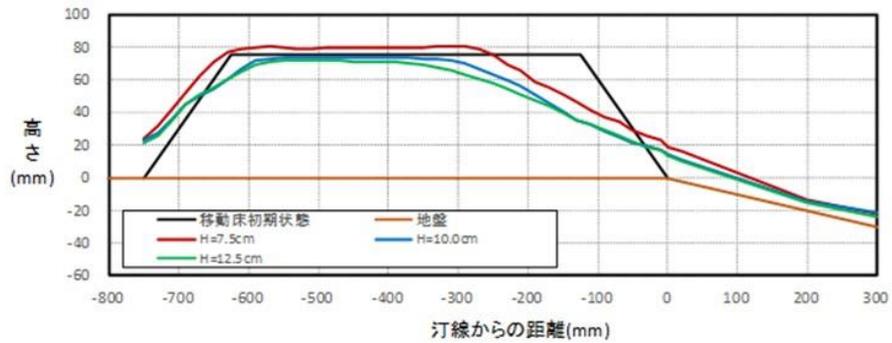
波高 7.5cmにおける移動床の高さ計測結果(移動床中央)



波高 10.0cmにおける移動床の高さ計測結果(移動床中央)

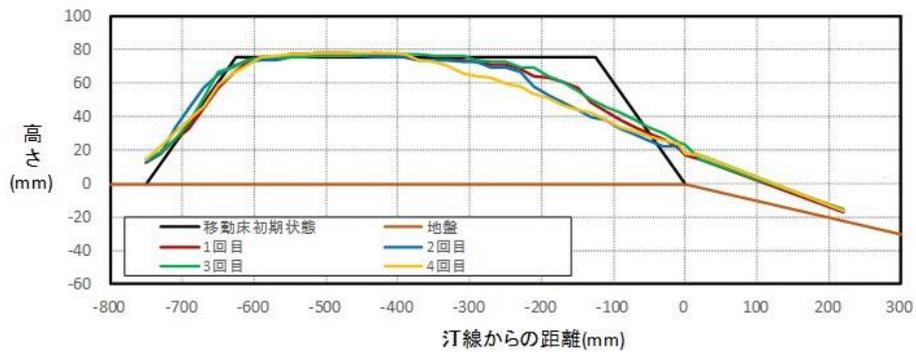


波高 12.5cmにおける移動床の高さ計測結果(移動床中央)

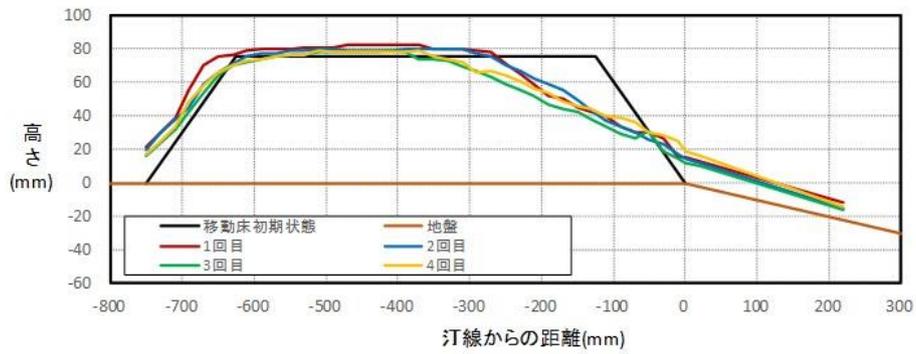


高さ計測値の平均値による各波高での比較(移動床中央)

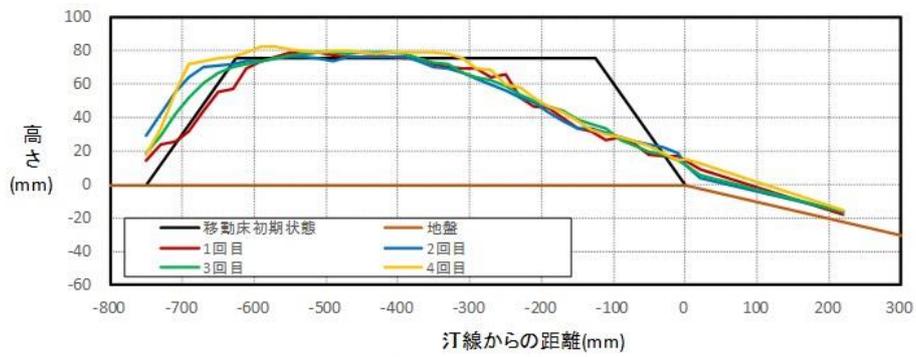
図 4-2-1(2) 通水後の砂丘地形の縦断測定結果
(防潮堤位置 1 ; 汀線-75.0cm, 測線 ; 移動床中央)



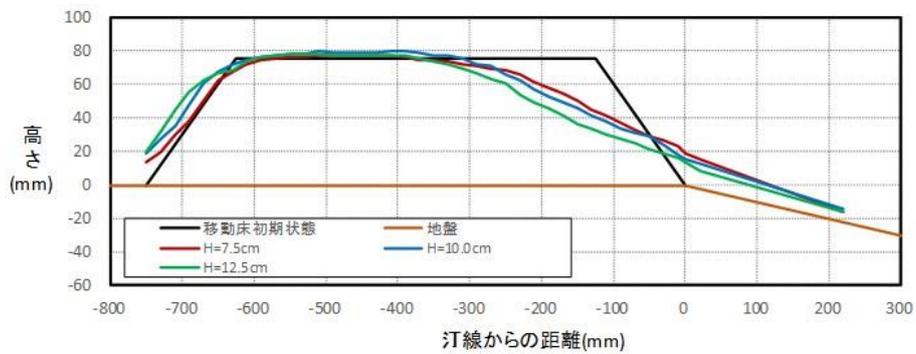
波高 7.5cmにおける移動床の高さ計測結果(ガラス面側)



波高 10.0cmにおける移動床の高さ計測結果(ガラス面側)

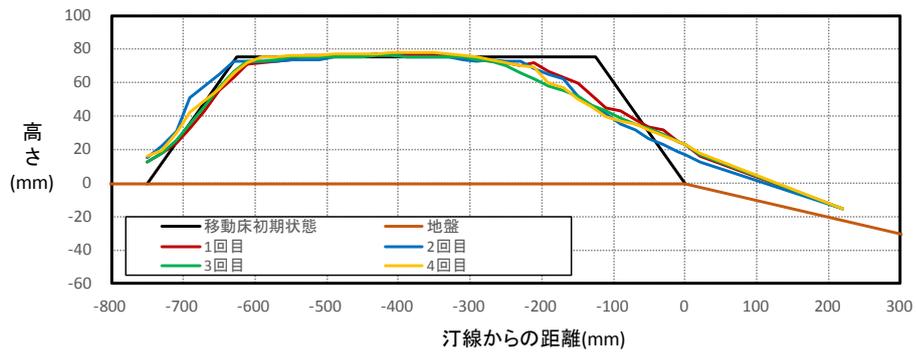


波高 12.5cmにおける移動床の高さ計測結果(ガラス面側)

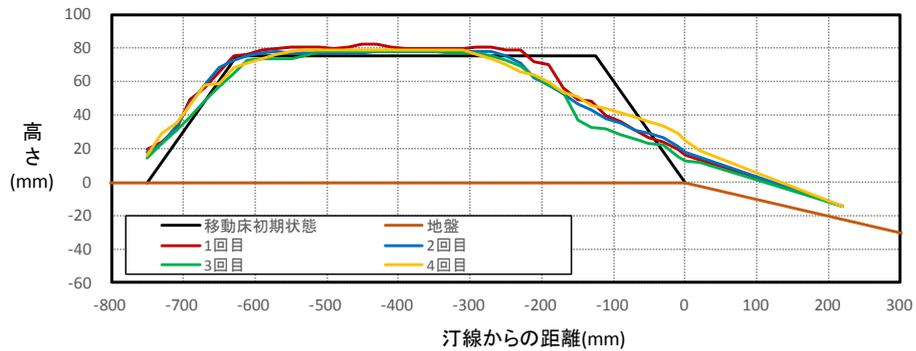


高さ計測値の平均値による各波高での比較(ガラス面側)

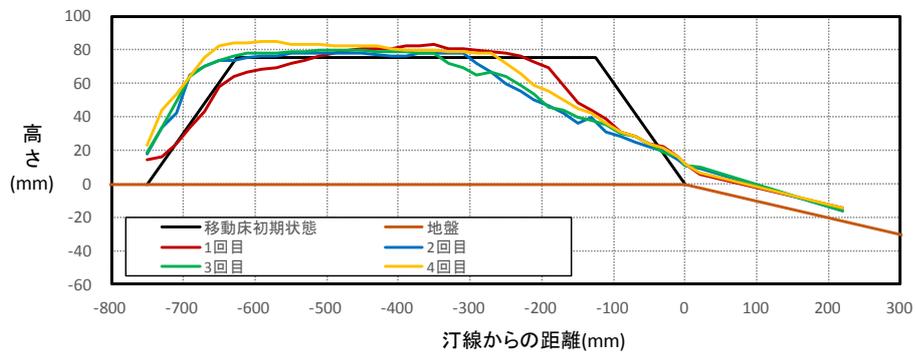
図 4-2-2(1) 通水後の砂丘地形の縦断測定結果 (防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm, 測線 ; ガラス面側)



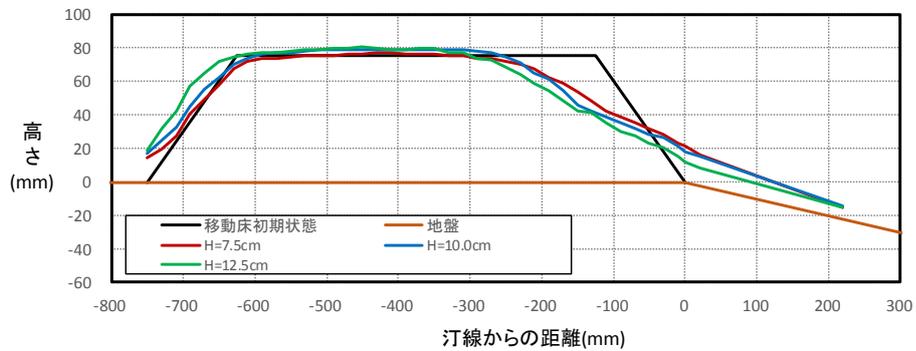
波高 7.5cmにおける移動床の高さ計測結果(移動床中央)



波高 10.0cmにおける移動床の高さ計測結果(移動床中央)

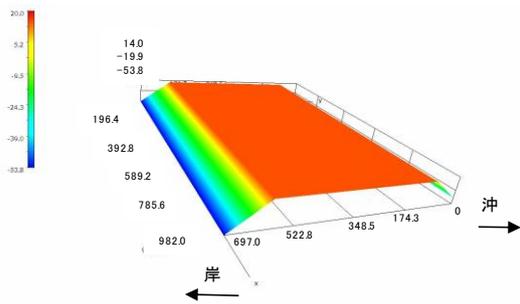


波高 12.5cmにおける移動床の高さ計測結果(移動床中央)

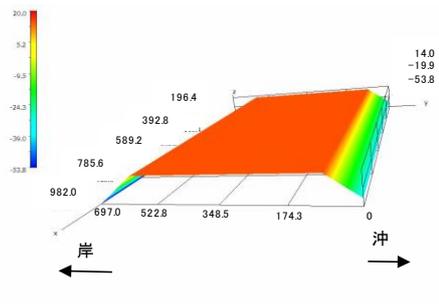


高さ計測値の平均値による各波高での比較(移動床中央)

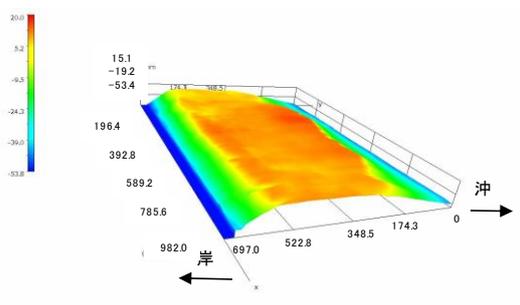
図 4-2-2(2) 通水後の砂丘地形の縦断測定結果
(防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm, 測線 ; 移動床中央)



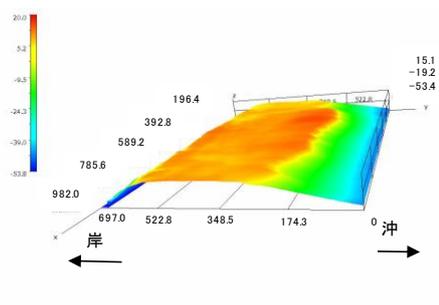
初期河床



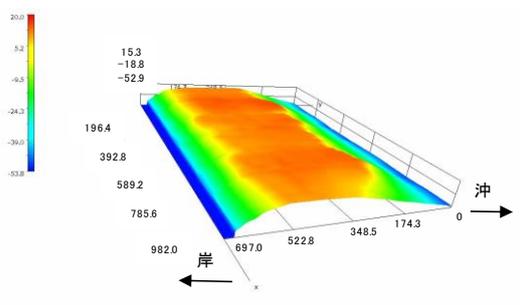
初期河床



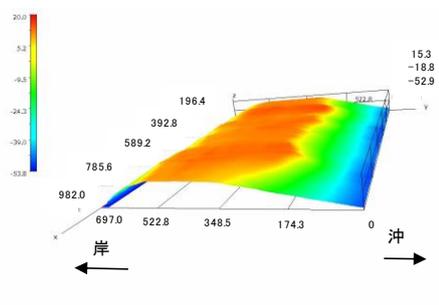
波高 7.5cm



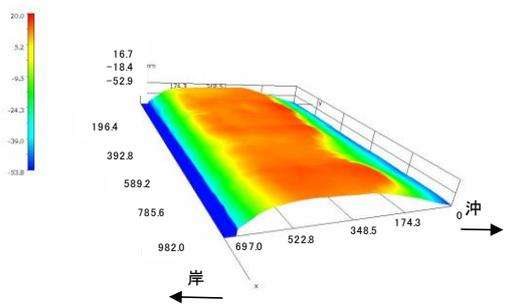
波高 7.5cm



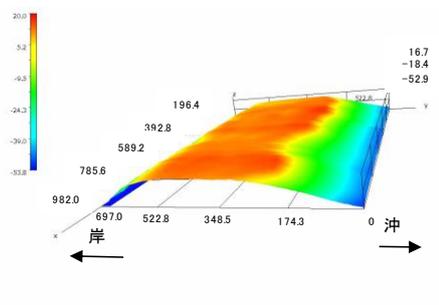
波高 10.0cm



波高 10.0cm

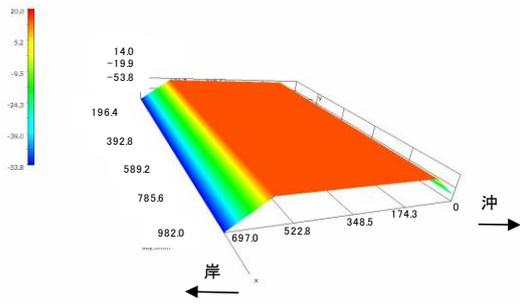


波高 12.5cm

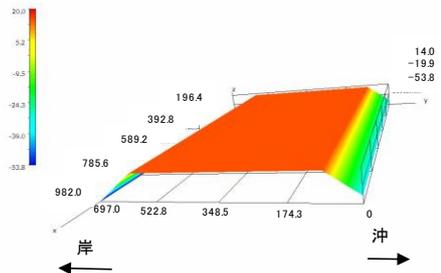


波高 12.5cm

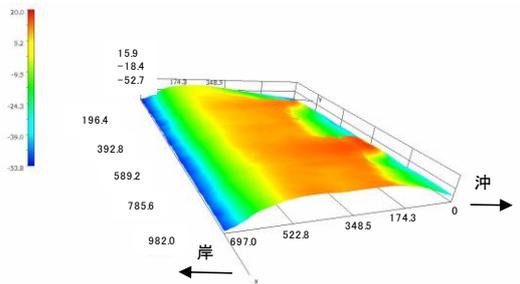
図 4-2-3 通水後の砂丘地形 (防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)



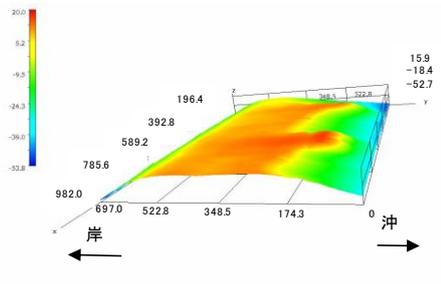
初期河床



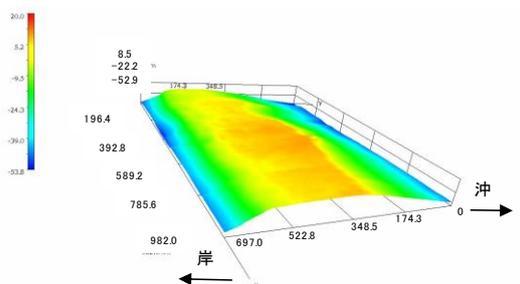
初期河床



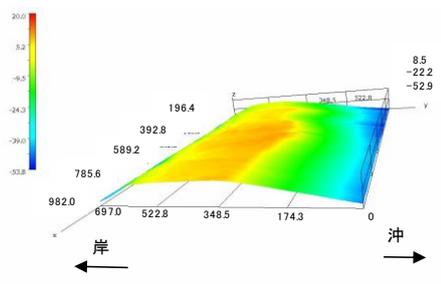
波高 7.5cm



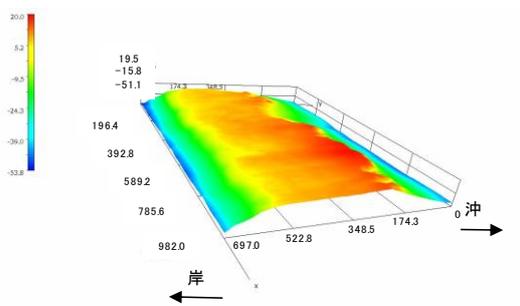
波高 7.5cm



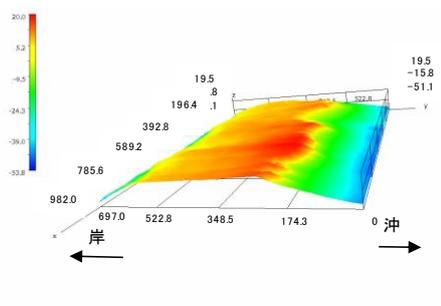
波高 10.0cm



波高 10.0cm

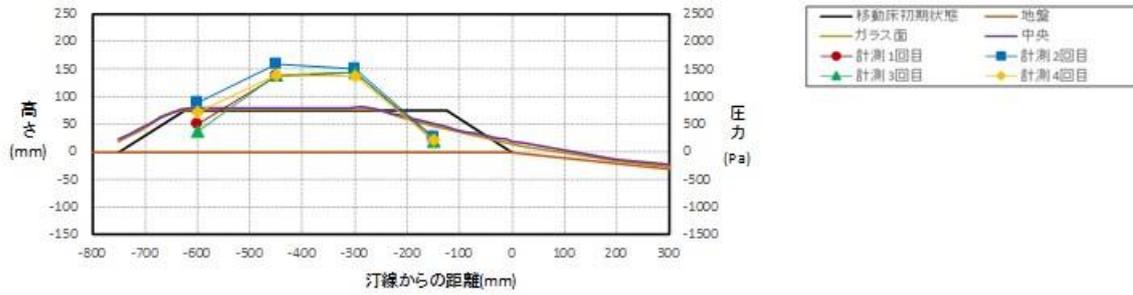


波高 12.5cm

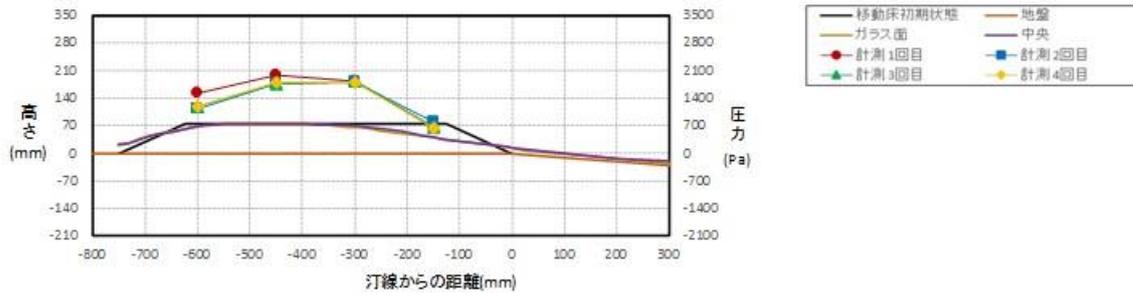


波高 12.5cm

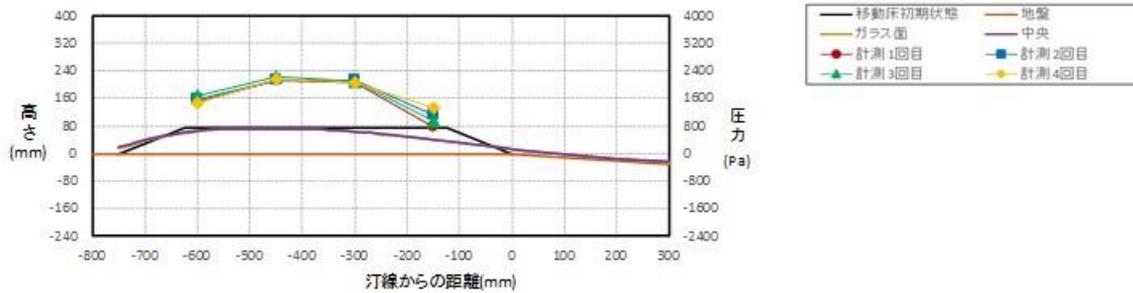
図 4-2-4 通水後の砂丘地形（防潮堤位置 2；汀線-137.5cm）



波高 7.5cmにおける高さ計測値の平均値と圧力分布(圧力の最大値)



波高 10.0cmにおける高さ計測値の平均値と圧力分布(圧力の最大値)



波高 12.5cmにおける高さ計測値の平均値と圧力分布(圧力の最大値)

図 4-2-5 砂丘底面に作用する圧力分布【最大値】
(防潮堤位置 1 ; 汀線-75.0cm)

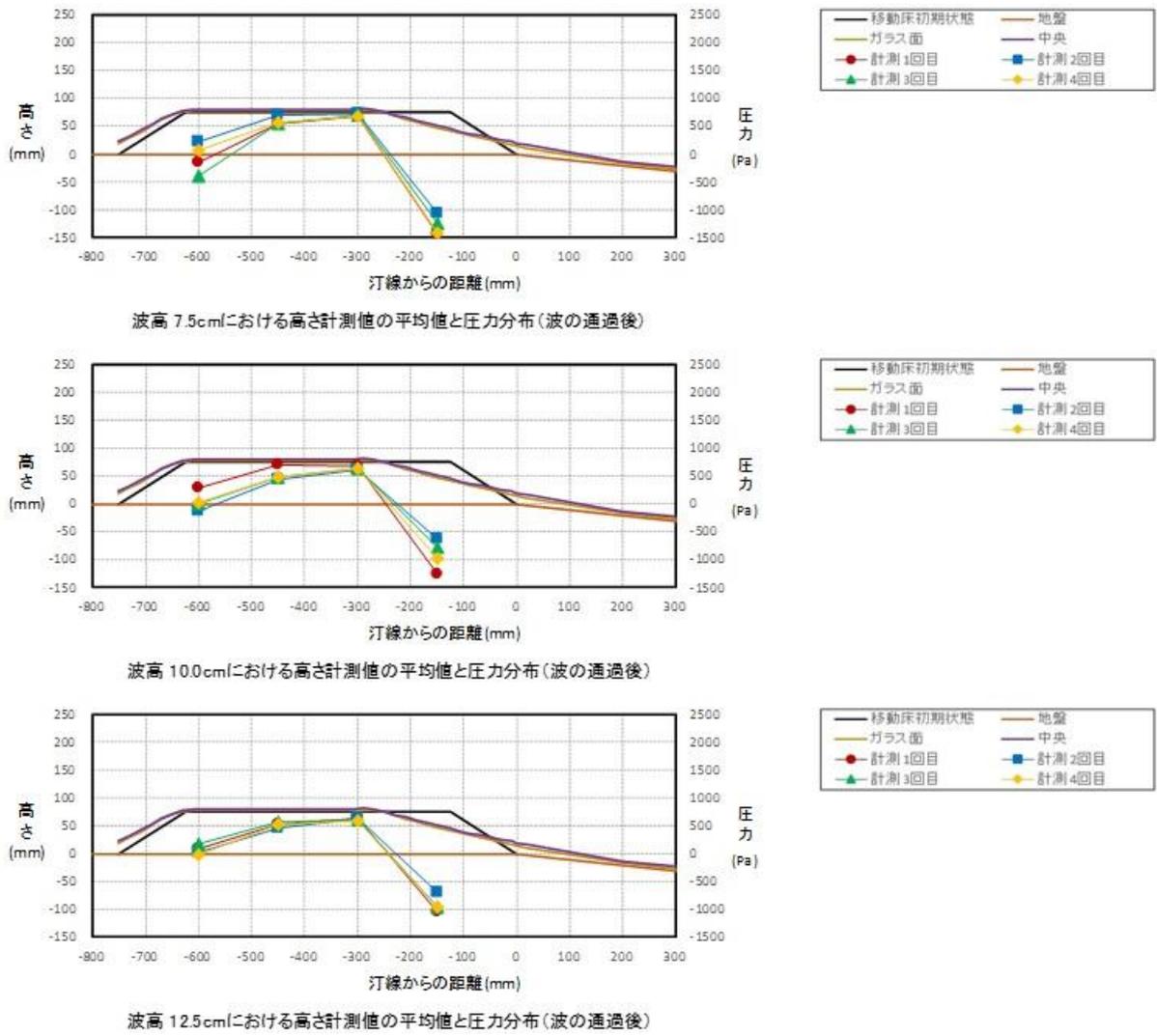


図 4-2-6 砂丘底面に作用する圧力分布【波通過後】
(防潮堤位置 1 ; 汀線-75.0cm)

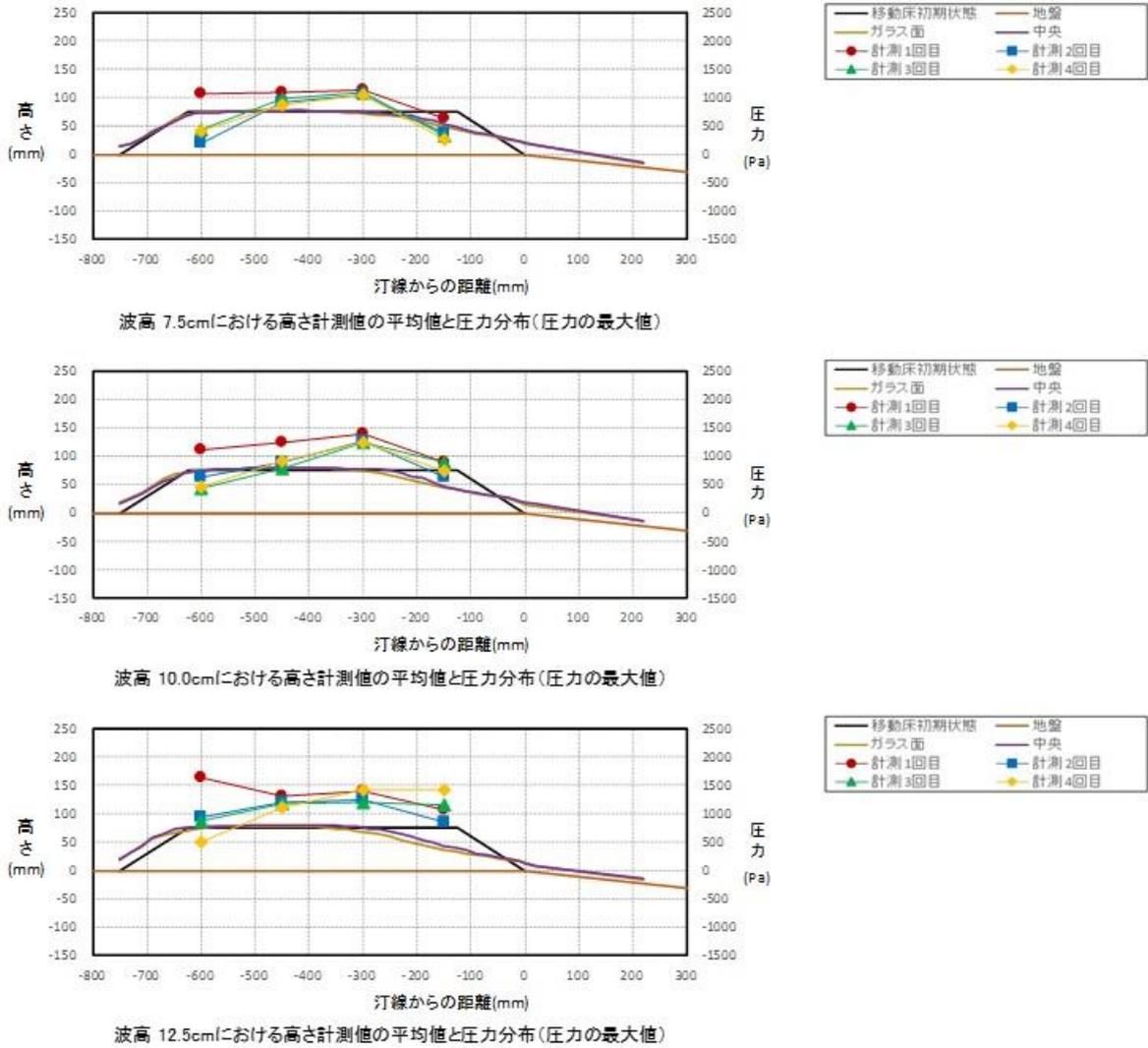
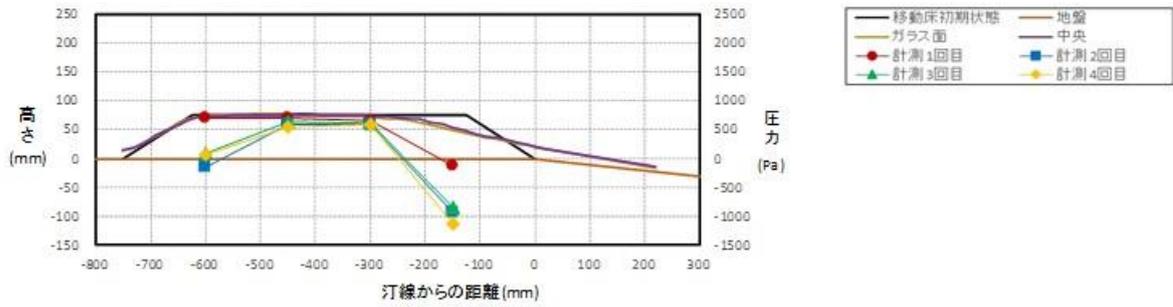
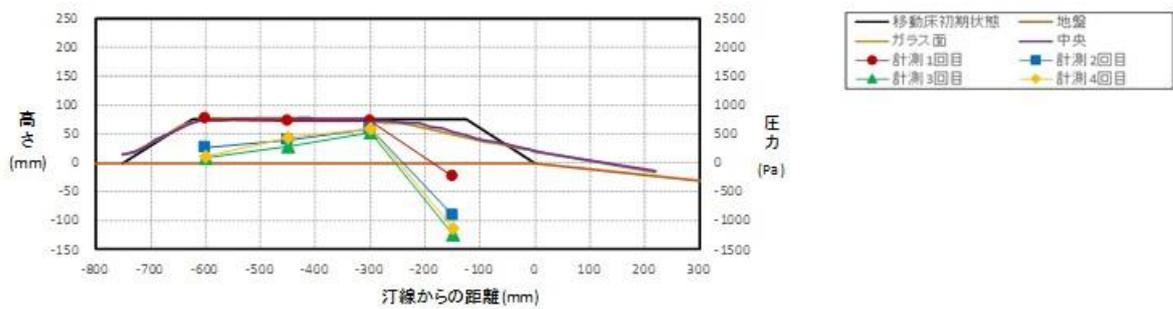


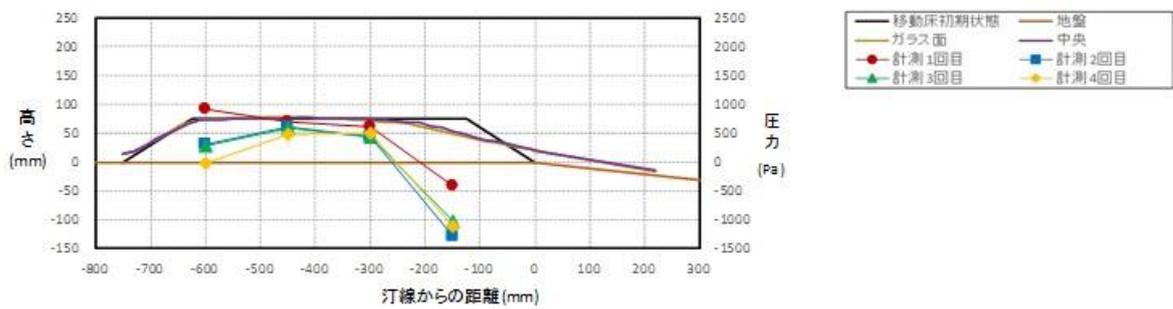
図 4-2-7 砂丘底面に作用する圧力分布【最大値】
(防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)



波高 7.5cmにおける高さ計測値の平均値と圧力分布(波の通過後)

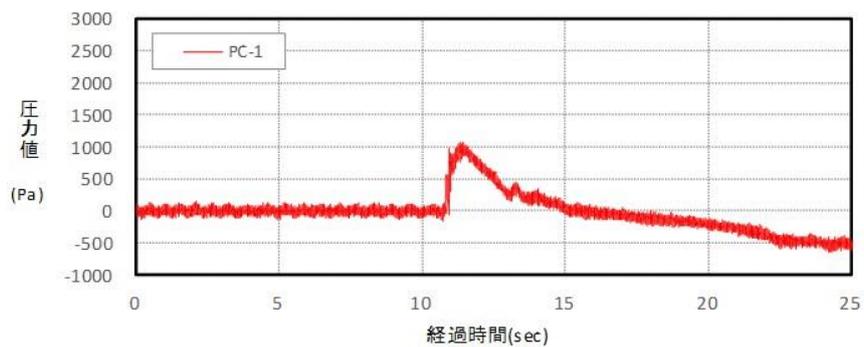


波高 10.0cmにおける高さ計測値の平均値と圧力分布(波の通過後)

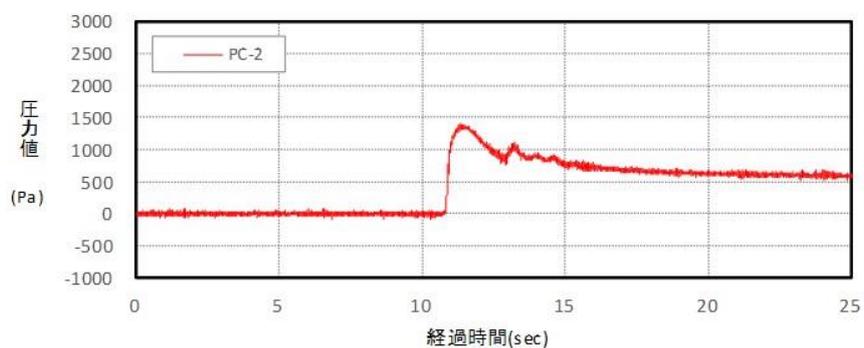


波高 12.5cmにおける高さ計測値の平均値と圧力分布(波の通過後)

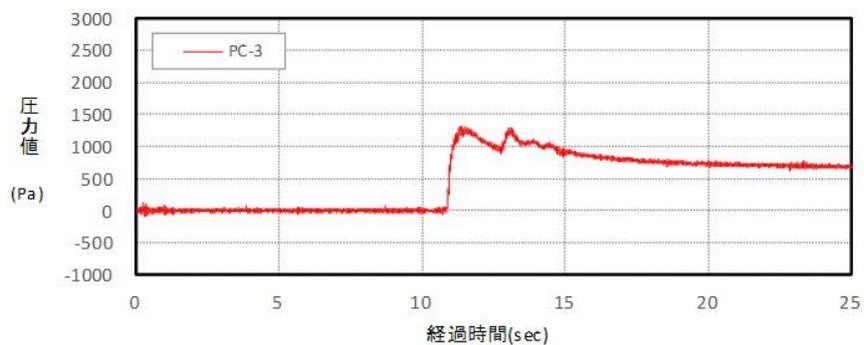
図 4-2-8 砂丘底面に作用する圧力分布【波通過後】
(防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)



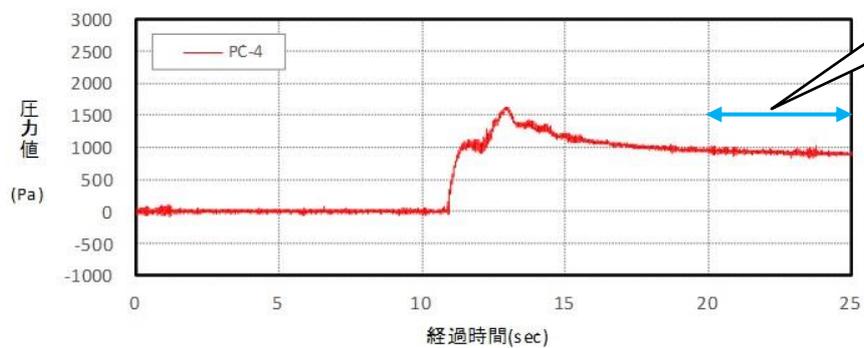
PC-1における圧力データ(H=12.5cm: 1回目)



PC-2における圧力データ(H=12.5cm: 1回目)



PC-3における圧力データ(H=12.5cm: 1回目)



【波通過後】
20～25sの
平均圧力

PC-4における圧力データ(H=12.5cm: 1回目)

図 4-2-9 砂丘底面に作用する圧力時系列データの一例
(防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm, 沖波波高 H=12.5cm)

(3) 防波堤に作用する波圧

図 4-2-10～4-2-11 に防潮堤に作用する波圧分布（4 回試行の平均）を，図 4-2-12～4-2-17 に各測点の作用波圧の時系列データの代表例（4 回試行のうち 1 データ）を示す．また各ケースの移動床側の測線（PB）での圧力データについて，波高の違いによる波圧分布の比較を図 4-2-18 に示す．

図 4-2-10～4-2-11 では固定床側の測線（PA）と移動床側の測線（PB）の値を比較する形で示しているが，固定床と移動床で比較的類似した波圧分布となっており，顕著な違いは見られない．また図 4-2-18 から，波高の違いおよび防潮堤の位置の違いによる波圧分布の変化度合いも，固定床と移動床で傾向はほぼ変わらない．このことは前述したように，砂丘材料が（固定床→移動床）に変わったことによって，津波変形の状況に顕著な変化は見られず，砂丘が侵食される（変形する）度合いもごく僅かな部分に限定されることに関係している．

これらの結果より，防潮堤に作用する砂丘の影響を評価する場合，砂丘を固定床で再現するか移動床で再現するかによる違いはあまりなく，今回の試験条件においては，砂丘を実質的には固定床条件で評価しても問題ない，と推察される．

(4) 実験結果の考察

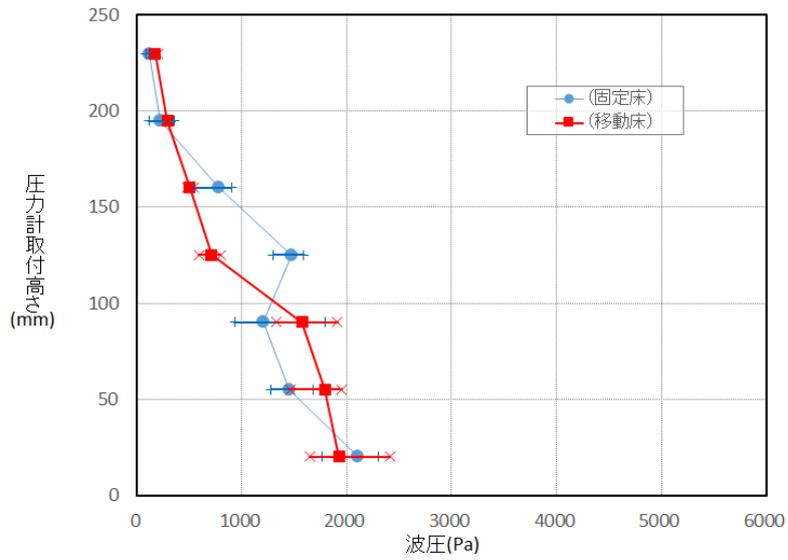
① 砂移動が防潮堤に与える影響

近年，大量の海底砂が巻き上がり津波の比重が重くなると，津波荷重は海水のみの場合に比べて増加すると考えられている．本実験においては，固定床のケースがやや波圧が大きくなり，陸上の砂丘を巻きこむ程度では，海水密度には変化が生じないものと推測できる．

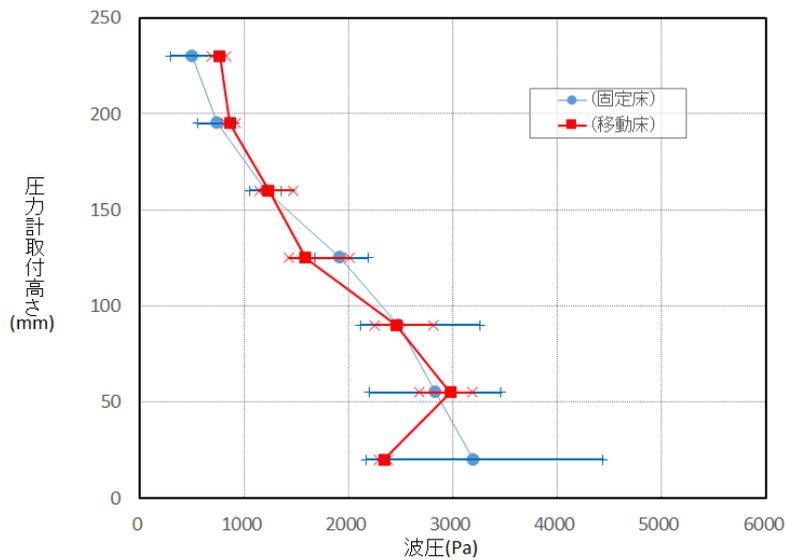
それに対して，砂丘面の摩擦（粗度）が固定床の方が小さく滑らかであることによって，津波が抵抗を受けることなくスムーズに飛び越えてくることができると思われる．移動床の場合は砂面によって摩擦が働き，津波波圧はやや小さくなったものと考えることができる．

② 縮尺の影響

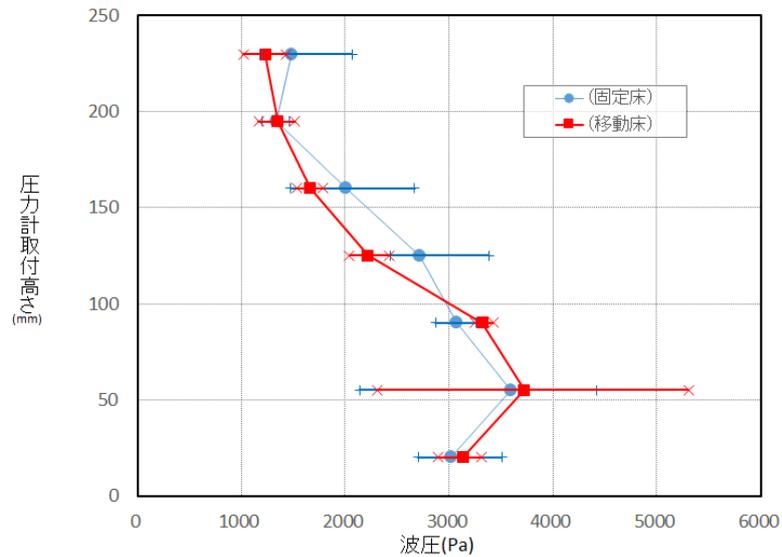
模型実験では 0.2mm 径の細砂を用いている．現地における砂よりもやや粒径は細かいものの，模型縮尺と同一で小さくしていない．従って実験結果は定性的に正しいものとなっているが，砂丘の変形に関しては，やや小さめの値となっている可能性がある．



波高 7.5cmにおける防潮堤の波圧分布(4回試行のばらつき範囲)

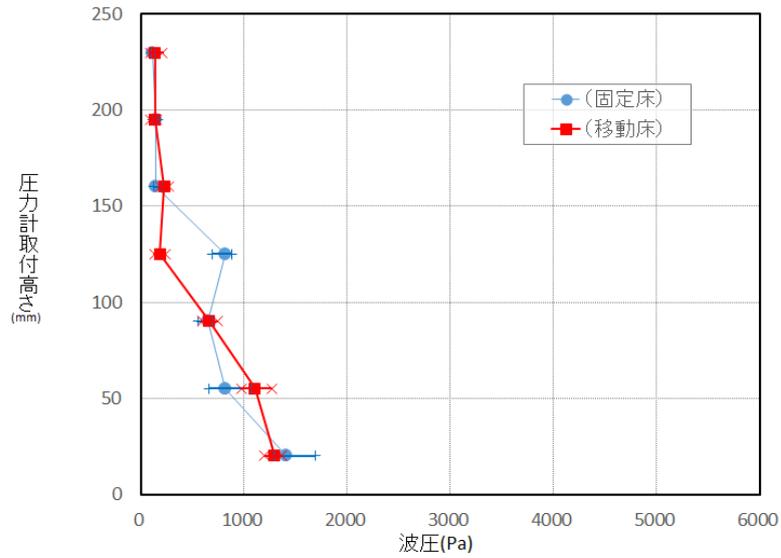


波高 10.0cmにおける防潮堤の波圧分布(4回試行のばらつき範囲)

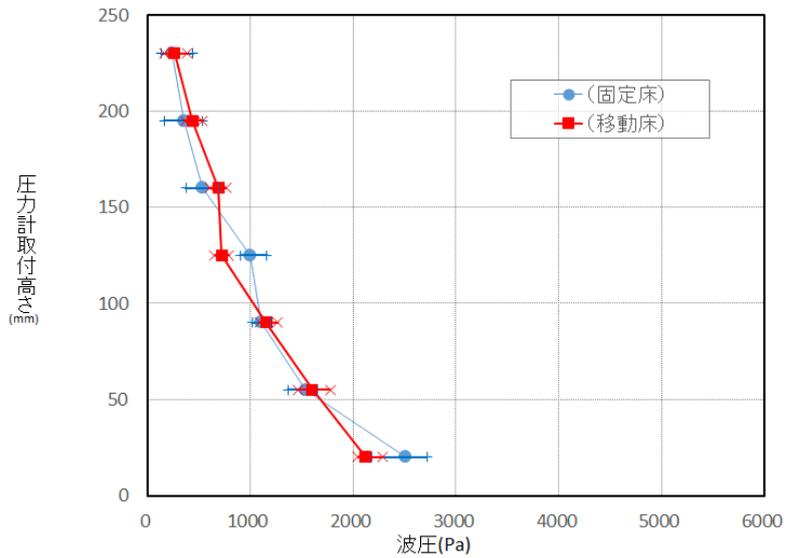


波高 12.5cmにおける防潮堤の波圧分布(4回試行のばらつき範囲)

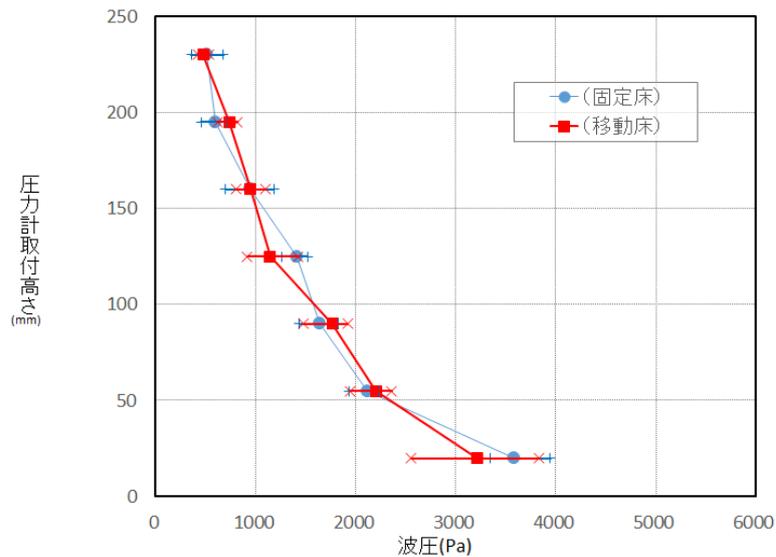
図 4-2-10(1) 防潮堤に作用する波圧 (防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)



波高 7.5cmにおける防潮堤の波圧分布 (4回試行のばらつき範囲)

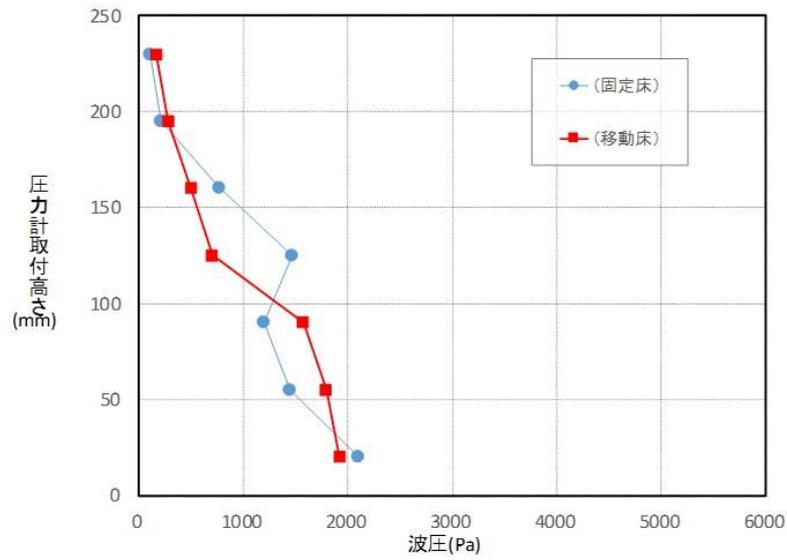


波高 10.0cmにおける防潮堤の波圧分布 (4回試行のばらつき範囲)

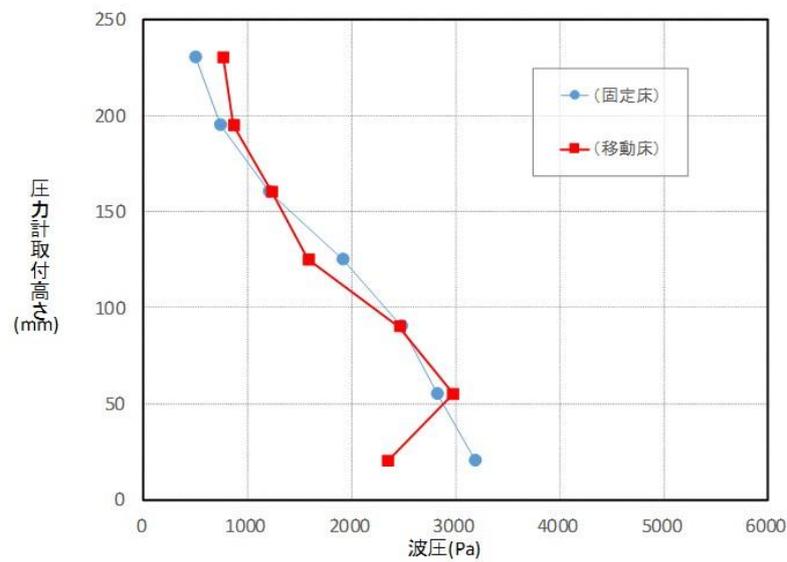


波高 12.5cmにおける防潮堤の波圧分布 (4回試行のばらつき範囲)

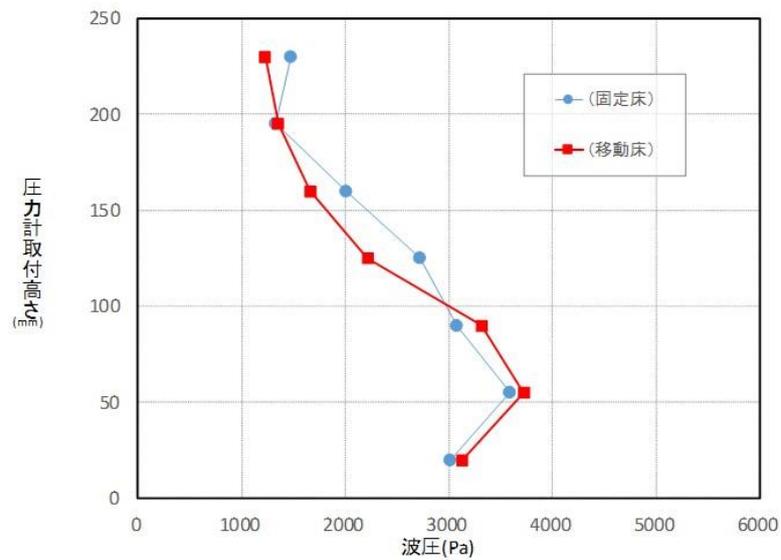
図 4-2-10(2) 防潮堤に作用する波圧 (防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)



波高 7.5cmにおける防潮堤の波圧分布 (4回試行の平均)

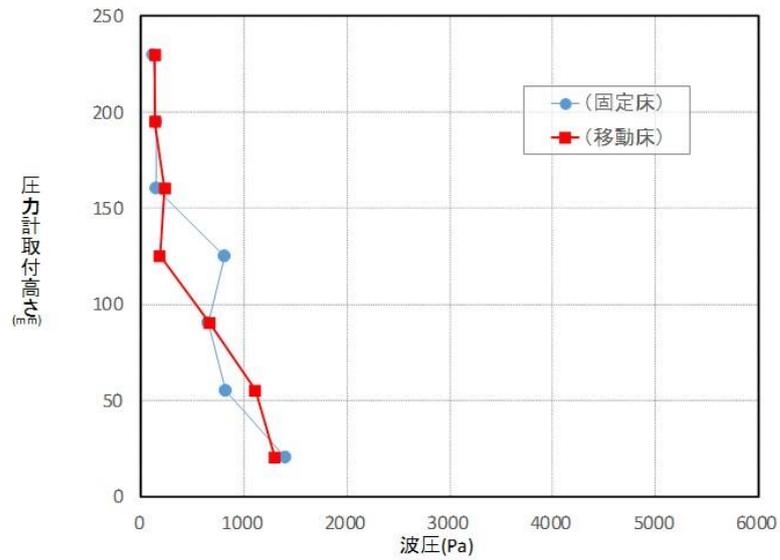


波高 10.0cmにおける防潮堤の波圧分布 (4回試行の平均)

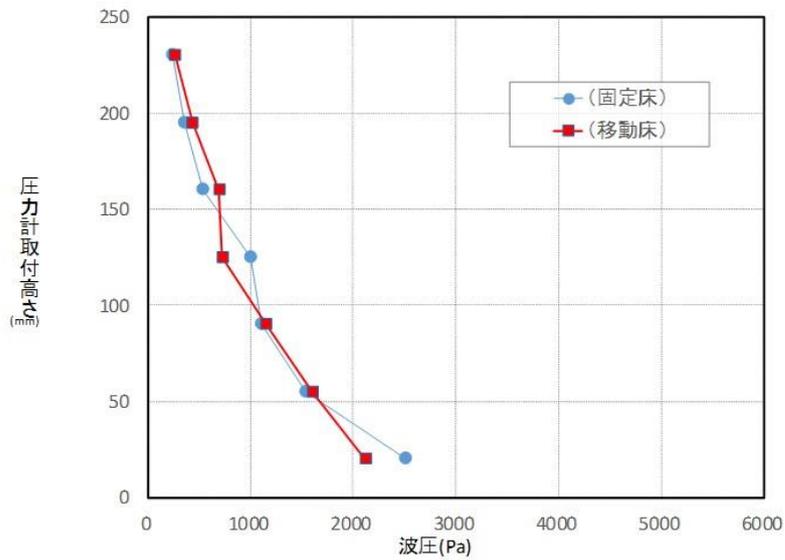


波高 12.5cmにおける防潮堤の波圧分布 (4回試行の平均)

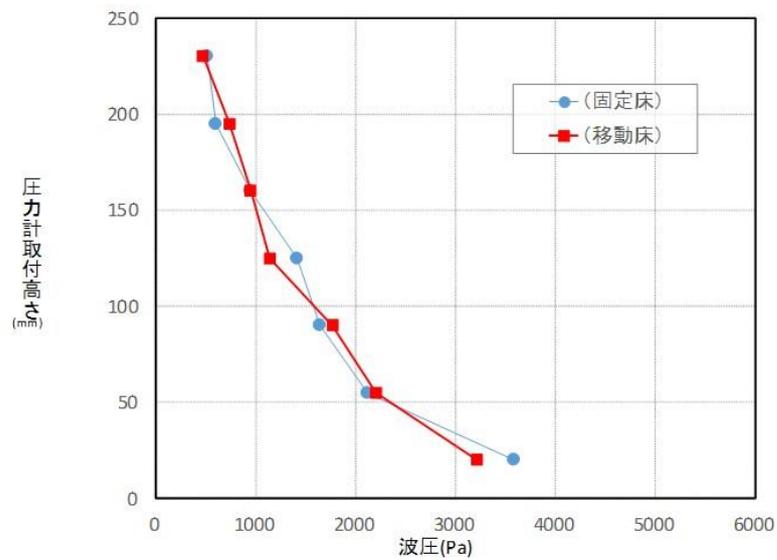
図 4-2-11(1) 防潮堤に作用する波圧【平均値】(防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)



波高 7.5cmにおける防潮堤の波圧分布(4回試行の平均)



波高 10.0cmにおける防潮堤の波圧分布(4回試行の平均)



波高 12.5cmにおける防潮堤の波圧分布(4回試行の平均)

図 4-2-11(2) 防潮堤に作用する波圧【平均値】(防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)

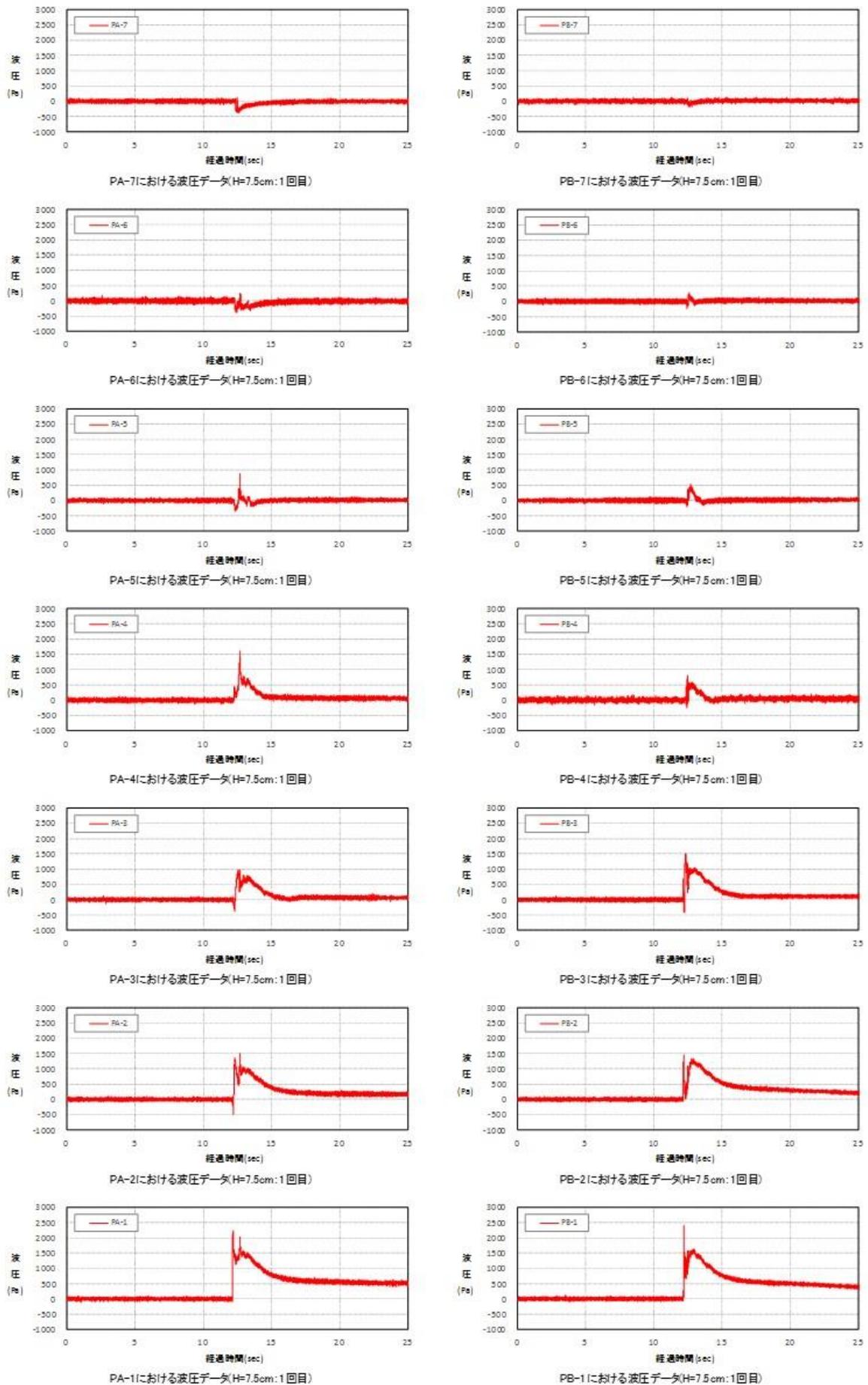


図 4-2-12 波圧時系列データ (H=7.5cm, 防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)

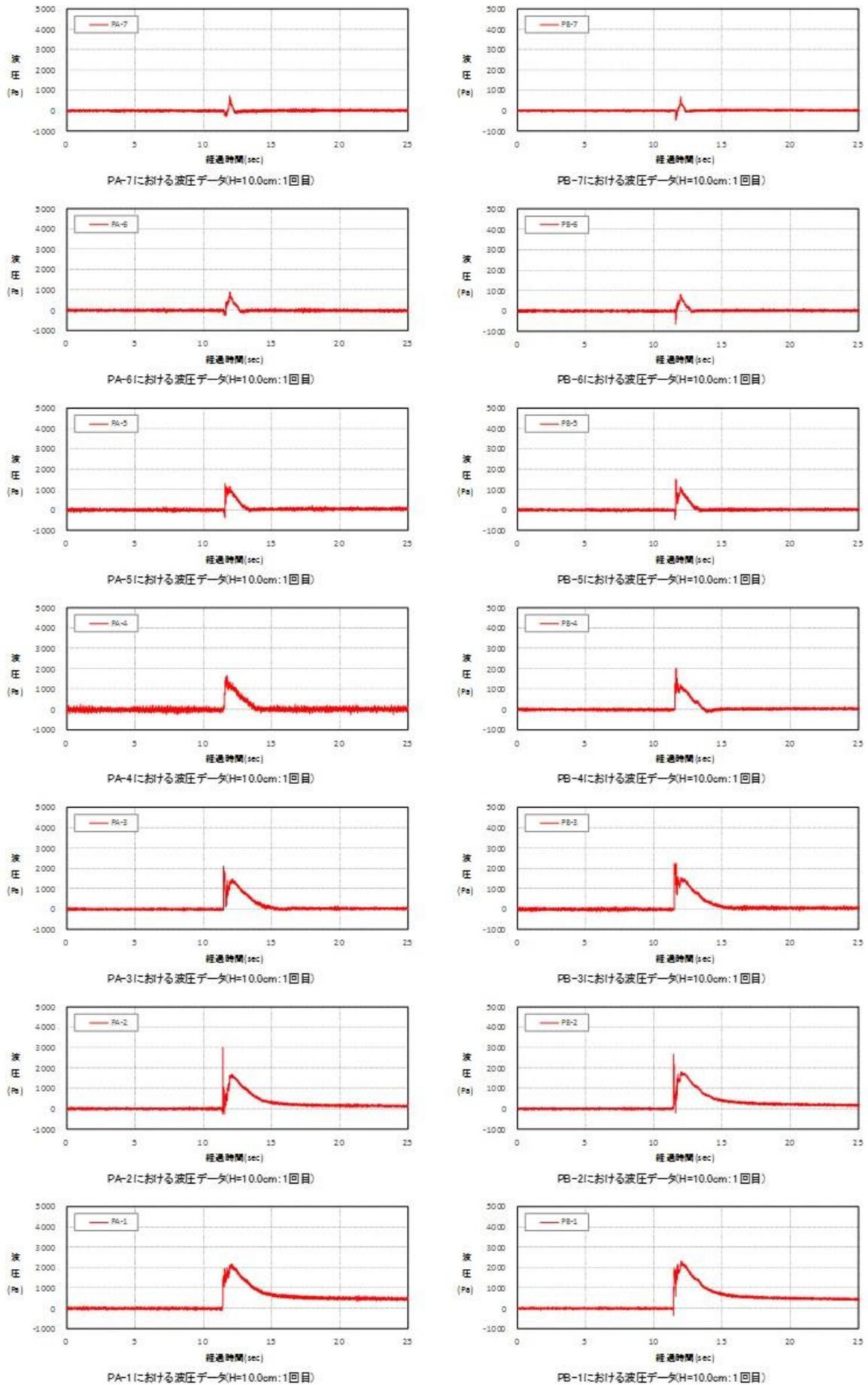


図 4-2-13 波圧時系列データ ($H=10.0\text{cm}$, 防潮堤位置 1; 汀線-75cm)

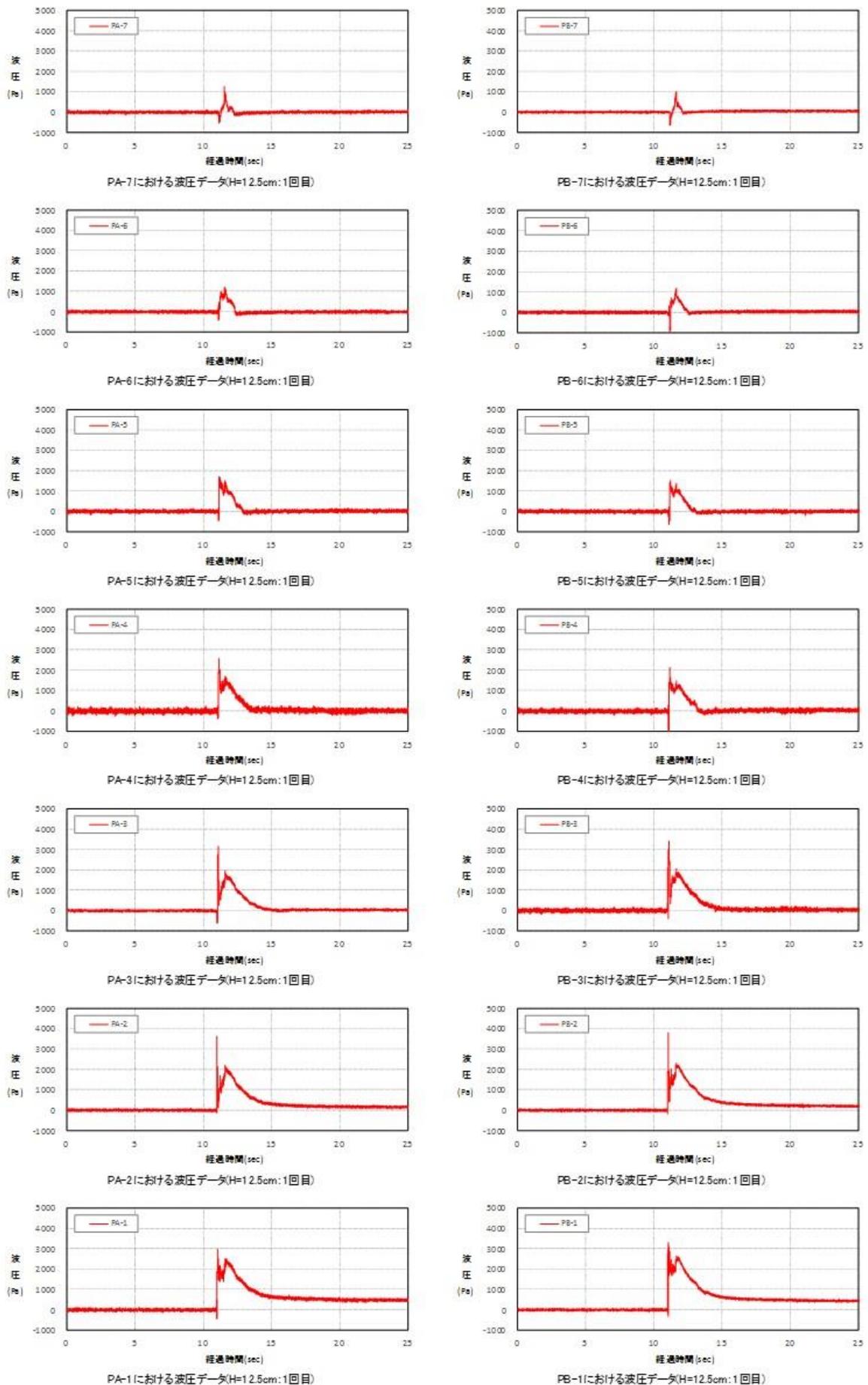


図 4-2-14 波圧時系列データ (H=12.5cm, 防潮堤位置 1; 汀線-75cm)

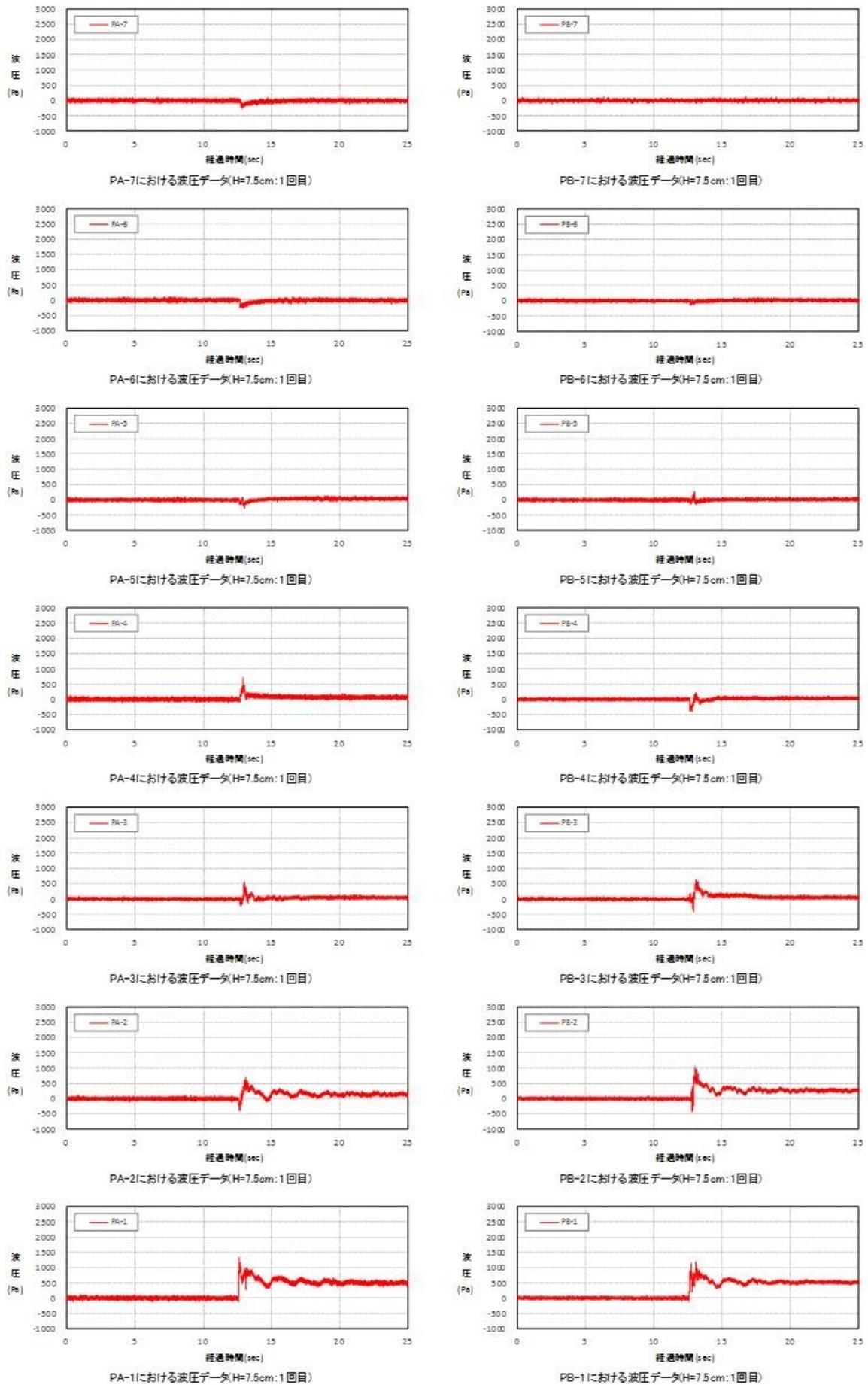
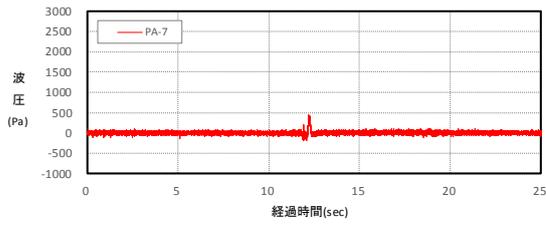
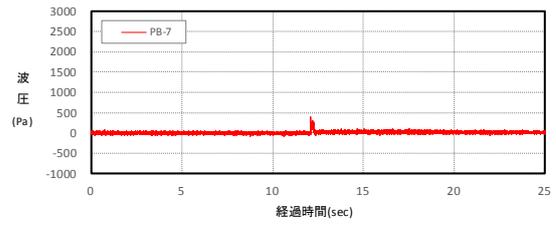


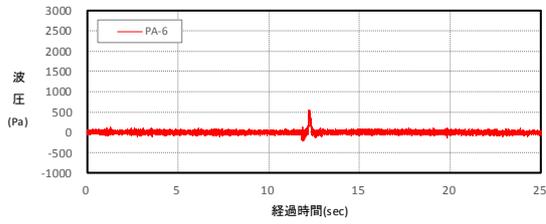
図 4-2-15 波圧時系列データ (H=7.5cm, 防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)



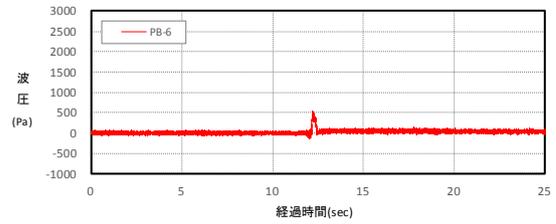
PA-7における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



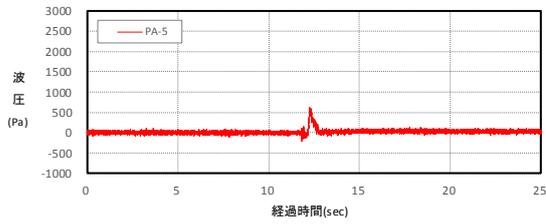
PB-7における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



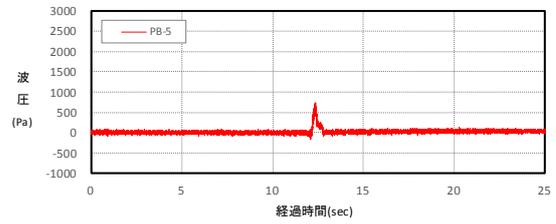
PA-6における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



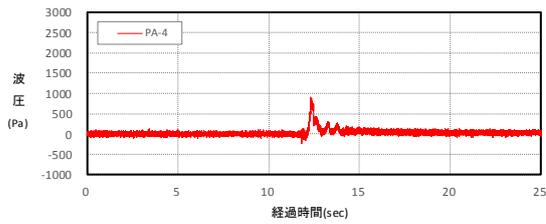
PB-6における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



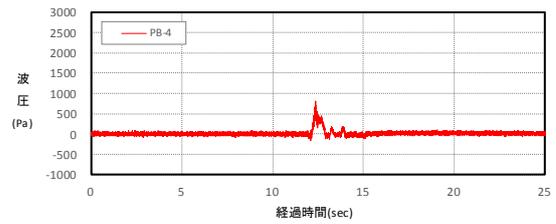
PA-5における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



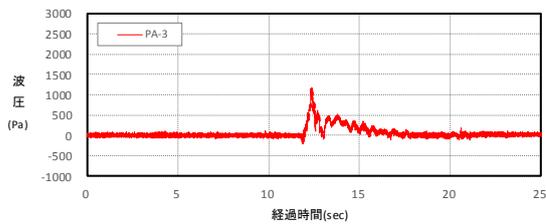
PB-5における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



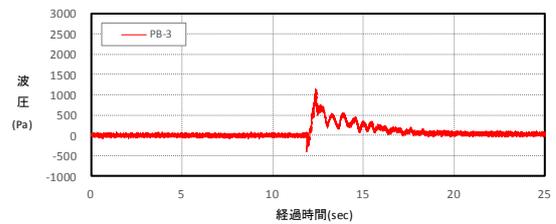
PA-4における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



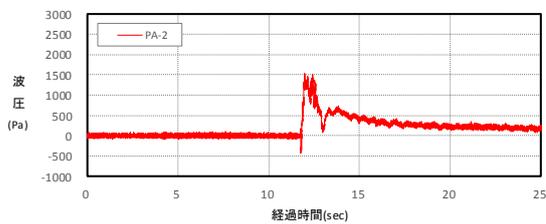
PB-4における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



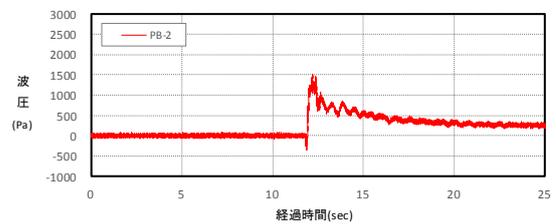
PA-3における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



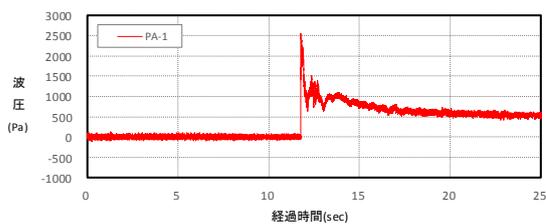
PB-3における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



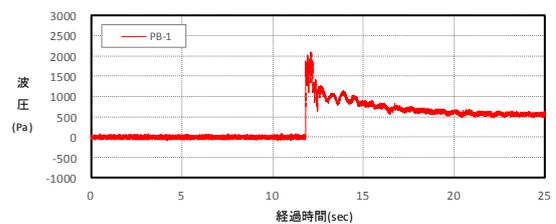
PA-2における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



PB-2における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



PA-1における波圧データ(H=10.0cm:1回目)



PB-1における波圧データ(H=10.0cm:1回目)

図 4-2-16 波圧時系列データ (H=10.0cm, 防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)

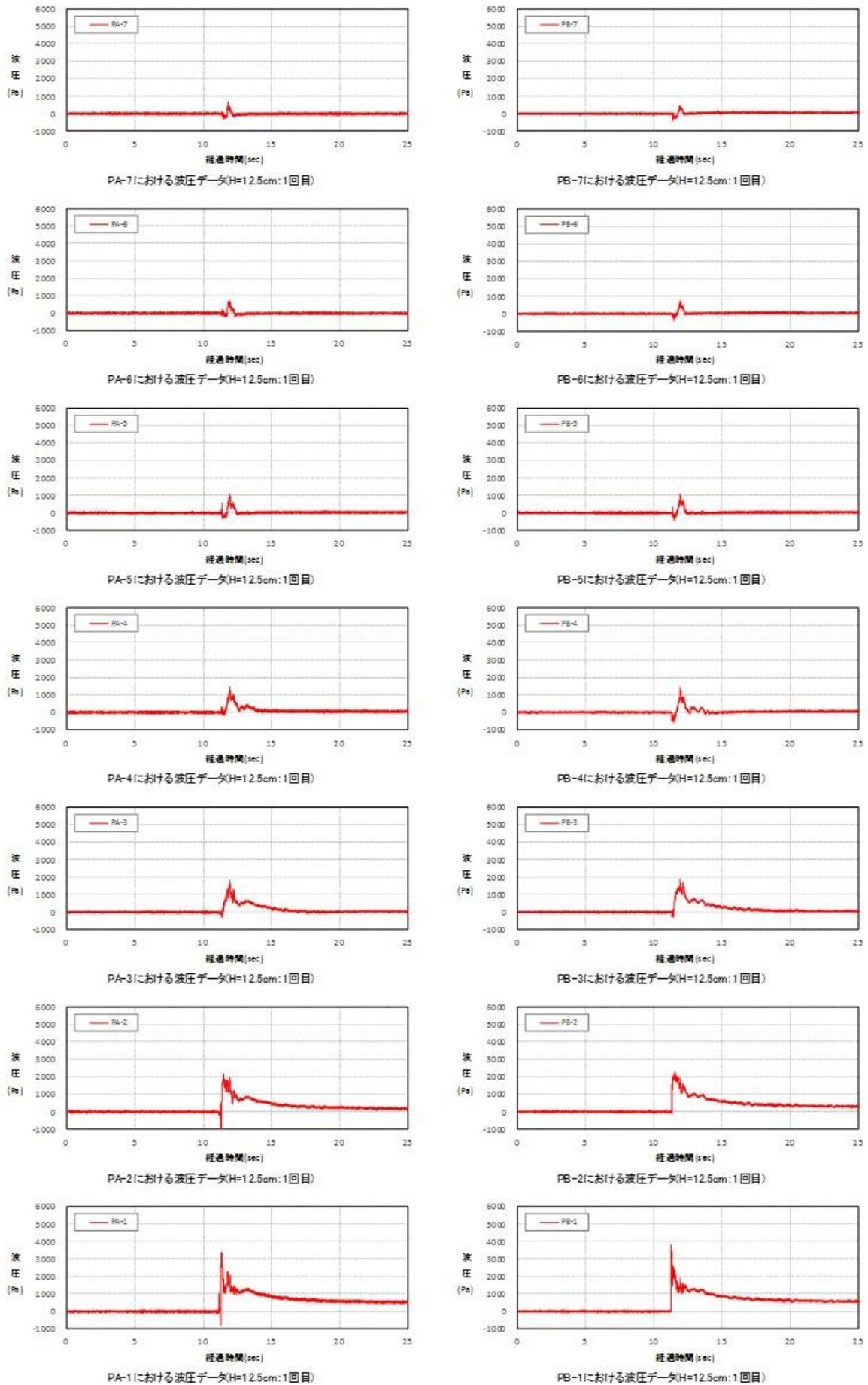
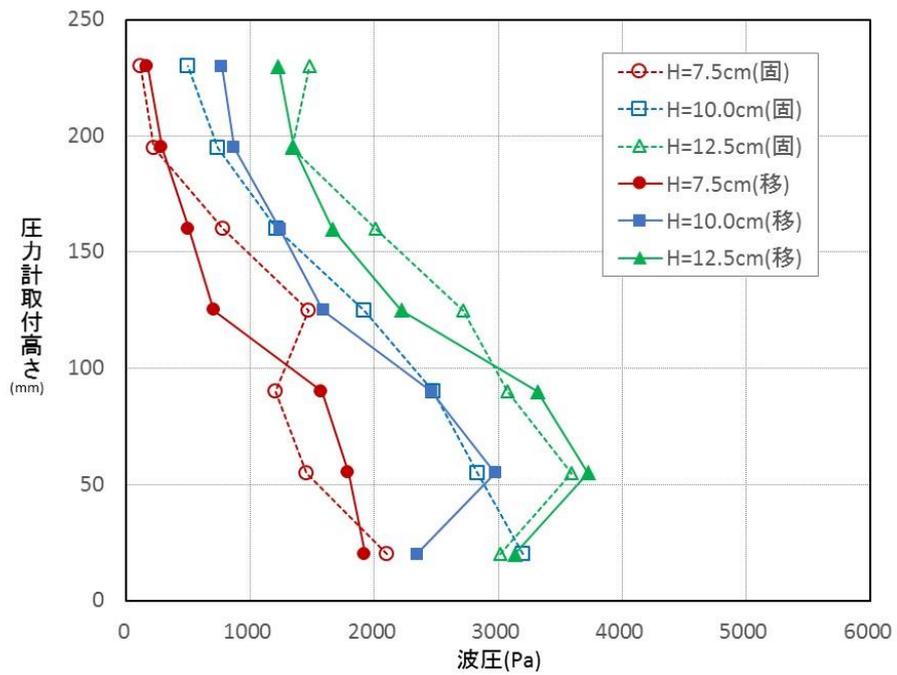
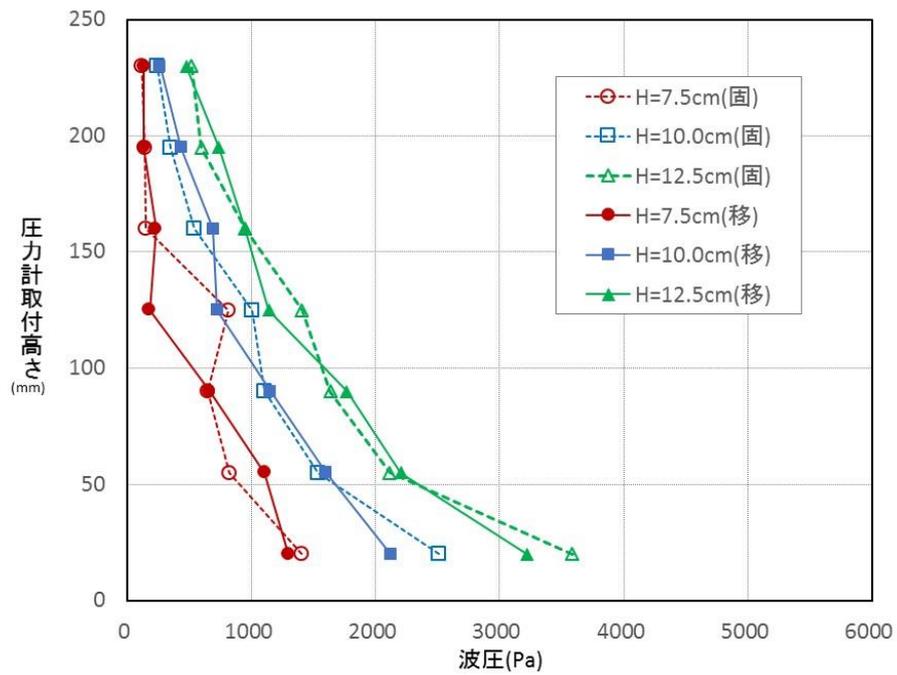


図 4-2-17 波圧時系列データ (H=12.5cm, 防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)



(防潮堤位置 1 ; 汀線-75cm)



(防潮堤位置 2 ; 汀線-137.5cm)

図 4-2-18 波高による波圧分布比較

第 5 章 結果のまとめ

【固定床試験】

防潮堤前面に砂丘地形がある場合の影響について、砂丘地形が固定床の場合での影響について確認を行った結果、以下のことが分かった。

- ・防潮堤に作用する波圧分布の傾向は、砂丘からの距離がある防潮堤位置 2（汀線-137.5cm）の方が防潮堤位置 1（汀線-75cm）よりも総じて小さくなり、砂丘～防潮堤の水平区間で流下に伴う損失が生じている状況が伺える。
- ・防潮堤位置 1（汀線-75cm）では砂丘上の砕波状態によって最大波圧位置が変化するが、防潮堤位置 2（汀線-137.5cm）では砕波の如何に関わらず、防潮堤の堤脚部が最大波圧位置となる。

【移動床試験】

防潮堤前面に砂丘地形がある場合の影響について、砂丘地形が移動床の場合での影響について確認を行った結果を以下に示す。

- ・津波が通過する際、および防潮堤で反射されて引き波となる際のいずれにおいても、砂丘材料が（固定床→移動床）に変わったことによって、津波変形の状況に顕著な変化は見られない。
- ・砂丘の侵食（変形）は主に引き波時の戻り流れ（掃流力）により砂丘先端部分で発生し、津波が通過する際には表層のごく僅かな部分が移動する程度である。
- ・砂丘底面の作用圧力は、概ね砂丘を通過する際の波の自由水面高に相当し、流れの剥離が生じる砂丘地形の先端ではそれより下がる傾向にある。波通過後は、概ね砂丘地形内に残存する浸透水面を示す。これらの結果から、砂丘の侵食を誘発するような圧力の発生は見られなかった。
- ・防潮堤に作用する波圧分布の傾向は、固定床と移動床で顕著な違いは見られない。このことは上述したように、砂丘材料が（固定床→移動床）に変わったことによって、津波変形の状況に顕著な変化は見られず、砂丘が侵食される（変形する）度合いもごく僅かな部分に限定されることに関係している。

これらの結果より、防潮堤に作用する砂丘の影響を評価する場合、砂丘を固定床で再現するか移動床で再現するかによる違いはあまりなく、今回の試験条件においては、実質的には固定床条件で評価しても問題ない、と推察される。

【実験結果に関する考察】

①砂移動が防潮堤に与える影響

近年、大量の海底砂が巻き上がり津波の比重が重くなると、津波荷重は海水のみの場合に比べて増加すると考えられている。本実験においては、固定床のケースがやや波圧が大きくなり、陸上の砂丘を巻きこむ程度では、海水密度には変化が生じないものと推測できる。

それに対して、砂丘面の摩擦（粗度）が固定床の方が小さく滑らかであることによって、津波が抵抗を受けることなくスムーズに飛び越えてくることができると思われる。移動床の場合は砂面によって摩擦が働き、津波波圧はやや小さくなったものと考えることができる。

②縮尺の影響

模型実験では0.2mm径の細砂を用いている。現地における砂よりもやや粒径は細かいものの、模型縮尺と同一で小さくしていない(模型上再現できる限界)。従って実験結果は定性的に正しいものとなっているが、砂丘の変形に関しては、やや小さめの値となっている可能性がある。

※有識者へのヒアリング

模型実験の概要については、京都大学名誉教授間瀬肇博士にご臨席を賜り、砂移動が防波堤に与える影響等についてご指導を賜った。

参考資料

- 1) 各実験計測のバックデータ
- 2) 移動床模型に用いた移動床材料諸元（粒度，間隙率他）
- 3) 実験立会い状況（H30.12.21）

1) 各実験計測のバックデータ

【固定床実験】

・防潮堤に作用する波圧

◇防潮堤：直背後

◇固定床

◇孤立波

・水深：0.8m

◇サンプリング

・データ個数：30,000個

・サンプリング間隔：1msec(1,000Hz)

・サンプリング時間：30sec

☆PA-1 ～ PA-7 の波圧分布 (移動平均データ) 移動平均データ

機器名	PA-1	PA-2	PA-3	PA-4	PA-5	PA-6	PA-7
Unit	(Pa)						
水路底からの距離(mm)	20	55	90	125	160	195	230
H=7.5cm	2014.50	1420.51	1409.34	889.81	513.42	298.59	152.72
H=10.0cm	2537.46	2516.78	1801.28	2215.02	1356.04	993.08	935.89
H=12.5cm	2634.58	3462.72	3109.84	2231.80	1833.02	1428.85	1368.27
H=15.0cm	3534.40	3378.51	4357.78	3066.78	2169.51	2109.34	1859.57

☆PB-1 ～ PB-7 の波圧分布 (移動平均データ)

機器名	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4	PB-5	PB-6	PB-7
Unit	(Pa)						
水路底からの距離(mm)	20	55	90	125	160	195	230
H=7.5cm	2082.66	1438.55	1549.36	1339.37	710.55	162.67	145.61
H=10.0cm	3091.25	2900.61	1993.32	1998.04	1482.06	928.82	806.62
H=12.5cm	3750.94	4508.67	3075.43	2749.66	2184.67	1461.33	1220.57
H=15.0cm	4224.84	2932.22	4756.34	3704.55	2423.04	2041.38	2245.90

☆PA・PBの平均

機器名	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4	PB-5	PB-6	PB-7
Unit	(Pa)						
水路底からの距離(mm)	20	55	90	125	160	195	230
H=7.5cm	2048.58	1429.53	1479.35	1114.59	611.98	230.63	149.17
H=10.0cm	2814.35	2708.69	1897.30	2106.53	1419.05	960.95	871.25
H=12.5cm	3192.76	3985.69	3092.63	2490.73	2008.84	1445.09	1294.42
H=15.0cm	3879.62	3155.36	4557.06	3385.66	2296.27	2075.36	2052.74

◇防潮堤: 直背後+62.5cm

◇固定床

◇孤立波

・水深: 0.8m

◇サンプリング

・データ個数: 30,000個

・サンプリング間隔: 1msec(1,000Hz)

・サンプリング時間: 30sec

☆PA-1 ~ PA-7 の波圧分布 移動平均データ

機器名	PA-1	PA-2	PA-3	PA-4	PA-5	PA-6	PA-7
Unit	(Pa)						
水路底からの距離(mm)	20	55	90	125	160	195	230
H=7.5cm	1404.98	1434.09	606.97	394.72	373.37	257.07	165.02
H=10.0cm	2128.66	1915.98	1615.57	1296.75	981.47	755.35	388.07
H=12.5cm	2938.46	2146.39	1768.69	1170.76	1071.83	941.49	828.61
H=15.0cm	4002.84	3217.20	2106.48	1590.23	1441.14	1221.87	863.85

☆PB-1 ~ PB-7 の波圧分布

機器名	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4	PB-5	PB-6	PB-7
Unit	(Pa)						
水路底からの距離(mm)	20	55	90	125	160	195	230
H=7.5cm	1529.12	930.99	561.52	498.34	272.20	91.39	83.09
H=10.0cm	2520.59	1806.38	1367.42	1074.12	960.56	486.80	629.08
H=12.5cm	3331.84	2139.28	1810.50	1284.52	1468.37	884.39	800.69
H=15.0cm	4088.59	2980.76	2209.05	1511.61	1512.50	1197.24	778.28

☆PA・PBの平均

機器名	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4	PB-5	PB-6	PB-7
Unit	(Pa)						
水路底からの距離(mm)	20	55	90	125	160	195	230
H=7.5cm	1467.05	1182.54	584.25	446.53	322.79	174.23	124.05
H=10.0cm	2324.63	1861.18	1491.49	1185.43	971.01	621.07	508.57
H=12.5cm	3135.15	2142.83	1789.60	1227.64	1270.10	912.94	814.65
H=15.0cm	4045.71	3098.98	2157.76	1550.92	1476.82	1209.56	821.07

◇防漏堤：面背後+2.50m
 ◇移動床+固定床設置
 ◇独立波
 ・水深：0.8m

入射波高 実験回数 計測標 電圧ファール名	H=7.5cm (表中の単位はmm)					H=10.0cm (表中の単位はmm)					H=12.5cm (表中の単位はmm)										
	1回目	2回目	3回目	4回目	平均値	1回目	2回目	3回目	4回目	平均値	1回目	2回目	3回目	4回目	平均値						
	ガラス W2018122001	中央 W2018122002	ガラス W2018122003	中央 W2018122004	ガラス面 中央	ガラス W2018121901	中央 W2018121902	ガラス W2018121903	中央 W2018121904	ガラス面 中央	ガラス W2018121801	中央 W2018121802	ガラス W2018121803	中央 W2018121804	ガラス面 中央						
-150mm	13	13	15	14	13	14	16	14	14	17	16	19	19	18	23	20	19				
-170mm	18	18	18	22	19	18	22	20	19	20	23	25	29	27	25	34	32	32			
-170mm	27	24	34	31	27	26	31	30	30	28	34	35	36	33	44	45	42				
-490mm	33	33	45	51	36	35	38	42	38	40	45	48	46	45	64	64	57				
-670mm	45	43	57	58	51	46	46	49	50	49	55	58	58	60	74	75	62	55			
-650mm	57	55	65	65	67	57	59	56	62	58	66	66	68	72	84	84	69	75			
-630mm	66	63	70	73	69	67	66	66	68	67	79	76	75	72	76	76	84	76			
-610mm	72	71	73	73	74	73	70	72	72	72	80	79	77	74	74	74	84	76			
-590mm	75	72	74	73	75	73	75	75	75	73	80	79	77	74	78	82	85	76	77		
-570mm	75	73	74	73	75	74	76	75	75	74	80	80	77	78	75	78	82	85	77	77	
-550mm	77	74	75	74	75	75	77	76	76	75	81	81	79	77	76	79	81	83	78	78	
-530mm	77	76	76	74	75	75	75	77	76	76	80	81	79	77	76	79	80	83	78	79	
-510mm	78	76	76	74	76	75	78	76	77	75	81	81	80	77	78	79	80	79	83	78	79
-490mm	78	76	76	75	76	75	76	75	76	77	81	80	80	77	78	79	80	80	82	78	80
-470mm	78	76	76	76	76	76	75	78	77	77	82	81	79	77	78	78	80	80	82	78	80
-450mm	77	76	76	76	77	75	78	77	77	76	82	82	79	77	78	79	80	79	82	78	80
-430mm	77	77	75	77	78	76	76	77	77	77	82	82	79	78	79	79	79	79	82	78	80
-410mm	77	77	75	77	77	76	76	78	77	77	82	81	79	78	79	79	79	79	81	78	79
-390mm	75	77	75	75	77	75	77	78	76	76	82	80	80	78	78	78	79	80	77	79	79
-370mm	74	77	74	75	77	75	74	78	75	76	82	80	80	78	74	78	79	79	80	76	80
-350mm	74	77	74	75	76	75	75	73	78	74	80	80	80	78	74	78	79	79	80	74	80
-330mm	74	76	74	75	76	75	70	77	74	76	80	80	80	78	73	78	79	79	80	74	80
-310mm	74	75	73	74	76	75	66	76	72	75	80	80	80	78	72	72	78	79	70	77	77
-290mm	73	74	73	73	74	74	64	75	71	74	79	81	77	78	67	66	66	69	78	66	74
-270mm	71	73	69	74	73	73	63	74	69	74	78	81	75	78	63	67	67	68	78	64	73
-250mm	71	72	69	73	73	70	60	72	68	72	71	79	70	75	59	73	64	70	66	74	74
-230mm	68	70	67	73	69	66	58	70	66	70	65	79	67	71	55	69	61	66	62	71	71
-210mm	64	72	58	68	69	62	54	69	61	68	59	72	62	62	52	63	56	64	57	65	65
-190mm	63	67	53	65	64	58	51	60	58	63	52	70	59	58	47	58	54	60	53	62	62
-170mm	61	63	48	62	61	55	47	57	54	59	50	56	55	53	44	54	48	54	49	54	54
-150mm	57	60	44	52	55	52	44	50	50	54	45	49	49	47	42	37	46	51	46	46	46
-130mm	48	53	40	47	50	47	42	46	45	48	42	48	43	43	38	33	44	46	42	43	43
-110mm	43	45	38	41	46	43	38	40	41	42	40	40	37	38	34	32	40	44	38	39	39
-90mm	38	43	33	35	42	39	34	37	37	39	34	36	34	35	29	28	39	41	34	35	35
-70mm	34	38	29	32	36	35	31	35	33	35	30	31	30	31	27	26	36	39	31	32	32
-50mm	30	34	26	27	34	33	28	32	30	32	27	27	26	29	23	30	36	29	29	29	29
-30mm	27	32	22	23	30	29	26	28	26	28	27	24	23	27	19	22	28	34	24	27	27
-10mm	21	25	22	19	25	25	24	25	23	24	15	20	17	21	14	15	25	29	18	21	21
0mm	17	23	18	17	23	23	18	23	19	22	15	16	14	18	12	13	19	25	15	18	18
20mm	14	16	17	13	14	17	17	18	16	16	10	12	16	19	13	16	19	13	16	16	16
220mm	-17	-15	-16	-15	-15	-15	-16	-15	-16	-15	-12	-14	-14	-15	-14	-14	-14	-14	-14	-14	-14

・砂丘底面に作用する圧力

◇防潮堤：直背後

◇移動床+固定床設置

◇孤立波

・水深：0.8m

◇サンプリング

・データ個数：30,000個

・サンプリング間隔：1msec(1,000Hz)

・サンプリング時間：30sec

☆PC-1 ~ PC-4 の圧力分布

機器名		PC-1	PC-2	PC-3	PC-4
Unit		(Pa)			
水路底からの距離(mm)		-150	-300	-450	-600
H=7.5cm	1回目(移動平均)	144.87	1434.10	1373.41	495.92
H=7.5cm	2回目(移動平均)	228.00	1480.86	1549.68	882.26
H=7.5cm	3回目(移動平均)	145.31	1432.63	1358.50	342.85
H=7.5cm	4回目(移動平均)	154.89	1377.51	1360.59	684.45
H=7.5cm	圧力の最大値(移動平均)	168.27	1431.28	1410.54	601.37
H=10.0cm	1回目(移動平均)	476.41	1828.53	1988.59	1487.06
H=10.0cm	2回目(移動平均)	746.37	1789.37	1739.66	1112.14
H=10.0cm	3回目(移動平均)	643.87	1806.87	1771.70	1177.23
H=10.0cm	4回目(移動平均)	606.51	1779.66	1789.78	1192.68
H=10.0cm	圧力の最大値(移動平均)	618.29	1801.11	1822.43	1242.28
H=12.5cm	1回目(移動平均)	711.37	2050.01	2118.69	1500.71
H=12.5cm	2回目(移動平均)	1072.90	2087.72	2103.46	1538.99
H=12.5cm	3回目(移動平均)	882.38	2062.70	2219.84	1661.34
H=12.5cm	4回目(移動平均)	1176.40	2050.11	2165.90	1447.32
H=12.5cm	圧力の最大値(移動平均)	960.76	2062.64	2151.97	1537.09

☆PC-1 ~ PC-4 の圧力分布

機器名		PC-1	PC-2	PC-3	PC-4
Unit		(Pa)			
水路底からの距離(mm)		-150	-300	-450	-600
H=7.5cm	1回目(移動平均)	-1444.98	671.63	555.02	-153.85
H=7.5cm	2回目(移動平均)	-1060.42	712.89	701.38	222.34
H=7.5cm	3回目(移動平均)	-1246.59	693.79	546.32	-380.08
H=7.5cm	4回目(移動平均)	-1420.98	684.05	559.25	58.67
H=7.5cm	波の通過後(移動平均)	-1293.24	690.59	590.49	-63.23
H=10.0cm	1回目(移動平均)	-1258.44	686.80	698.69	277.62
H=10.0cm	2回目(移動平均)	-621.42	615.03	437.97	-135.33
H=10.0cm	3回目(移動平均)	-778.95	637.38	487.85	6.17
H=10.0cm	4回目(移動平均)	-968.23	621.99	490.11	31.70
H=10.0cm	波の通過後(移動平均)	-906.76	640.30	528.66	45.04
H=12.5cm	1回目(移動平均)	-1043.21	625.20	527.75	88.42
H=12.5cm	2回目(移動平均)	-687.61	622.62	463.22	34.04
H=12.5cm	3回目(移動平均)	-965.83	611.17	576.38	175.87
H=12.5cm	4回目(移動平均)	-946.86	584.28	516.67	-13.40
H=12.5cm	波の通過後(移動平均)	-910.88	610.82	521.00	71.23

◇防潮堤：直背後+62.5cm

◇移動床+固定床設置

◇孤立波

・水深：0.8m

◇サンプリング

・データ個数：30,000個

・サンプリング間隔：1msec(1,000Hz)

・サンプリング時間：30sec

☆PC-1 ~ PC-4 の圧力分布

機器名		PC-1	PC-2	PC-3	PC-4
Unit		(Pa)			
水路底からの距離(mm)		-150	-300	-450	-600
H=7.5cm	1回目(移動平均)	591.52	1118.20	1056.94	1033.29
H=7.5cm	2回目(移動平均)	324.53	1035.49	899.87	167.27
H=7.5cm	3回目(移動平均)	276.08	1062.00	956.01	416.34
H=7.5cm	4回目(移動平均)	205.06	1039.06	862.78	401.72
H=7.5cm	圧力の最大値(移動平均)	349.30	1063.69	943.90	504.65
H=10.0cm	1回目(移動平均)	889.40	1371.78	1224.82	1094.39
H=10.0cm	2回目(移動平均)	584.47	1250.43	876.69	620.55
H=10.0cm	3回目(移動平均)	812.58	1225.47	772.50	411.27
H=10.0cm	4回目(移動平均)	498.84	1245.28	896.97	436.69
H=10.0cm	圧力の最大値(移動平均)	696.32	1273.24	942.75	640.73
H=12.5cm	1回目(移動平均)	1025.00	1386.11	1301.83	1616.90
H=12.5cm	2回目(移動平均)	694.64	1225.89	1182.10	907.87
H=12.5cm	3回目(移動平均)	1000.75	1201.24	1166.28	855.77
H=12.5cm	4回目(移動平均)	1255.87	1401.68	1109.27	489.78
H=12.5cm	圧力の最大値(移動平均)	994.06	1303.73	1189.87	967.58

☆PC-1 ~ PC-4 の圧力分布

機器名		PC-1	PC-2	PC-3	PC-4
Unit		(Pa)			
水路底からの距離(mm)		-150	-300	-450	-600
H=7.5cm	1回目(移動平均)	-130.39	650.05	697.58	703.62
H=7.5cm	2回目(移動平均)	-941.77	598.33	599.27	-155.36
H=7.5cm	3回目(移動平均)	-847.25	609.94	634.26	83.89
H=7.5cm	4回目(移動平均)	-1124.74	581.66	546.86	75.36
H=7.5cm	波の通過後(移動平均)	-761.04	610.00	619.49	176.88
H=10.0cm	1回目(移動平均)	-248.02	711.33	717.24	762.20
H=10.0cm	2回目(移動平均)	-908.29	599.02	403.80	265.08
H=10.0cm	3回目(移動平均)	-1244.80	532.44	294.66	85.61
H=10.0cm	4回目(移動平均)	-1141.06	584.05	429.15	111.56
H=10.0cm	波の通過後(移動平均)	-885.54	606.71	461.21	306.11
H=12.5cm	1回目(移動平均)	-402.11	606.42	700.96	915.98
H=12.5cm	2回目(移動平均)	-1286.15	432.12	606.38	302.17
H=12.5cm	3回目(移動平均)	-1015.97	446.75	598.92	283.54
H=12.5cm	4回目(移動平均)	-1107.96	494.76	483.82	-29.89
H=12.5cm	波の通過後(移動平均)	-953.05	495.01	597.52	367.95

・防潮堤に作用する波圧

- ◇防潮堤：直背後
- ◇移動床+固定床設置
- ◇孤立波
- ・水深：0.8m
- ◇サンプリング
- ・データ個数：30,000個
- ・サンプリング間隔：1msec(1,000Hz)
- ・サンプリング時間：30sec

☆PA-1 ~ PA-7 の波圧分布 (固定床)

機器名	PA-1	PA-2	PA-3	PA-4	PA-5	PA-6	PA-7
水路底からの距離 (mm)	20	55	90	125	160	195	230
H=7.5cm	2225.53	1502.08	985.53	1590.72	881.49	255.53	132.28
H=7.5cm	1758.53	1674.80	1790.65	1297.98	524.40	113.64	87.95
H=7.5cm	2298.31	1354.80	928.73	1471.38	897.47	356.43	119.45
H=7.5cm	2133.62	1275.72	1093.66	1523.65	801.52	150.56	119.39
H=7.5cm	2104.00	1451.85	1199.64	1470.93	776.22	219.04	114.77
H=10.0cm	2173.09	3018.94	2118.71	1678.15	1291.54	905.92	710.78
H=10.0cm	3884.96	2204.24	2391.40	2188.59	1056.24	561.13	336.36
H=10.0cm	2290.83	3462.36	2147.78	1843.62	1358.80	904.39	651.40
H=10.0cm	4438.34	2639.17	3257.85	1963.08	1132.76	590.33	299.34
H=10.0cm	3196.81	2831.17	2478.94	1918.36	1209.83	740.44	499.47
H=12.5cm	2985.78	3643.11	3168.89	2584.93	1710.90	1212.46	1281.68
H=12.5cm	2705.81	4163.37	3004.00	2435.27	1477.24	1201.28	1200.42
H=12.5cm	2869.18	2136.50	3264.83	2479.71	2189.29	1459.19	1367.17
H=12.5cm	3507.93	4423.14	2869.79	3381.94	2664.48	1461.98	2067.70
H=12.5cm	3017.18	3591.56	3076.88	2720.46	2010.48	1333.73	1479.24

☆PB-1 ~ PB-7 の波圧分布 (移動床)

機器名	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4	PB-5	PB-6	PB-7
水路底からの距離 (mm)	20	55	90	125	160	195	230
H=7.5cm	2410.33	1456.84	1514.12	795.95	539.17	280.50	133.17
H=7.5cm	1650.49	1950.55	1910.69	724.81	507.14	275.81	200.75
H=7.5cm	1644.26	1853.03	1550.35	589.30	482.75	297.41	161.53
H=7.5cm	1992.38	1905.65	1322.70	716.69	477.66	292.26	177.07
H=7.5cm	1924.36	1791.52	1574.46	706.69	501.68	286.50	168.13
H=10.0cm	2340.00	2678.68	2255.94	2016.20	1477.20	822.60	687.14
H=10.0cm	2376.49	2947.22	2503.77	1433.28	1145.55	874.05	755.63
H=10.0cm	2296.76	3188.13	2265.49	1470.56	1158.20	854.58	826.14
H=10.0cm	2361.53	3092.50	2811.41	1427.42	1164.94	916.49	802.28
H=10.0cm	2343.69	2976.63	2469.15	1586.87	1236.47	866.93	767.80
H=12.5cm	3317.43	3794.32	3423.43	2147.85	1535.55	1172.98	1021.86
H=12.5cm	2895.21	5308.87	3274.00	2039.46	1576.31	1518.63	1426.80
H=12.5cm	3299.37	2310.05	3254.23	2428.26	1788.14	1452.51	1269.83
H=12.5cm	3019.72	3483.59	3321.38	2255.71	1749.52	1262.04	1191.59
H=12.5cm	3132.93	3724.21	3318.26	2217.82	1662.38	1351.54	1227.52

- ◇防漏堤：直背後+62.5cm
- ◇移動床+固定床設置
- ◇孤立波
- ・水深：0.8m
- ◇サンプリング
- ・データ個数：30,000個
- ・サンプリング間隔：1msec(1,000Hz)
- ・サンプリング時間：30sec

☆PA-1～PA-7の液圧分布 (固定床)

機器名	PA-1	PA-2	PA-3	PA-4	PA-5	PA-6	PA-7
Unit	(Pa)						
木路底からの距離(mm)	20	55	90	125	160	195	230
H=7.5cm	1336.22	684.00	552.57	697.53	130.01	110.04	103.60
H=7.5cm	1306.82	871.68	695.58	862.04	206.73	164.96	110.95
H=7.5cm	1295.81	1074.64	661.66	880.35	138.47	162.97	131.29
H=7.5cm	1688.71	662.21	695.69	819.27	127.15	137.68	111.58
H=7.5cm	1406.64	823.13	661.38	814.80	150.59	143.91	114.35
H=10.0cm	2543.83	1533.07	1167.42	901.74	621.15	537.37	446.19
H=10.0cm	2716.90	1610.96	1197.79	970.59	693.78	510.39	227.89
H=10.0cm	2184.96	1653.52	1039.93	974.66	463.98	199.45	133.13
H=10.0cm	2614.95	1366.07	1018.81	1164.49	377.07	165.72	171.16
H=10.0cm	2515.16	1540.90	1105.99	1002.87	538.99	353.23	244.59
H=12.5cm	3381.13	2163.97	1819.55	1473.06	1112.67	706.32	679.37
H=12.5cm	3940.78	1929.40	1714.79	1256.68	806.17	590.38	358.98
H=12.5cm	3674.99	2126.95	1439.01	1516.08	1180.23	455.50	466.89
H=12.5cm	3342.47	2238.21	1577.75	1392.33	700.69	632.75	562.92
H=12.5cm	3584.84	2114.63	1637.78	1409.54	949.94	596.24	517.04

☆PB-1～PB-7の液圧分布 (移動床)

機器名	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4	PB-5	PB-6	PB-7
Unit	(Pa)						
木路底からの距離(mm)	20	55	90	125	160	195	230
H=7.5cm	1203.09	1038.84	645.69	226.18	267.09	93.87	136.09
H=7.5cm	1306.49	1147.64	676.98	133.14	219.93	151.98	108.76
H=7.5cm	1364.90	978.88	595.83	133.09	187.27	146.37	90.87
H=7.5cm	1316.97	1269.11	742.68	237.94	241.11	149.71	213.45
H=7.5cm	1297.86	1108.62	665.30	182.59	228.85	135.48	137.29
H=10.0cm	2087.57	1506.58	1149.35	793.93	730.06	539.06	385.37
H=10.0cm	2059.12	1468.35	1110.46	784.24	766.50	365.59	298.06
H=10.0cm	2050.84	1659.22	1266.43	654.47	660.51	458.41	214.95
H=10.0cm	2288.63	1779.75	1092.94	666.15	607.00	383.55	161.78
H=10.0cm	2121.54	1603.48	1154.80	724.70	691.02	436.65	265.04
H=12.5cm	3828.27	2280.90	1905.96	1426.00	1100.63	755.74	480.78
H=12.5cm	3564.95	1947.16	1480.04	914.10	804.13	621.59	537.16
H=12.5cm	2928.93	2229.86	1771.78	1150.16	920.92	754.48	454.48
H=12.5cm	2553.44	2358.40	1918.04	1076.45	967.71	816.50	426.14
H=12.5cm	3213.90	2204.08	1768.96	1141.68	948.35	737.08	474.64

2) 移動床模型に用いた移動床材料諸元 (粒度, 間隙率他)

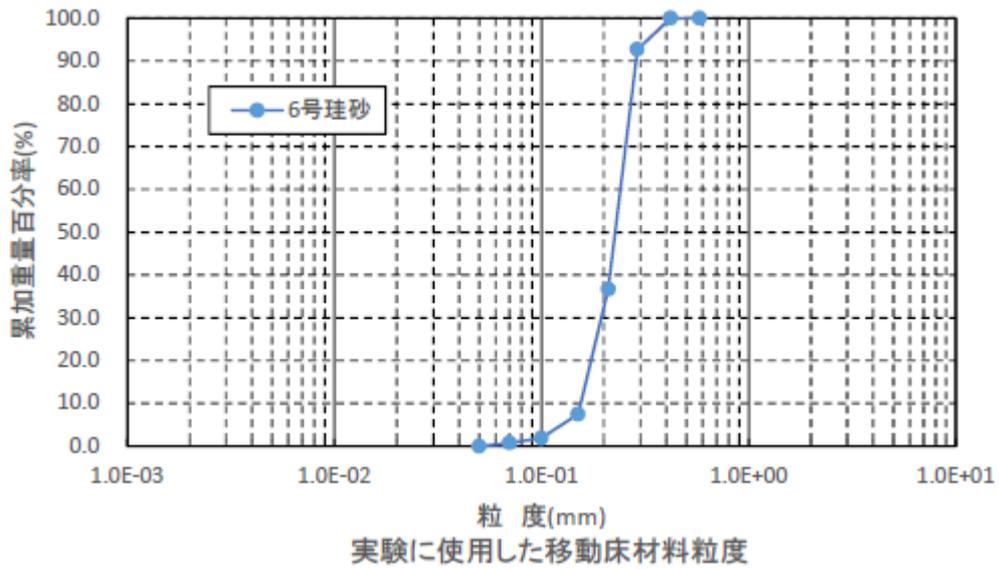
2. 性状

項 目		項 目	
原 産 地	岐阜県	比 重	2.56
主 要 成 分	SiO ₂ (=酸化珪素)	力 ヲ 比 重	1.07-1.42(別紙掲載)
耐 火 度	SK33	容 量	1,150g-1,440g(ノ)
溶 融 点	1,610度	P	H 6.5-7.5
硬 度	モース法7	形 状	多角形結晶
屈 折 率	1.55	研 削 力	多角形結晶の硬質で良好
磁 性 比	0.37	灼 熱 減 量	0.31
吸 水 率	0.5以下	原 子 番号	14
色	薄灰色	原 子 量	28.05
低 温 高 温 臭 気	無 臭	有 害 物 質	無(別紙掲載)
圧 縮 強 度 (kg/cm ²)	720-1,120	耐 食 性(ウエチメーター×1000hr)	良 好
塩 水 噴 霧 テ ス ト (100hr)	良 好	耐 水 性(1年浸漬後)	〃
耐 酸 性(10% H ₂ SO ₄ 常温1ヶ月)	〃	耐 溶 劑 性(MEK×100hr)	〃
耐 ガソ リ ン 性(常温1週間)	〃	耐 アルカリ性(10% NaOH 常温1ヶ月)	〃
磨 耗 性(1kg荷重×1000回転)	36mg	低 温 安 定 性(-40℃×10 day)	〃
高 温 安 定 性	900℃	耐 熱 衝 撃 値(ΔT℃)	170
ホ ー ル 係 数(10 ⁻⁴ cm/coulomb)	-4×10 ⁻²	中 性 子 核 散 乱 振 幅 <10 ⁻¹⁰ cm>	0.42
熱 電 能 (uv/°K)	-1.200	密 度 (g/cc)	2.33
仕 事 係 数 (ev)	4.1	存 在 量 (g/t)	277.200
エ ネ ル ギ ー ギ ャ ッ プ (ev)	1.09	原 子 価(酸化数)	-4+4
帯 磁 率 (10 ⁶ cgSgr)	-0.13	比 電 気 抵 抗 (uΩcm)	3.5×10 ¹¹
熱 膨 張 係 数 (10 ⁻⁶)	2.4(20-50℃)	X線スペクトルの波長 (Å)	Kα 7.125
吸 ス ピ ン	3/2	熱 伝 導 率 (w/cmdeg)	0.83
吸 着 気 モーメント	±0.5548	デ バ イ 温 度 (°K)	658

16. 粒度分布表

メッシュ () (μm)	サイズ										碓石粉 A 2	碓石粉 特粉	碓石粉 ㊸	碓石粉 ㊹
	1号	4号	5号	8号	1号	8号	5・8号	8・7号						
10 (1.65mm)	32.5													
14 (1.18mm)	57.9	7.2												
20 (0.85mm)	6.7	58.8	2.9				0.1							
28 (0.58mm)	2.1	31.6	52.9				7.3							
35 (0.42mm)	0.8	1.4	35.8	7.3			20.3	0.4						
48 (0.29mm)		0.5	7.5	56.0			29.2	3.2						
65 (0.21mm)		0.5	0.4	29.2	2.6	0.1	31.8	48.2						
100 (0.15mm)			0.5	5.6	45.8	0.1			0.2					
150 (0.10mm)				1.1	22.8	13.7			38.7	4.0	1.0	0.6	0.2	
200 (0.07mm)				0.8	17.6	56.8			4.0	13.6	2.6	2.1	2.0	
270 (0.05mm)									4.0	26.8	23.4	6.8	6.1	
下					11.2	5.6	11.3	1.5	55.4	72.8	90.2	91.5		
合計	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.8	99.7	99.6		

(サイズの数字は%を表わします)



平均粒径: 0.23mm
 比重: 2.56

		実験前	実験後
間隙比	V_v/V_s	0.912	1.241
間隙率	V_v/V	0.477	0.554

3) 実験立会い状況 (H30. 12. 21)



【シミュレーション解析編】

目次

第1章 固定床砂丘シミュレーション解析	1
1-1 業務の目的	1
1-2 業務内容	1
1-3 通過波の津波変形（防潮堤なし）	3
1-3-1 試験の概要	3
1-3-2 試験条件	3
1-3-3 シミュレーションの概要	6
1-3-4 解析条件	6
1-3-5 解析結果	7
1-3-6 通過波検定の検討結果のまとめ	19
1-4 防潮堤による津波変形・作用波圧	20
1-4-1 試験の概要	20
1-4-2 シミュレーション解析の概要	21
1-4-3 解析条件	21
1-4-4 津波波圧の評価方法について	22
1-4-5 解析結果	28
1-5 解析結果のまとめ	47
第2章 移動床砂丘シミュレーション解析	48
2-1 業務の目的	48
2-2 業務内容	48
2-3 試験の概要	50
2-4 試験条件	50
2-5 砂移動が防潮堤に与える影響に関する既往研究	51
2-6 シミュレーションの概要	53
2-7 解析条件	53
2-8 実験比較ケースの解析結果	57
2-8-1 防潮堤に作用する波圧の比較	57
2-8-2 流速場，河床変動高の縦断分布の比較	61
2-9 砂粒径変化ケースの解析結果	81

2-9-1 防潮堤に作用する波圧の比較	81
2-9-2 流速場，河床変動高の縦断分布	88
2-10 砂層考慮ケースの解析結果	132
2-10-1 防潮堤に作用する波圧の比較.....	132
2-10-2 流速場，河床変動高の縦断分布	136
2-11 解析結果のまとめ	147
第3章 解析結果のまとめと今後の課題	150
付録.....	1

第1章 固定床砂丘シミュレーション解析

1-1 業務の目的

平成 25 年 7 月，新規制基準や関連する審査ガイドが施行された。また，平成 25 年 11 月改正の核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律では，「発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価」を業務者に求め，「原子力規制委員会で定める時期ごとに，当該発電用原子炉施設の安全性について，自ら評価をしなければならない」としている。さらに，平成 25 年 11 月策定の「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」では，新規制基準を適用したプラントの安全性向上を「外部事象に係る確率論的リスク評価（PRA）」等を用いて評価することが求められており，リスク評価に資する施設・設備のフラジリティ評価手法の高度化が必要となっている。

本業務は，防潮堤に関する耐津波設計・フラジリティ評価手法の高度化を目的に，水理試験及びシミュレーション解析を実施し，防潮堤に作用する砂丘の影響を考慮した波力に関する試験データを取得する。

1-2 業務内容

本業務では，防潮堤を対象とした砂丘の影響に関する水理試験，シミュレーション解析を行う。なお，本章では，砂丘を固定床として扱った。

水理試験には，京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置されている津波再現水槽を使用することとし，シミュレーション解析用計算機は京都大学宇治地区研究所本館に設置されている Dell 社製 PowerEdge R930 (CPU: Intel® Xeon E7-4850 v3@2.20GHz×4, Memory:1,536 GB)4 台を使用する。また，シミュレーション解析には京都大学防災研究所で開発された完全 3 次元流体解析モデル（H-FRESH）を用いる。

(1) 水理試験（詳細は【水理試験編】参照）

水理試験により防潮堤に作用する波力及び津波変形の状況を，砂丘の影響を考慮して計測する。試験模型のイメージを図 1-2-1 に示す。本試験に先立って予備試験を行い，試験で用いる入力津波波形を，関係者間で協議の上で 3 種類選定する。この予備試験において，詳細な測定は行わない。

本試験の試験ケースは，防潮堤なしの試験を 6 ケース（入力津波波形 3 種類×繰り返し回数 2），防潮堤を設置した試験を 6 ケース（入力津波波形 3 種類×防潮堤位置 2 箇所×繰り返し回数 1）の計 12 ケースとする。測定項目は水位，流速の測定および水面形の動画撮影とする。

(2) シミュレーション解析

本業務で実施する水理試験を対象としたシミュレーション解析を実施する。解析ケース数は，防潮堤なしの試験を対象とした 3 ケース（入力津波波形 3 種類），防潮堤を設置した試験を対象とした 6 ケース（入力津波波形 3 種類×防潮堤位置 2 か所）の計 9 ケースとする。

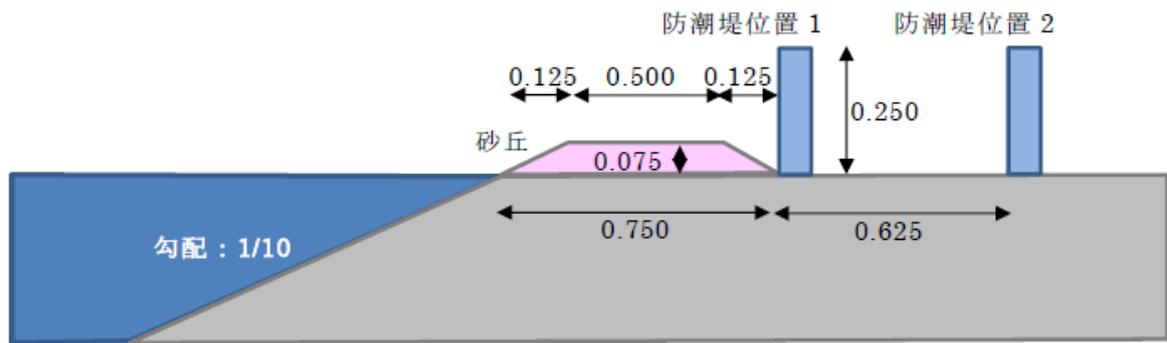


図 1-2-1 試験模型のイメージ（断面図，単位：m）

1-3 通過波の津波変形（防潮堤なし）

1-3-1 試験の概要（詳細は【水理試験編】参照）

津波波力特性の把握を目的に水理試験を行うのに先立ち、以下の4種類の津波を試験水槽内で再現し、流速、波高を3回計測するとともに、高速度カメラ画像計測を行う。

- ① 沖波波高で 7.5cm の孤立波
- ② 沖波波高で 10cm の孤立波
- ③ 沖波波高で 12.5cm の孤立波
- ④ 沖波波高で 15cm の孤立波

なお、試験は京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー内に設置されている津波再現水槽で行う。

1-3-2 試験条件（詳細は【水理試験編】参照）

試験の概要を図 1-3-2-1 に示す。海底地形は単純勾配（勾配 1/10）とした。

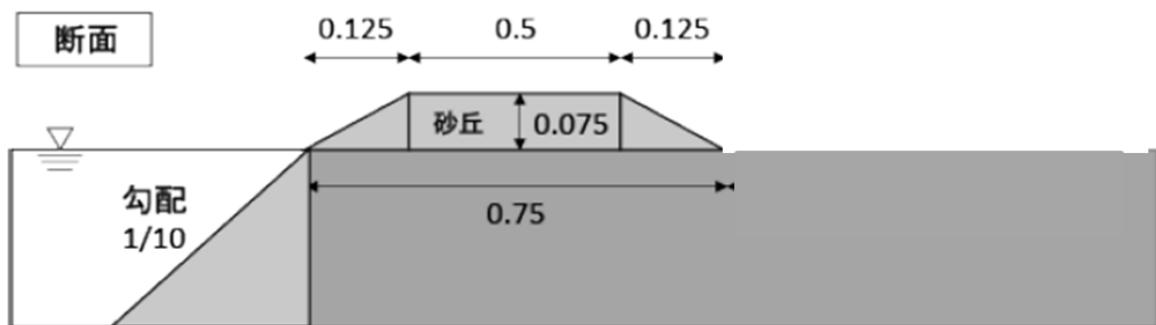


図 1-3-2-1 試験の概要図

(1) 試験水槽（津波再現水槽）

試験に用いた水槽は、長さ 45m、幅 4.0m、水深 0.8m の津波再現水槽である。図 1-3-2-2 に試験水槽の概要を示す。

(2) 計測機器設置位置

図 1-3-2-3 に試験に用いた計測機器及びその設置位置を示す。図 1-3-2-3 に示すように、水位計の位置は wave01～wave06、流速計の位置は Velo-6 である。

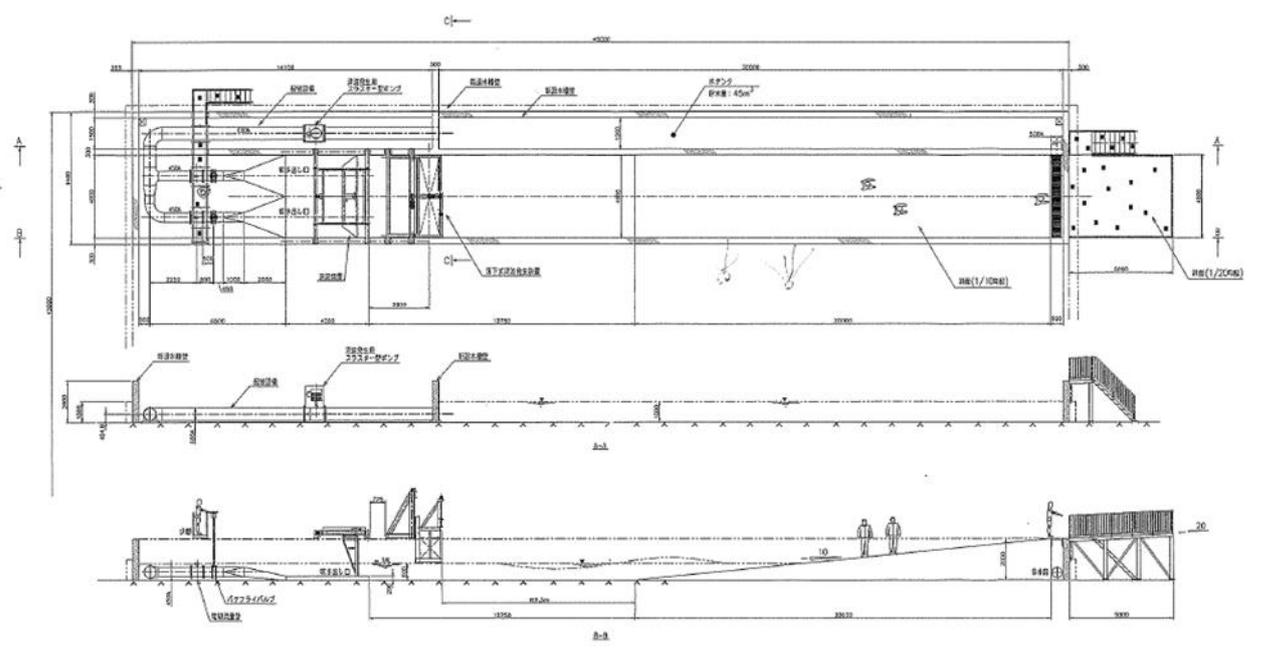
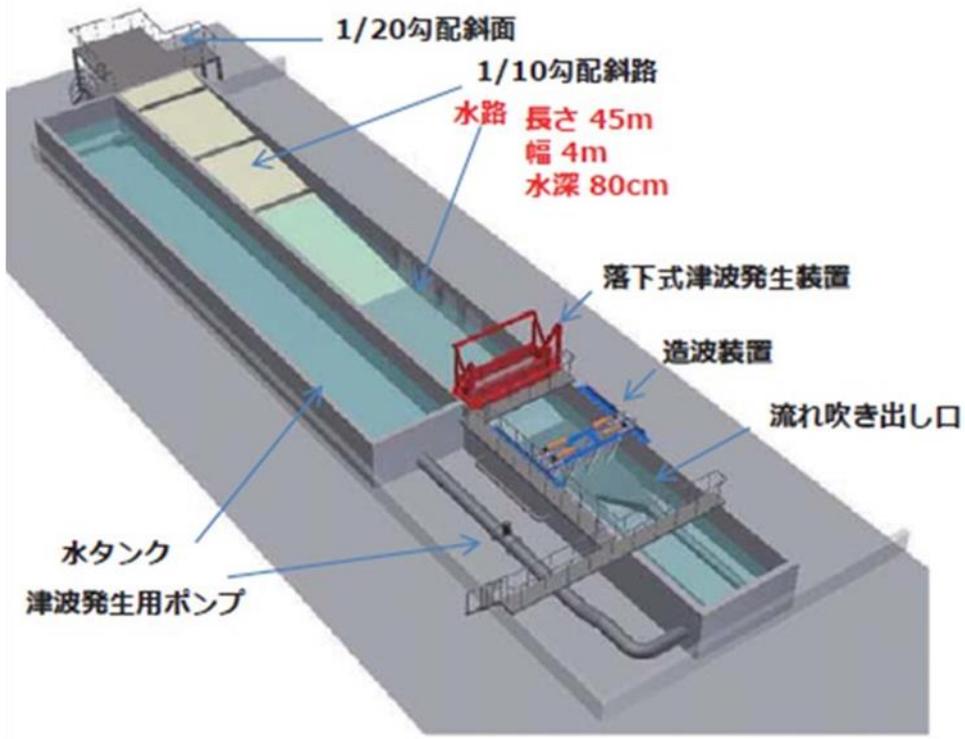


図 1-3-2-2 試験水槽（津波再現水槽）

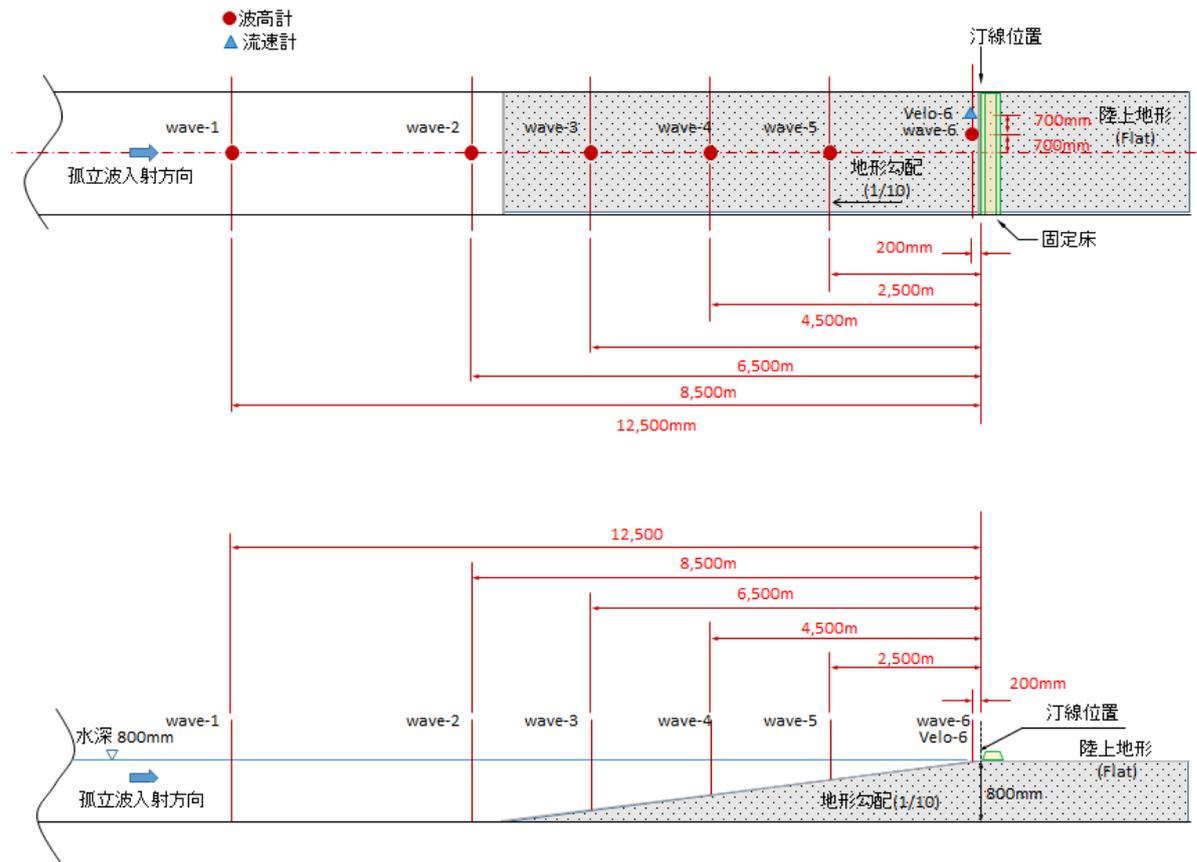


圖 1-3-2-3 水理模型試驗水路寸法

1-3-3 シミュレーションの概要

通過波検定試験で用いられる 4 種類の津波を対象に，シミュレーション解析を行う．解析コードは，京都大学防災研究所で開発された完全 3 次元流体解析モデル（H-FRESH）を利用する．通過波検定試験で計測された流速，波高及び動画撮影された津波波形等を解析結果と比較することにより，それらの整合程度から解析手法の適用範囲を確認すると同時に，解析手法および評価手法を提案する．

1-3-4 解析条件

孤立波 4 ケースの解析を実施した．解析の入力波条件を表 1-3-4-1 に示す．

表 1-3-4-1 シミュレーション解析ケース一覧

ケース名	入力波	入力波波高	対象時間
Case 1	孤立波	7.5cm	15s
Case 2		10.0cm	
Case 3		12.5cm	
Case 4		15.0cm	

計算メッシュは，試験水路の形状を適切に表現できるように作成した．

水路縦断方向のメッシュ分割について，津波の変形・伝播過程を詳細に検討できるように，水平方向の計算メッシュサイズは，-12.5m から 2.5m までを 0.5cm に設定し，鉛直方向のメッシュ分割についても，解析対象となる津波波形の形状を表現するために，0.5cm に設定した．

1-3-5 解析結果

(1) 水位の時系列波形

図 1-3-5-1～図 1-3-5-8 は、Case1～4 における水位の時系列波形図を示し、解析結果を赤線と試験結果を青線で示した図である。

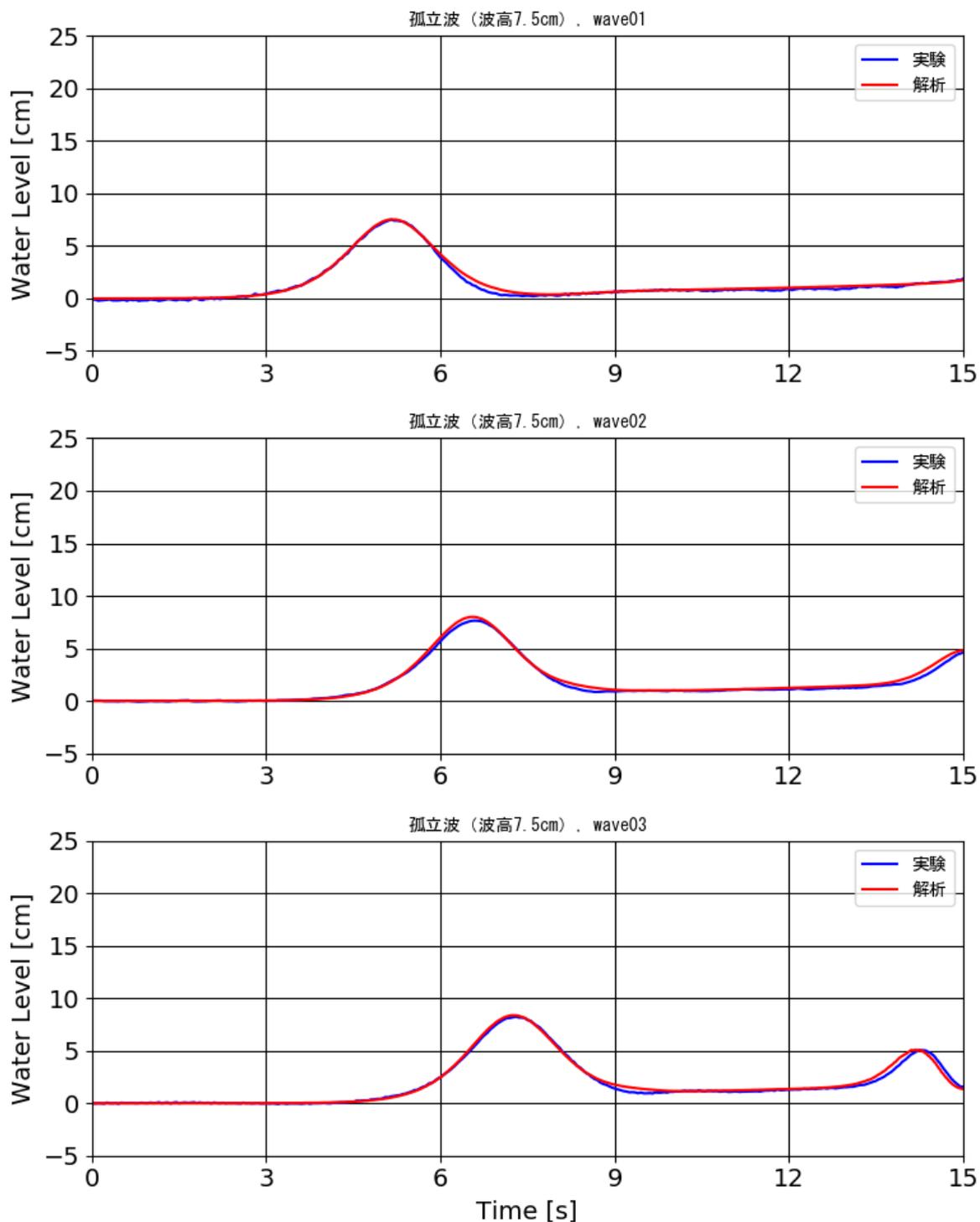


図 1-3-5-1 Case1 の時系列波形図 (wave01～wave03)

【孤立波：波高 7.5cm】

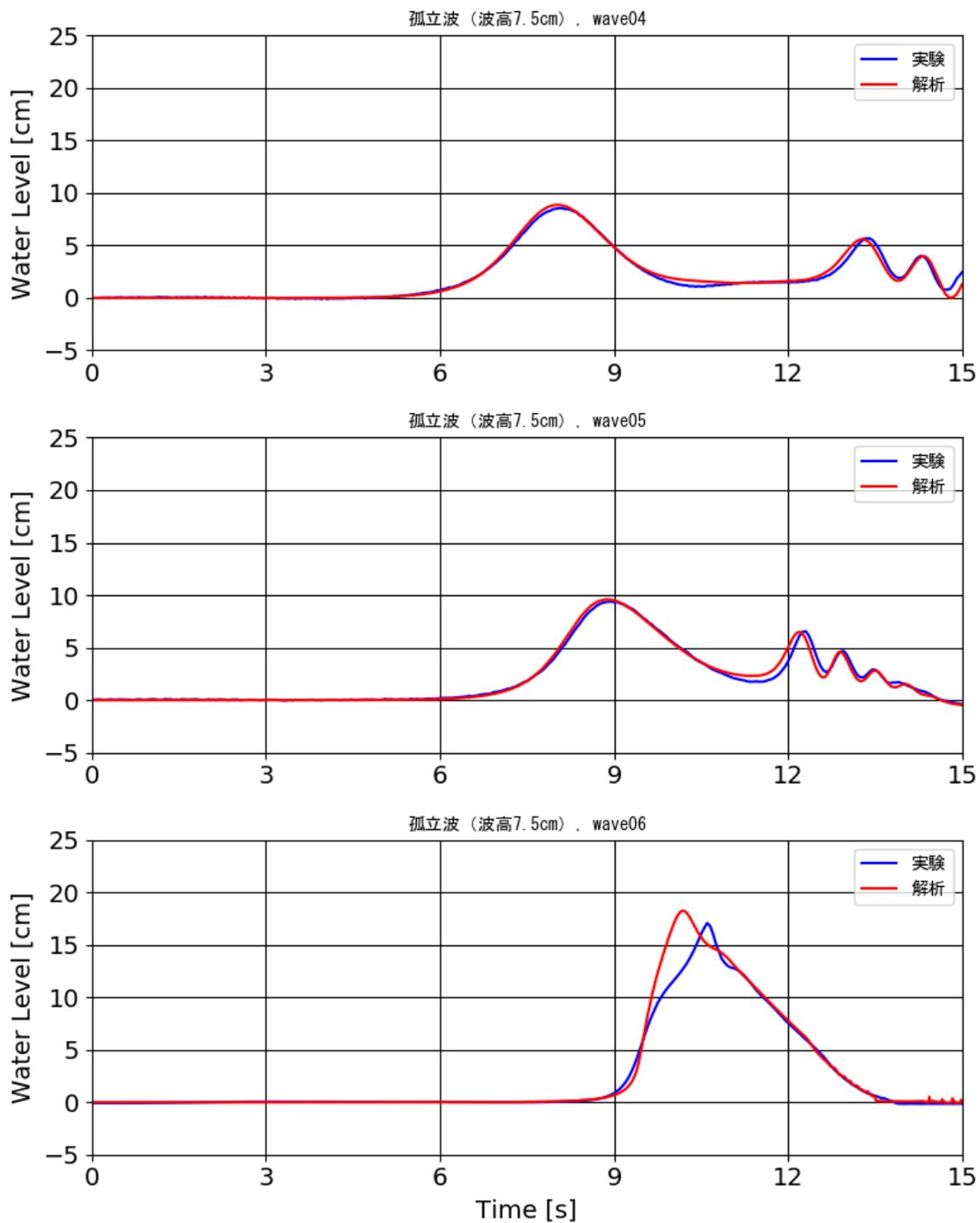


図 1-3-5-2 Case1 の時系列波形図 (wave04~wave06)

【孤立波：波高 7.5cm】

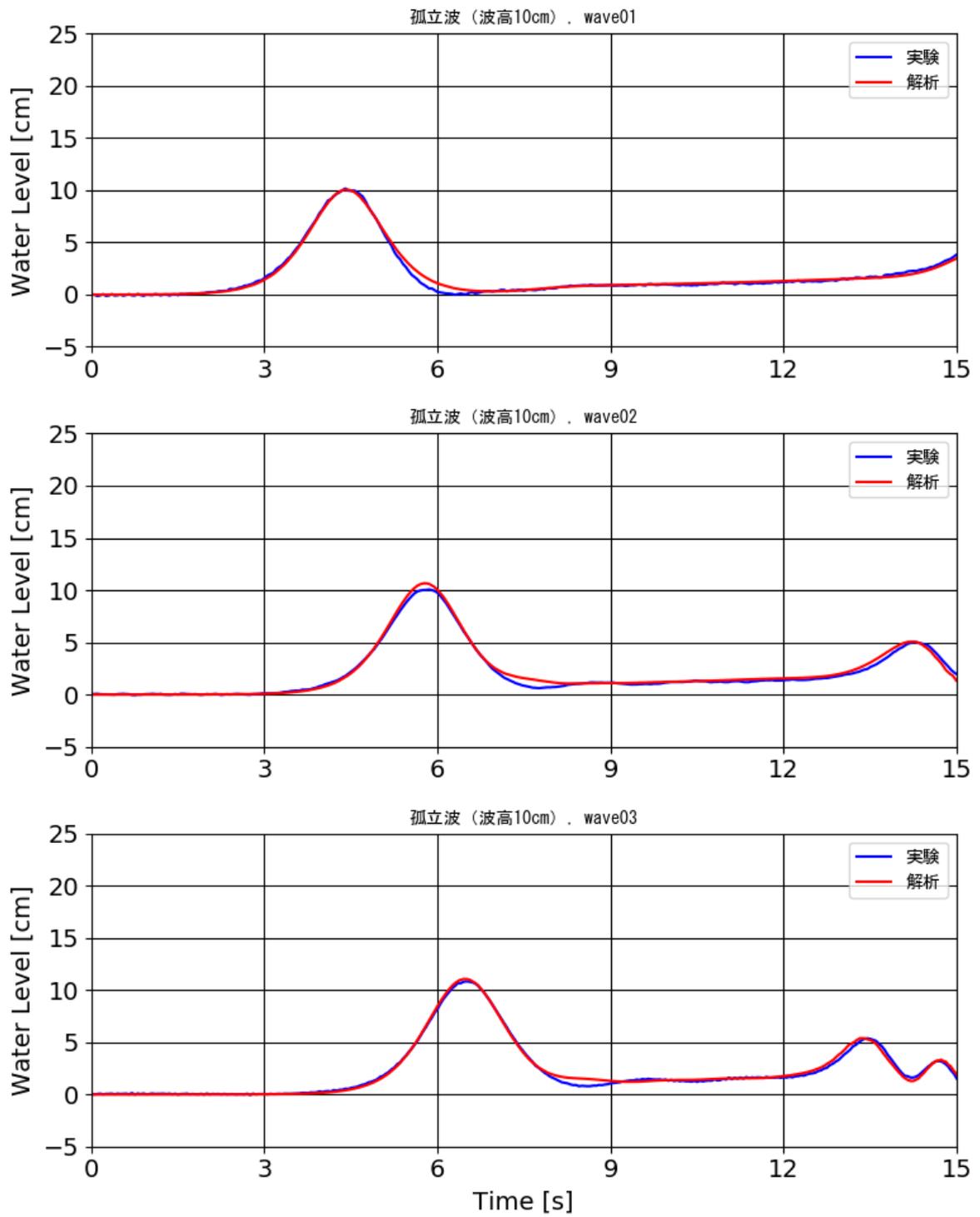


図 1-3-5-3 Case2 の時系列波形図 (wave01~wave03)

【孤立波：波高 10cm】

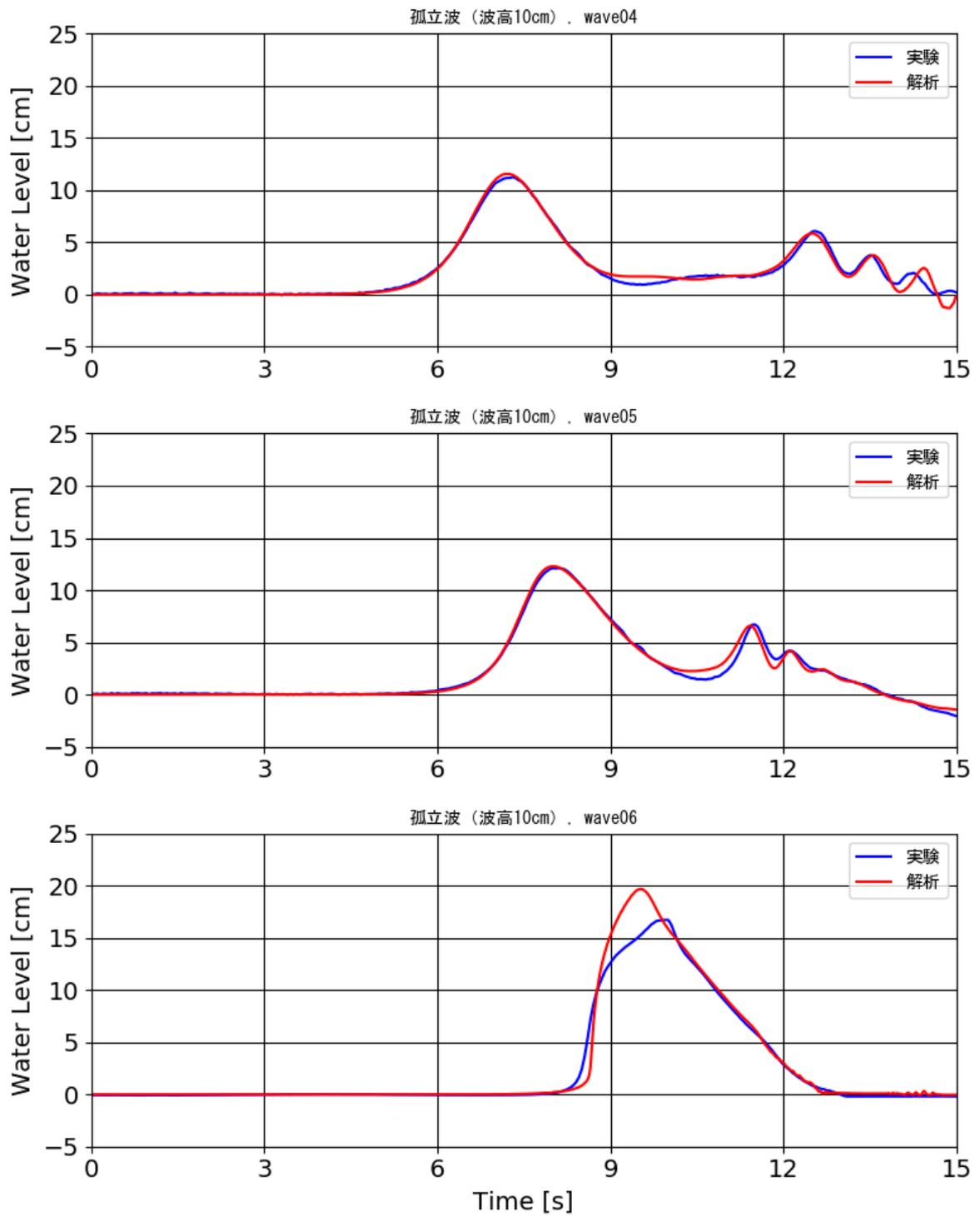


図 1-3-5-4 Case2 の時系列波形図 (wave04~wave06)

【孤立波：波高 10cm】

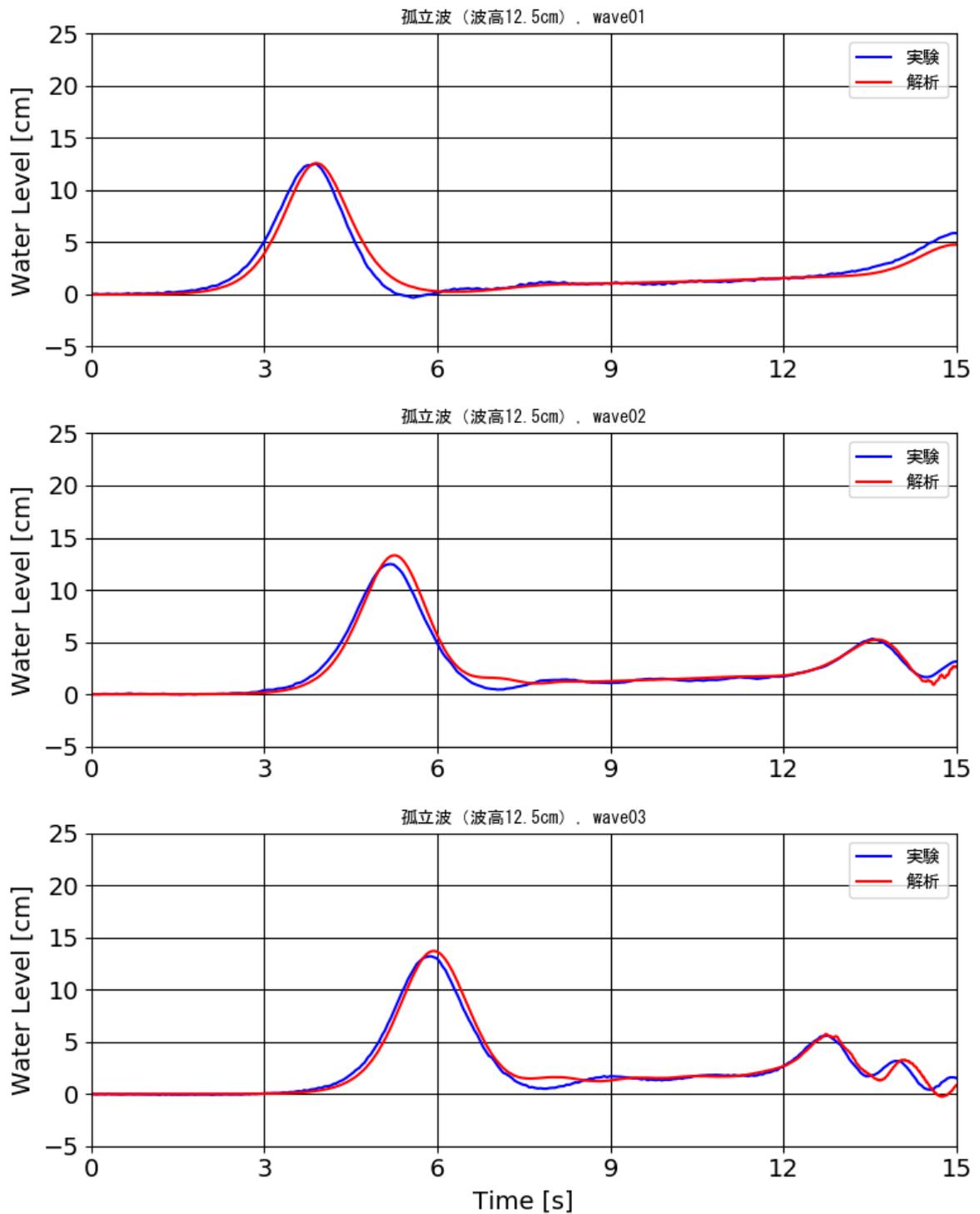


図 1-3-5-5 Case3 の時系列波形図 (wave01~wave03)

【孤立波：波高 12.5cm】

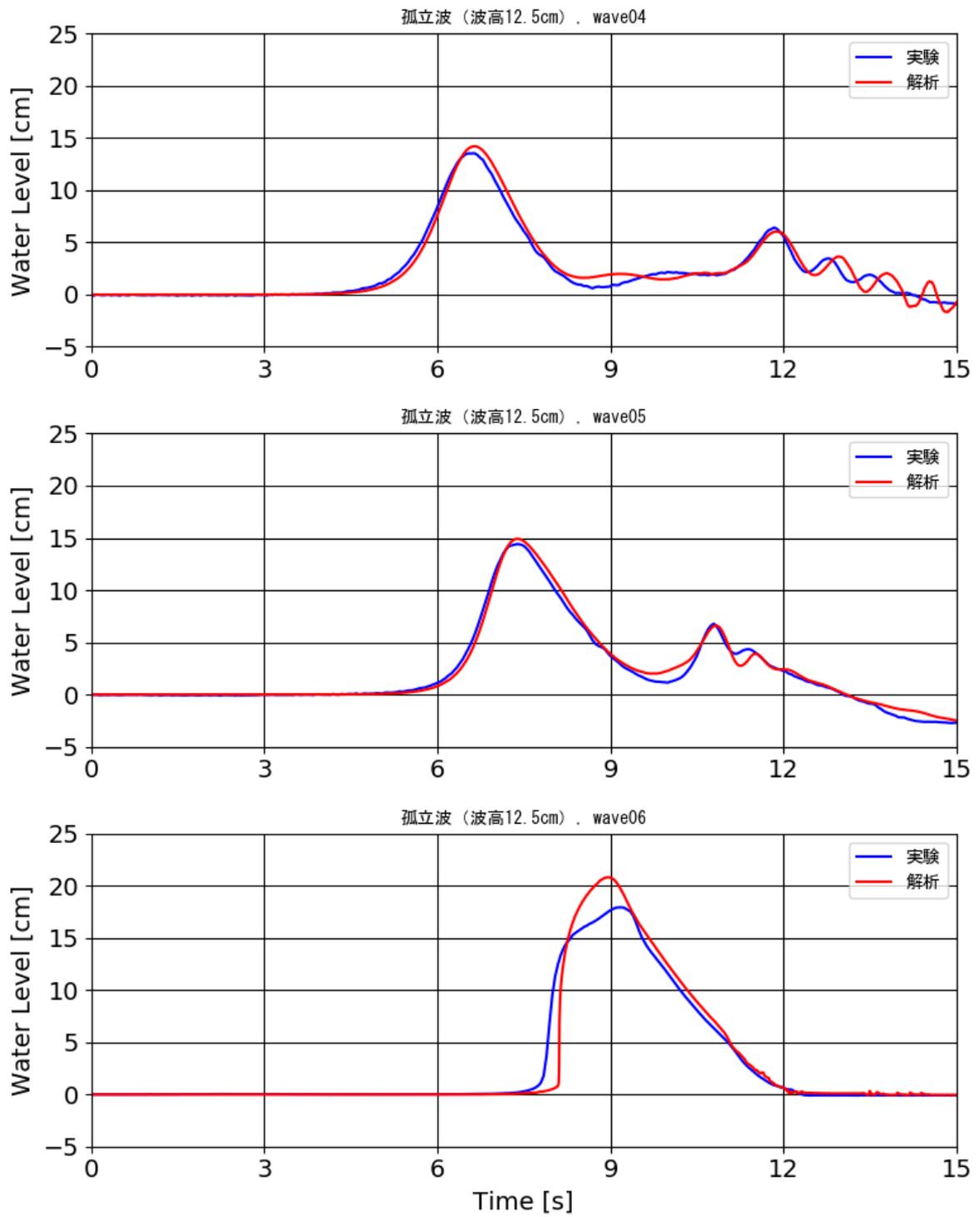


図 1-3-5-6 Case3 の時系列波形図 (wave04~wave06)

【孤立波：波高 12.5cm】

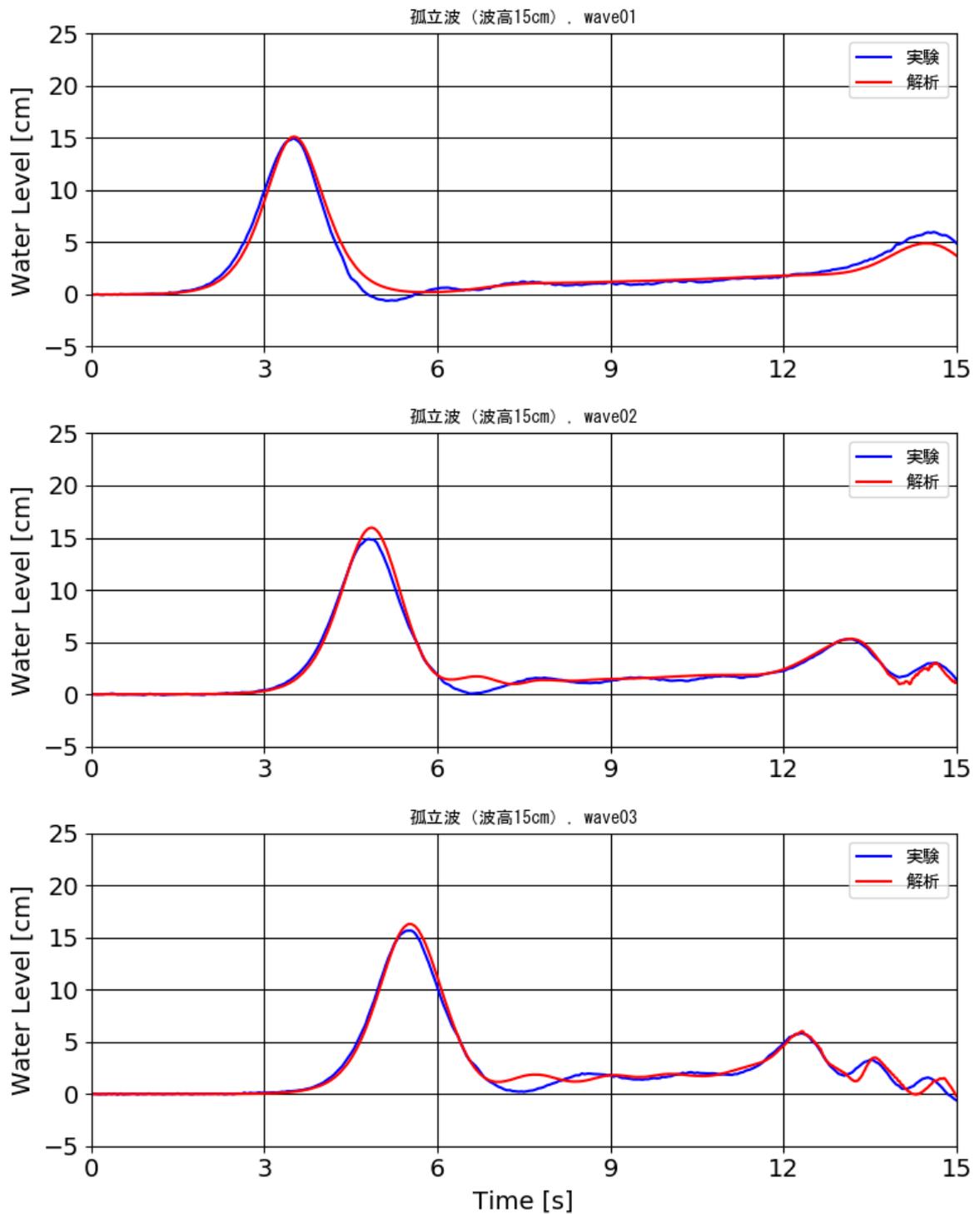


図 1-3-5-7 Case4 の時系列波形図 (wave01~wave03)

【孤立波：波高 15cm】

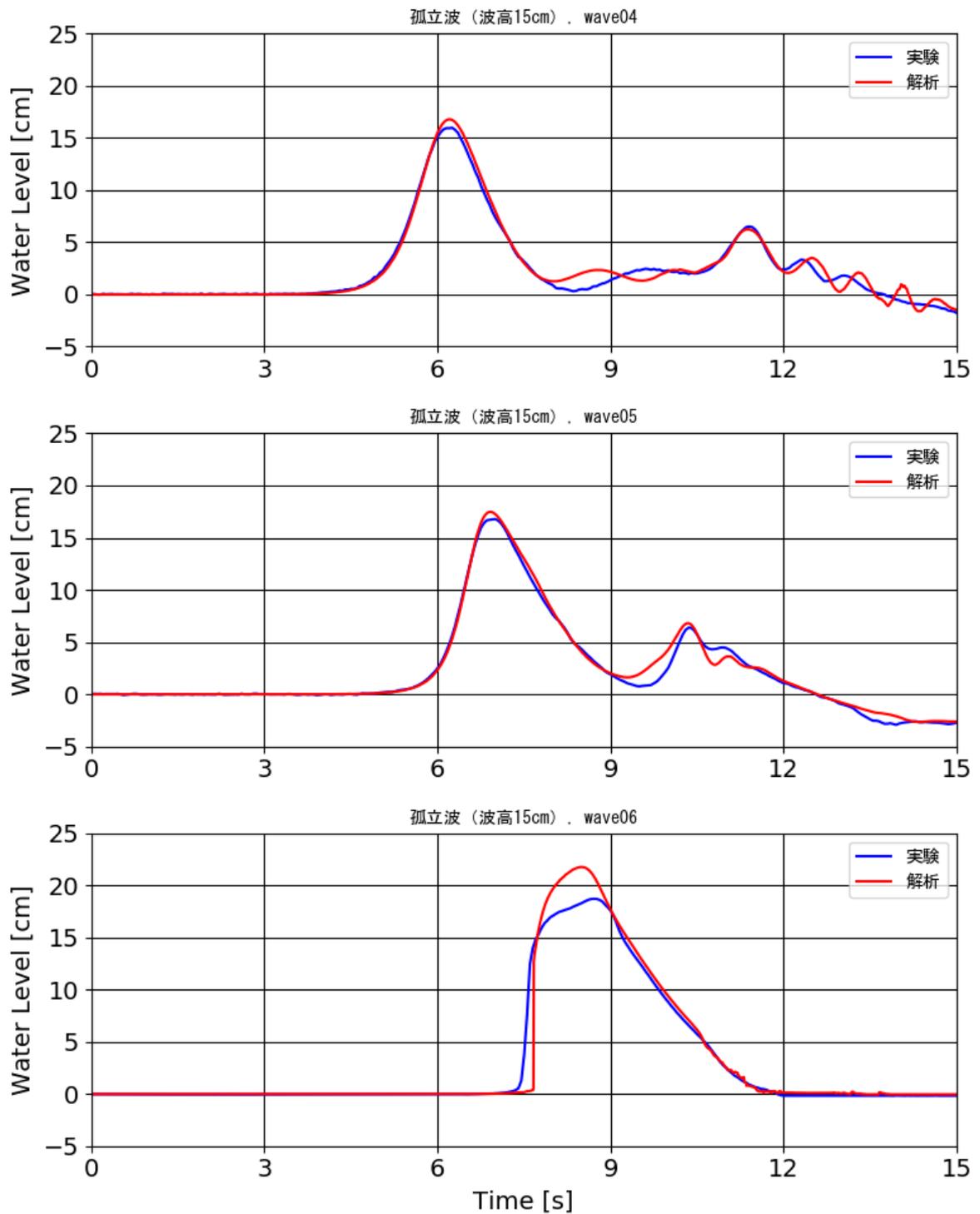


図 1-3-5-8 Case4 の時系列波形図 (wave04~wave06)

【孤立波：波高 15cm】

(2) 流速の時系列波形

図 1-3-5-9～図 1-3-5-12 は、Case1～4 における流速の時系列波形図を示し、解析結果を赤線と試験結果を青線で示した図である。

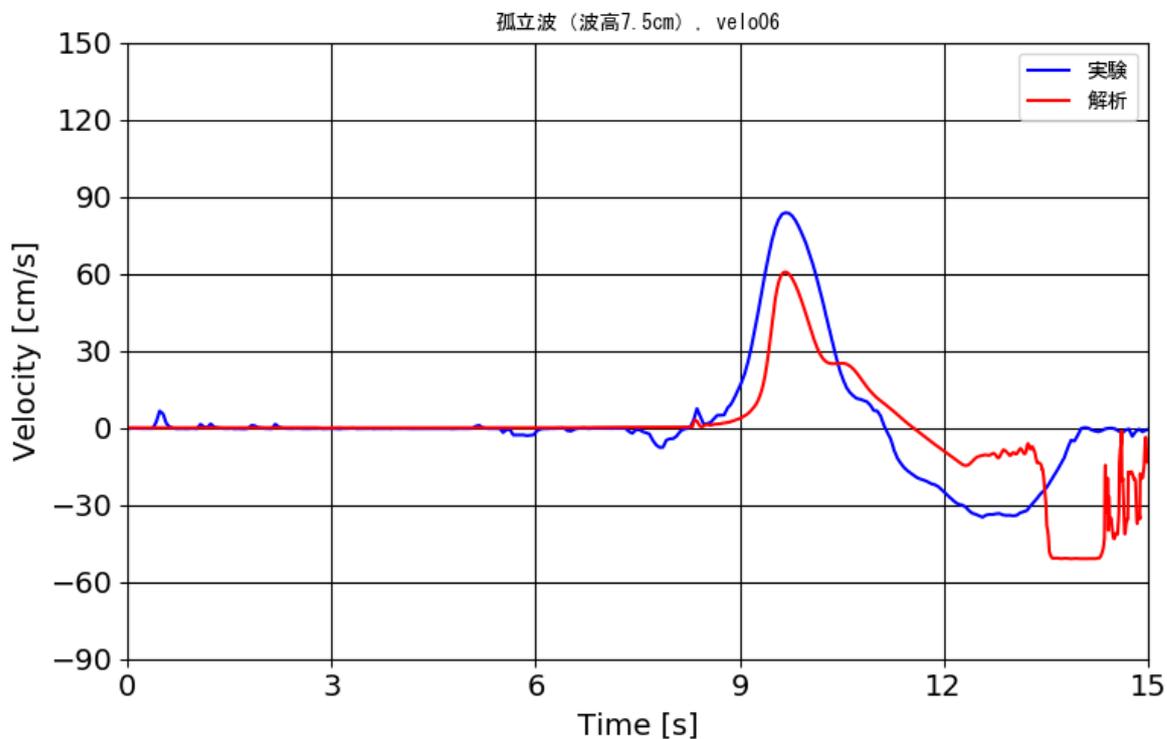


図 1-3-5-9 Case1 の流速の時系列波形図 (velo06)【孤立波：波高 7.5cm】

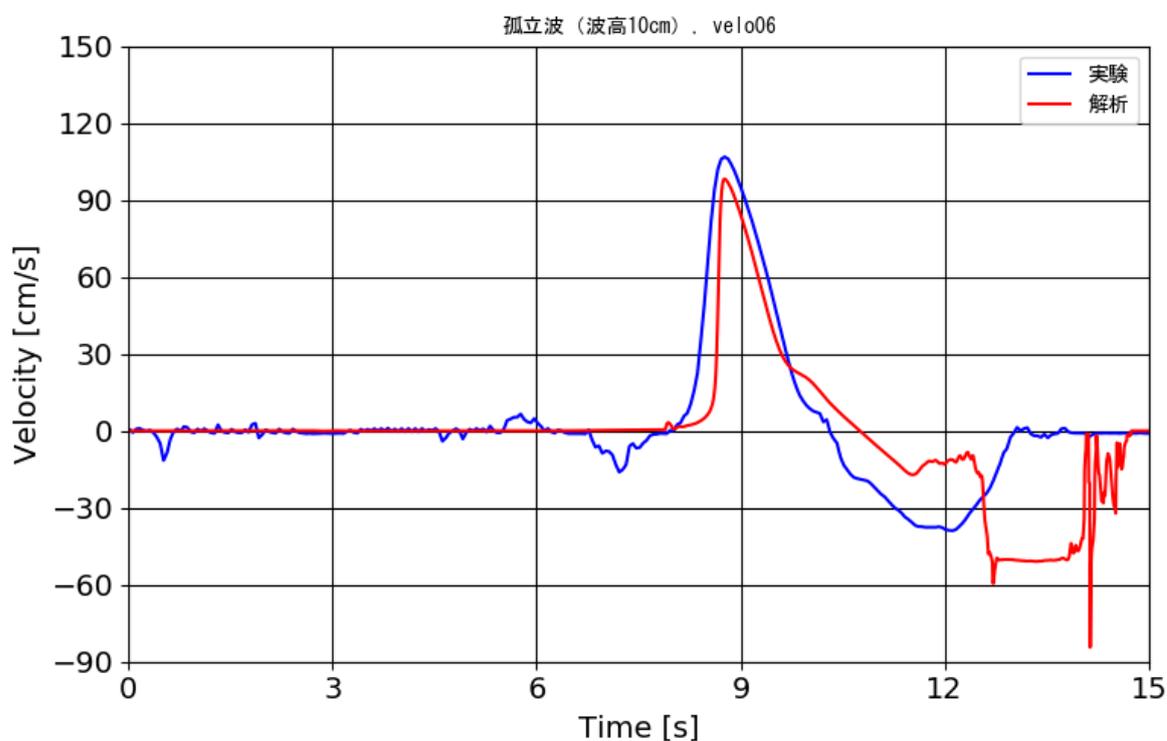


図 1-3-5-10 Case2 の流速の時系列波形図 (velo06)【孤立波：波高 10cm】

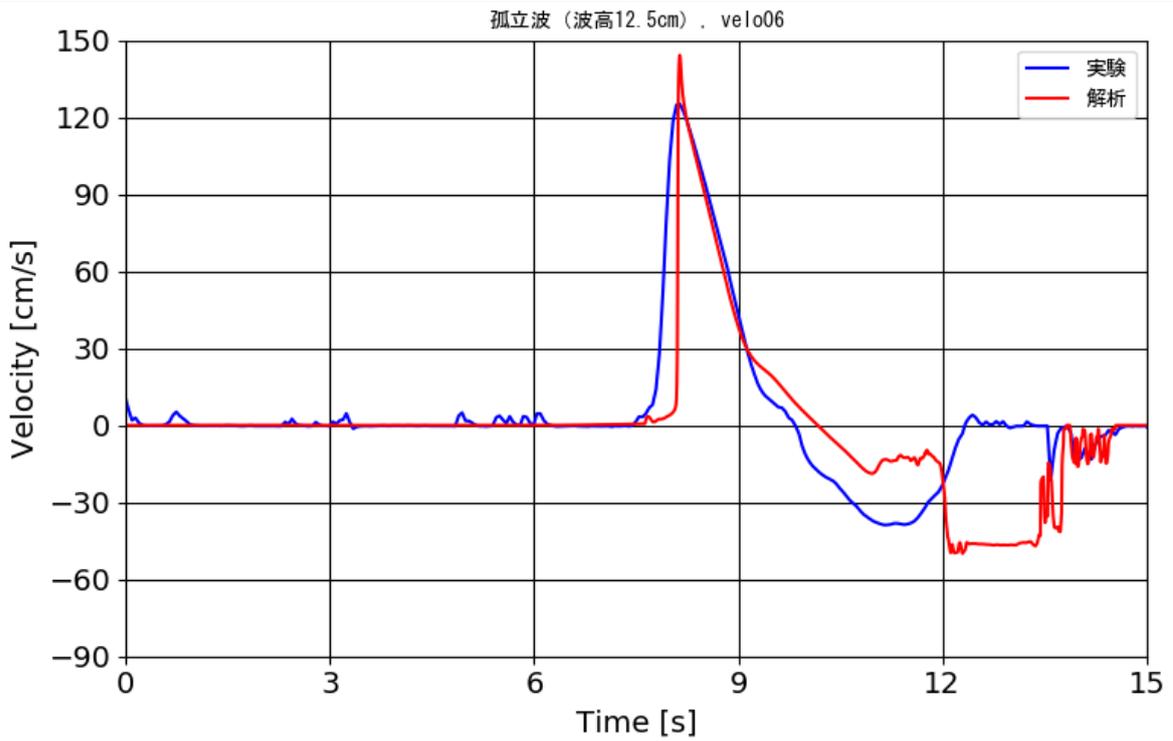


図 1-3-5-11 Case3 の流速の時系列波形図 (velo06)【孤立波:波高 12.5cm】

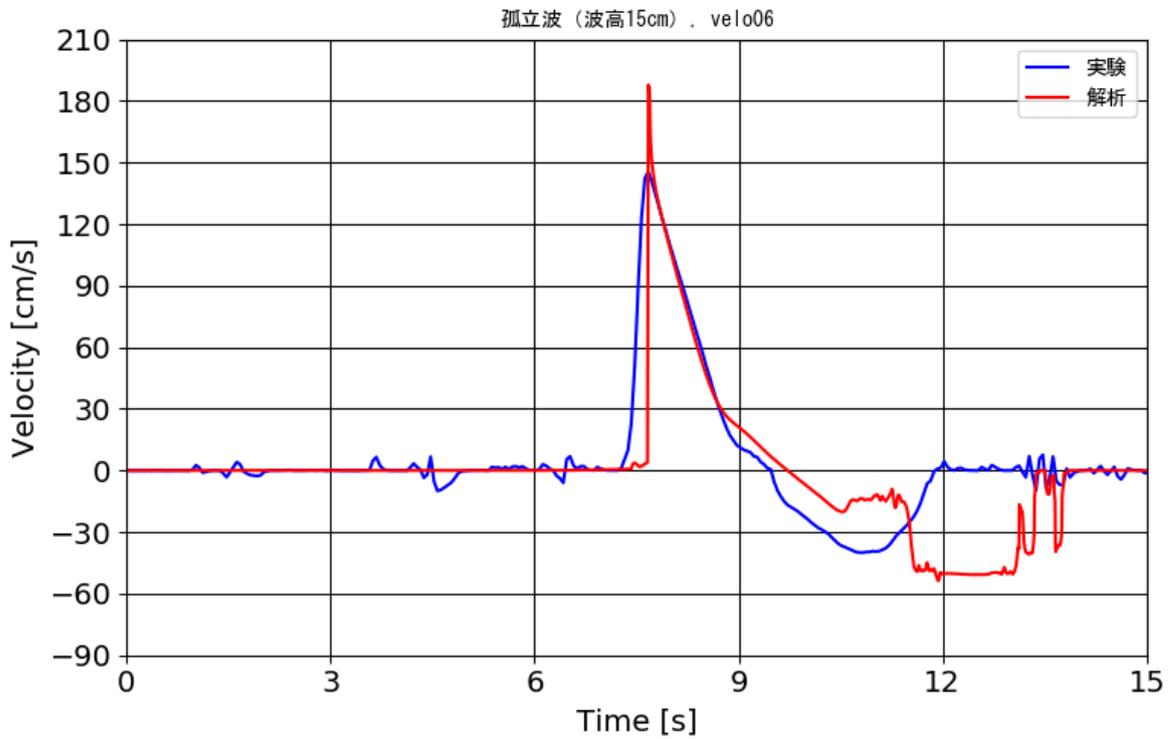


図 1-3-5-12 Case4 の流速の時系列波形図 (velo06)【孤立波:波高 15cm】

(3)最大水位の変化

表 1-3-5-1 及び図 1-3-5-13 は、数値計算結果と水理模型試験結果の各波高計(wave01~wave06)における最高水位の比較及び相関を示しており、図 1-1-5-13 のグラフ中の青丸は Case1 を、緑丸は Case2 を、赤丸は Case3 を、橙丸は Case4 示している。図 1-3-5-13 のグラフに示されるように、Case1~4 に対する最高水位の数値計算結果は、水理模型試験結果における最高水位を高い精度で再現している。図 1-3-5-13 に示される最高水位の数値計算結果と水理模型試験結果との比較では、回帰式の勾配は 1.1902 とほぼ 1 で、またこのときの決定係数 R^2 は 0.9755 であることから、再現性が高いといえる。

表 1-3-5-1 最大水位の比較表

設定波高	No.	実験	計算
7.5cm	波高計1	7.51	7.53
7.5cm	波高計2	7.63	7.99
7.5cm	波高計3	8.24	8.37
7.5cm	波高計4	8.55	8.86
7.5cm	波高計5	9.39	9.58
7.5cm	波高計6	17.06	18.24
10cm	波高計1	10.16	10.05
10cm	波高計2	10.06	10.65
10cm	波高計3	10.82	11.06
10cm	波高計4	11.25	11.57
10cm	波高計5	12.11	12.29
10cm	波高計6	16.71	19.67
12.5cm	波高計1	12.55	12.58
12.5cm	波高計2	12.47	13.31
12.5cm	波高計3	13.20	13.70
12.5cm	波高計4	13.54	14.21
12.5cm	波高計5	14.41	14.92
12.5cm	波高計6	17.92	20.80
15cm	波高計1	14.98	15.12
15cm	波高計2	14.88	15.96
15cm	波高計3	15.65	16.29
15cm	波高計4	15.98	16.79
15cm	波高計5	16.78	17.47
15cm	波高計6	18.70	21.75

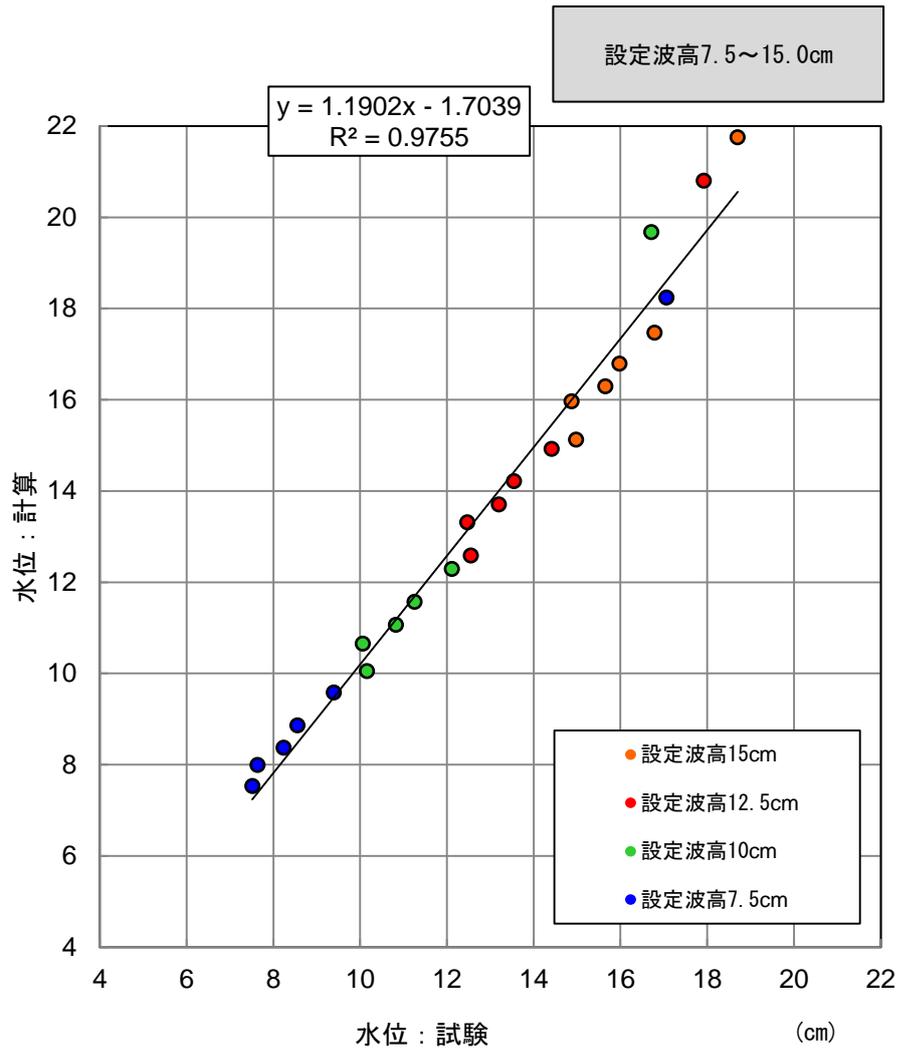


図 1-3-5-13 最大水位の相関

1-3-6 通過波検定の検討結果のまとめ

水位時系列波形の数値計算結果と水理模型試験結果との比較について、沖合から砕波帯前面にかけての計算水位は水理模型試験における計測波形を高い精度で再現しており、入力波の精度としては十分であると考えられる。なお、砕波後の計算水位と計測水位には若干差異があるものの、砕波後の流体運動においても良好に再現しているといえる。

1-4 防潮堤による津波変形・作用波圧

1-4-1 試験の概要

津波波力を受ける防潮堤を対象とする水理試験を実施し、防潮堤(堤体模型)に作用する砂丘の影響を考慮した津波波力特性に関する試験データを取得する。試験の概要を図 1-4-1-1 示す。海底地形は単純勾配(勾配 1/10)とする。なお、試験に用いた水槽は、図 1-3-2-2 及び図 1-3-2-3 に示した試験水槽と同様である。

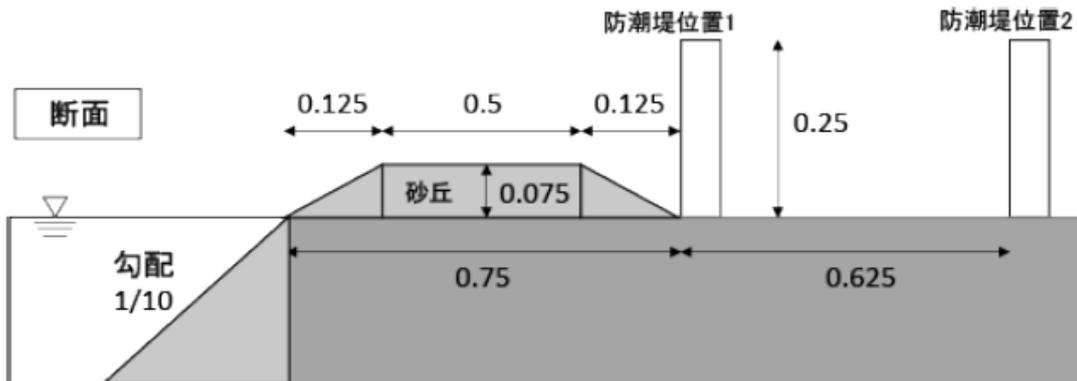


図 1-4-1-1 試験の概要図

図 1-4-1-2 は、図 1-4-1-1 の防潮堤に対して波圧計の設置位置を示したものである。図 1-4-1-2 に示すように、防潮堤の上部と下部を 2cm 空け、等間隔になるように設置している。

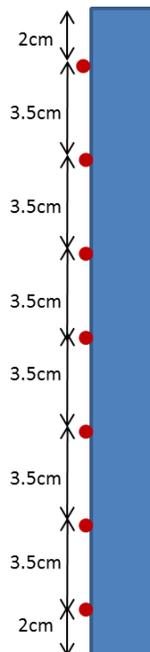


図 1-4-1-2 波圧計の設置位置

1-4-2 シミュレーション解析の概要

津波波力水理試験において実施した各試験条件を対象とするシミュレーション解析を行う。解析コードは、京都大学防災研究所で開発された完全3次元流体解析モデル（H-FRESH）を利用する。水理試験で計測された波高および流速、動画撮影された津波波形、構造物前面の波圧等を解析結果と比較することにより、それらの整合性および解析手法の適用範囲を確認するとともに、解析手法および評価手法を提案する。

1-4-3 解析条件

入力波4条件（孤立波）、堤体位置2条件（汀線-75cm、汀線-135cm）の合計8ケースの解析を実施した。波圧検定解析の解析ケースを表1-4-3-1に示す。

全ケースにおいて、堤体前面に台形の段丘を配置することで解析を実施し、堤体位置の差異によって波力に与える影響を確認した。

表 1-4-3-1 シミュレーション解析ケース一覧

ケース名	入力波	入力波波高	堤体位置	解析時間
Case 1	孤立波	7.5cm	汀線-75cm	15s
Case 2		10.0cm		
Case 3		12.5cm		
Case 4		15.0cm		
Case 5		7.5cm	汀線-137.5cm	
Case 6		10.0cm		
Case 7		12.5cm		
Case 8		15.0cm		

1-4-4 津波波圧の評価方法について

防潮堤に作用する津波波圧は図 1-4-4-1 に示すように、段波波圧と持続波圧がある。段波波圧は、最初に防潮堤に衝突する津波が与える継続時間の短い波圧のことである。一方、持続波圧は、段波波圧の後の継続時間の長い波圧のことであり、防潮堤には主に静的な波圧が加わる。防潮堤の設計に当たっては、このような 2 種類の津波波圧を考慮する必要がある。本検討では、解析で得られる津波波圧を段波波圧と持続波圧に分類し、それぞれ比較を行った。

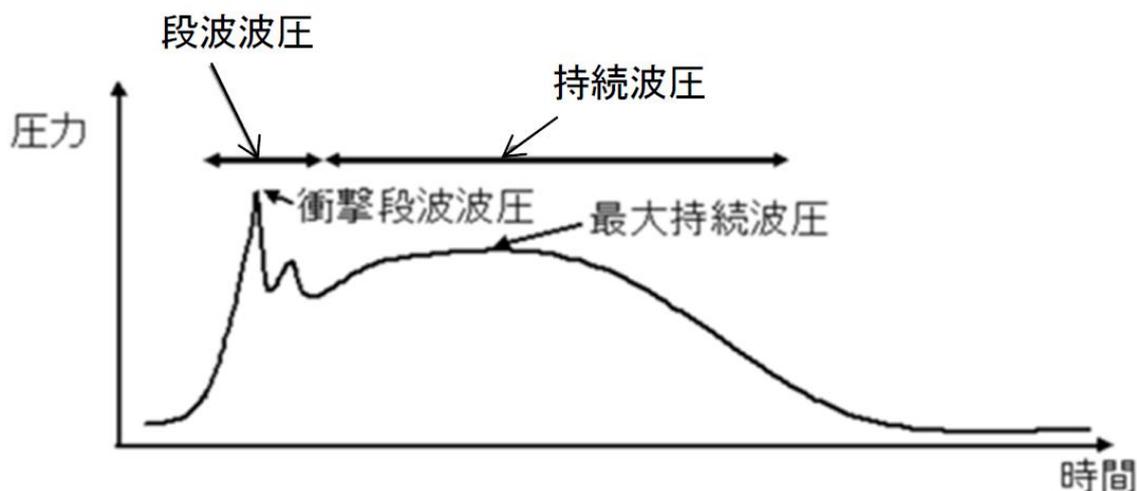


図 1-4-4-1 防潮堤に作用する津波波圧の模式図¹

計測高さ 2cm の防潮堤最下部の計測地点 (図 1-4-1-2 参照) における Case 1 ~ Case 8 の波圧時系列のグラフを図 1-4-4-3 ~ 図 1-4-4-10 に示す。津波が防潮堤に衝突した瞬間に段波波圧が生じ、その後持続波圧が生じており、図 1-4-4-1 の模式図と波形は似ているため、本解析に置いては、段波波圧と持続波圧に分類して評価する。

段波波圧と持続波圧の分類については、図 1-4-4-2 の模式図で示すように、防潮堤前面での最大せり上り波高の時刻より早い時間帯を段波波圧、遅い時間帯を持続波圧として分類した。すなわち、波圧の立ち上がり時刻を段波波圧開始時刻と設定し、また、防潮堤前面における最大水位となる時刻を最大せり上り波高の時刻として各ケース算出し、最大せり上り波高の時刻を持続波圧開始時刻 (段波波圧終了時刻) と設定した。Case 1 ~ Case 8 の波圧時系列の段波波

¹石田 暢生, 森谷 寛, 中村 英孝, 飯島 亨, 川内 英史: NRA 技術報告: 防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について, 原子力規制委員会, 平成 26 年 12 月

²森谷 寛, 石田 暢生, 鳥山 拓也, 中村 英孝, 飯島 亨, 川内英史: 段波の作用を受ける直立壁式の防潮堤の構造応答に着目した津波波力評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp.I_1027-I_1032, 2016.

圧開始，持続波圧開始の各時刻を表 1-4-4-1 に示す．なお，持続波圧の継続時間は全ケース計算終了時刻までとした．

段波波圧の評価方法は，衝突の瞬間値が重要となるため，当該時刻間の最大値とする．一方，持続波圧の評価方法は，防潮堤に対して持続的に作用する圧力が重要となる．このため，持続波圧の継続時間において持続波圧が最大値となる時刻の前後 0.5s の時刻間に対して，持続波圧の平均値と最小値を算出し，平均値をプロットし，波圧の変動幅を確認できるように波圧の範囲（最小値及び最大値）をエラーバーで示す．

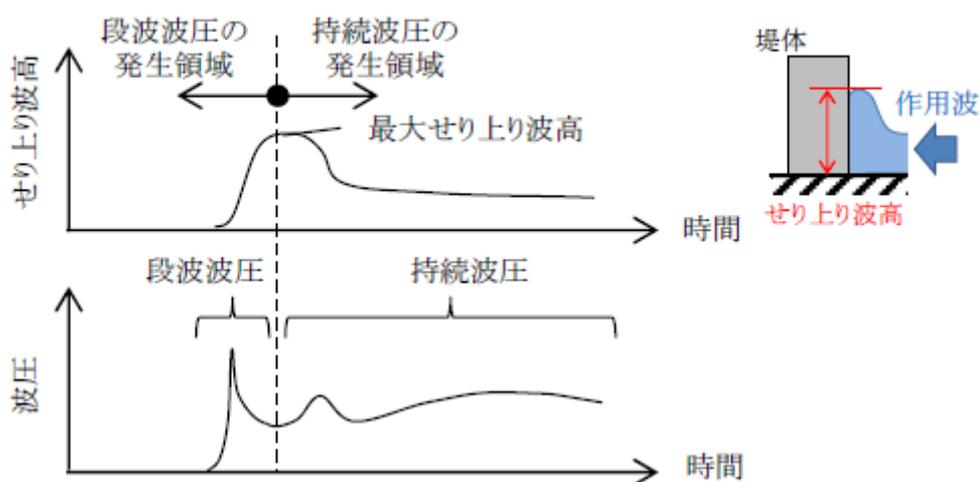


図 1-4-4-2 段波波圧と持続波圧の分類手法の模式図²

表 1-4-4-1 段波波圧及び持続波圧の開始時刻

ケース名	段波波圧開始時刻	持続波圧開始時刻
Case 1	10.1041sec	10.4477sec
Case 2	9.1419sec	9.5355sec
Case 3	8.4234sec	8.8857sec
Case 4	7.9173sec	8.3797sec
Case 5	10.4290sec	10.7476sec
Case 6	9.4355sec	9.8229sec
Case 7	8.7170sec	9.1044sec
Case 8	8.0985sec	8.6171sec

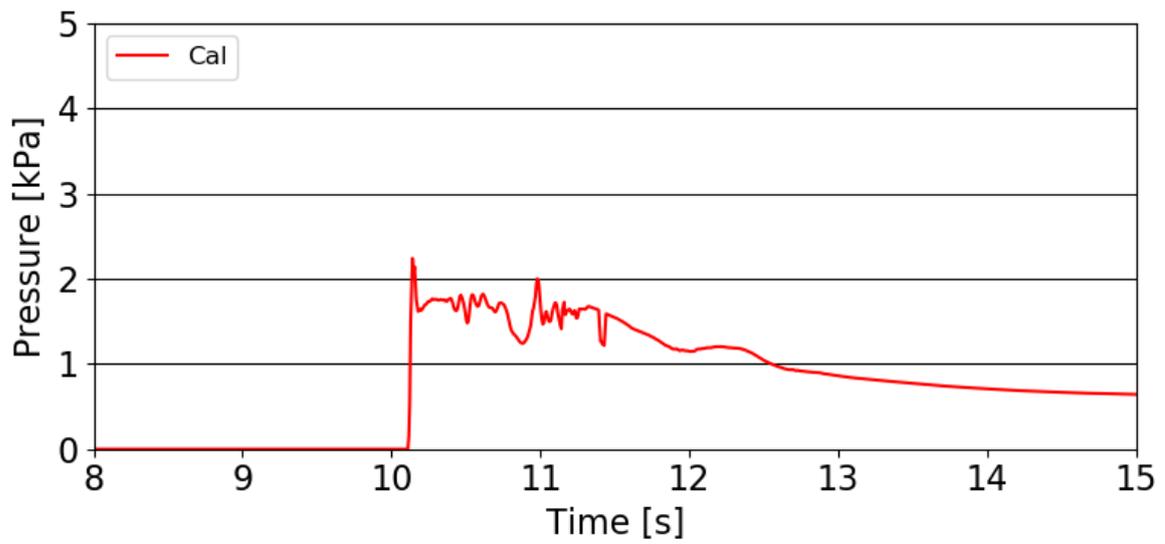


図 1-4-4-3 波圧時系列【孤立波 7.5cm, 汀線-75cm, 計測高さ 2.0cm】

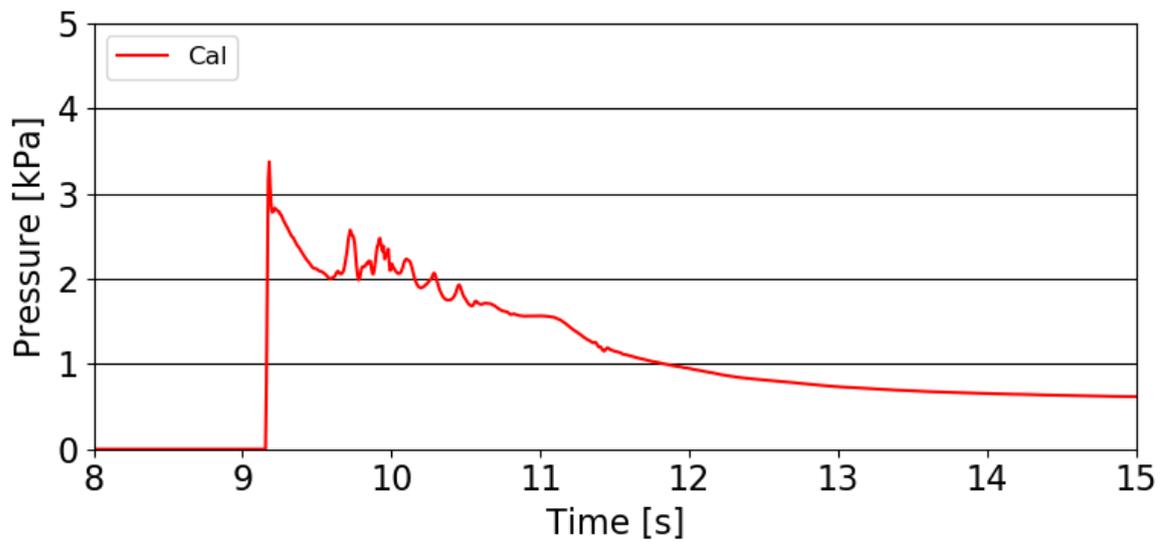


図 1-4-4-4 波圧時系列【孤立波 10.0cm, 汀線-75cm, 計測高さ 2.0cm】

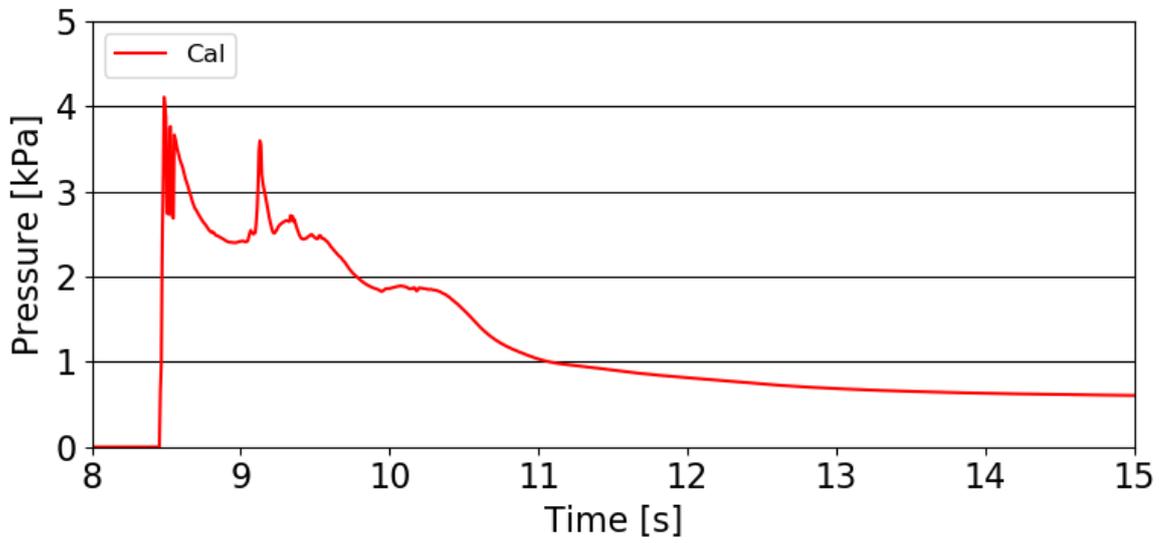


図 1-4-4-5 波圧時系列【孤立波 12.5cm，汀線-75cm，計測高さ 2.0cm】

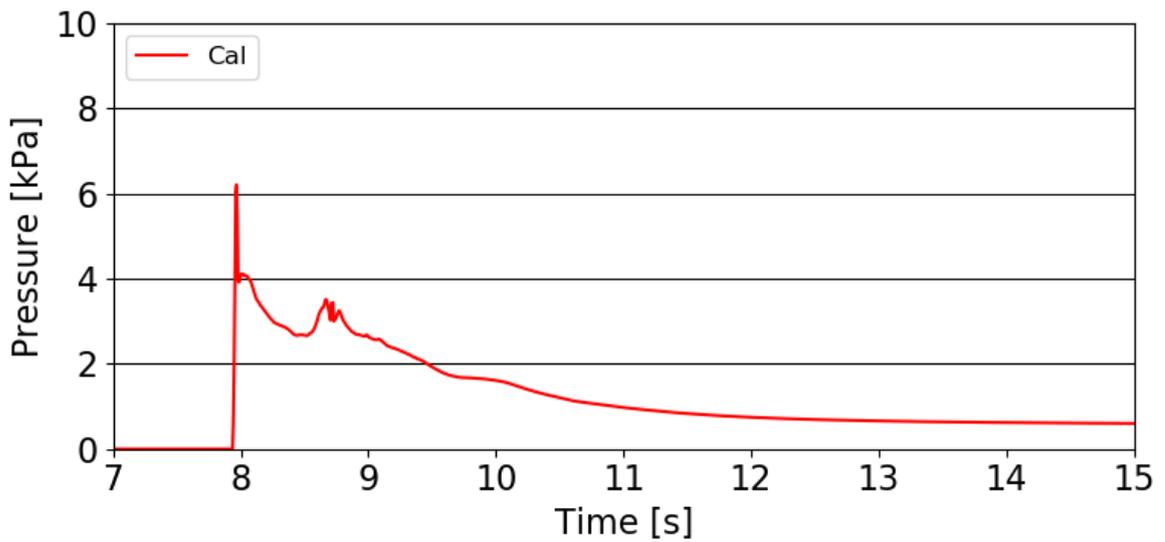


図 1-4-4-6 波圧時系列【孤立波 15.0cm，汀線-75cm，計測高さ 2.0cm】

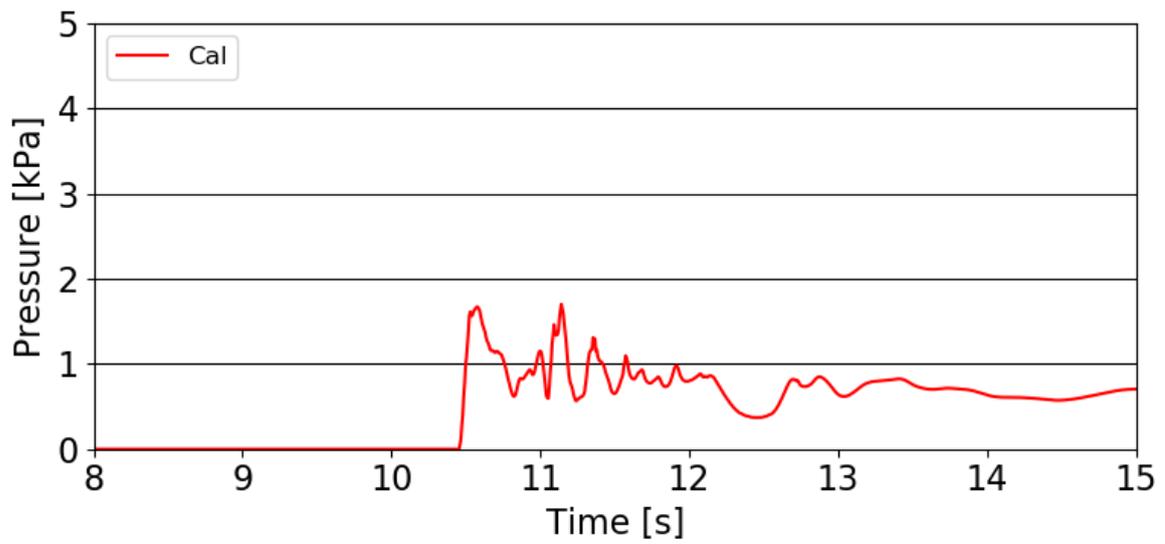


図 1-4-4-7 波圧時系列【孤立波 7.5cm, 汀線-137.5cm, 計測高さ 2.0cm】

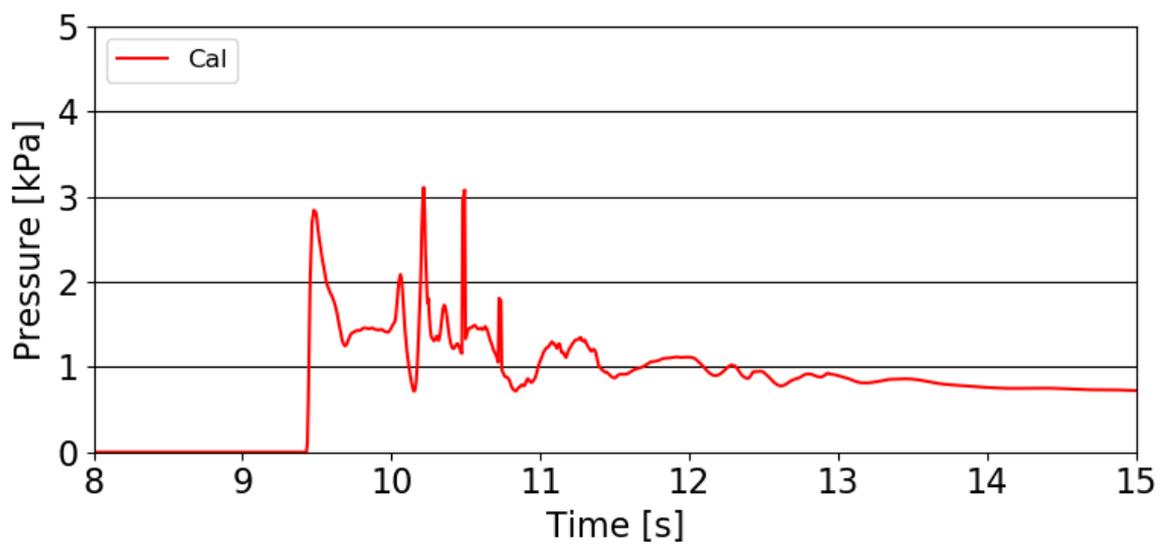


図 1-4-4-8 波圧時系列【孤立波 10.0cm, 汀線-137.5cm, 計測高さ 2.0cm】

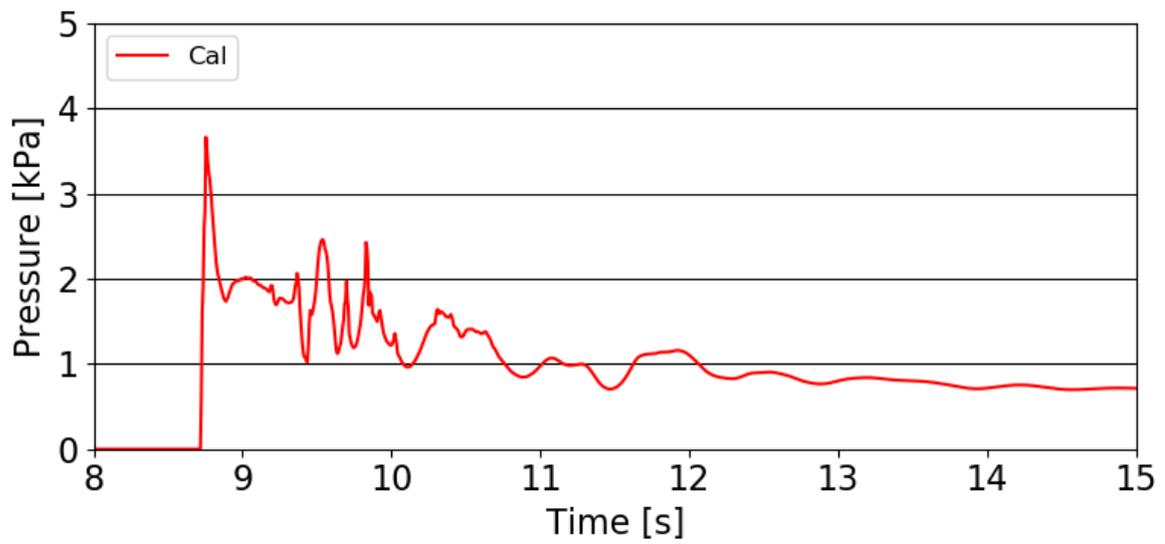


図 1-4-4-9 波圧時系列【孤立波 12.5cm, 汀線-137.5cm, 計測高さ 2.0cm】

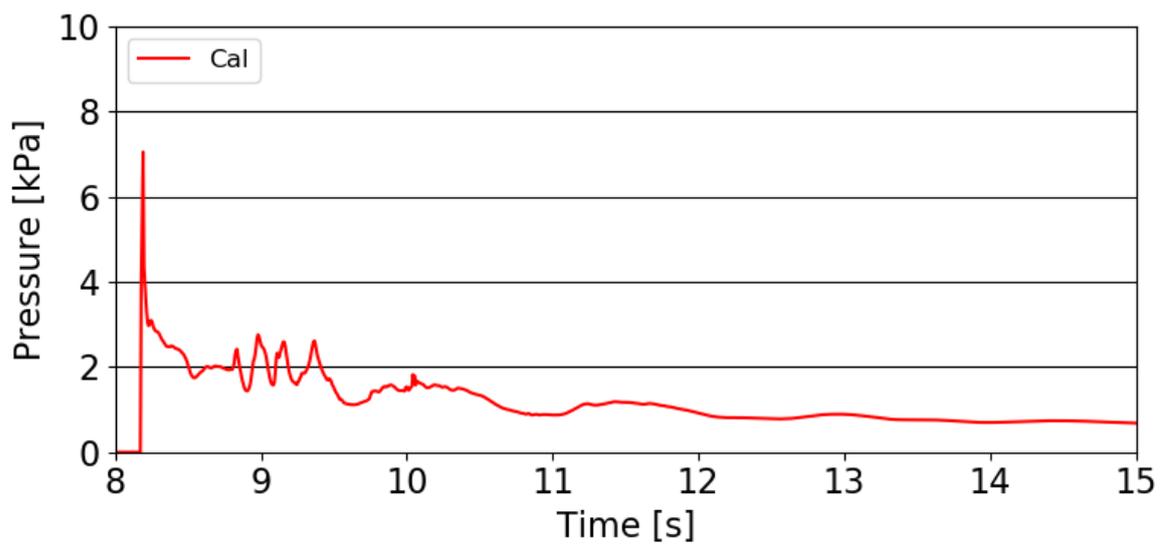


図 1-4-4-10 波圧時系列【孤立波 15.0cm, 汀線-137.5cm, 計測高さ 2.0cm】

1-4-5 解析結果

(1) Case 1 (孤立波 7.5cm, 汀線-75cm)

図 1-4-5-1, 図 1-4-5-2 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の平均値の鉛直分布を示す. また, 段波波圧開始, 持続波圧開始, 持続波圧終了の各時刻付近の 2次元流速スナップショットを図 1-4-5-3 に示す.

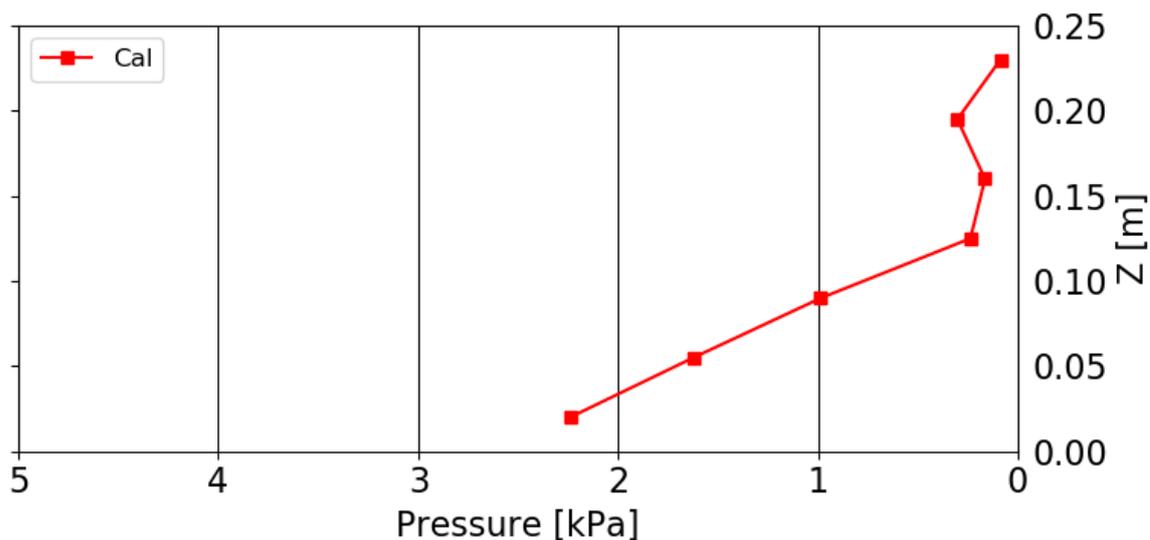


図 1-4-5-1 段波波圧の最大値【孤立波 7.5cm, 汀線-75cm】

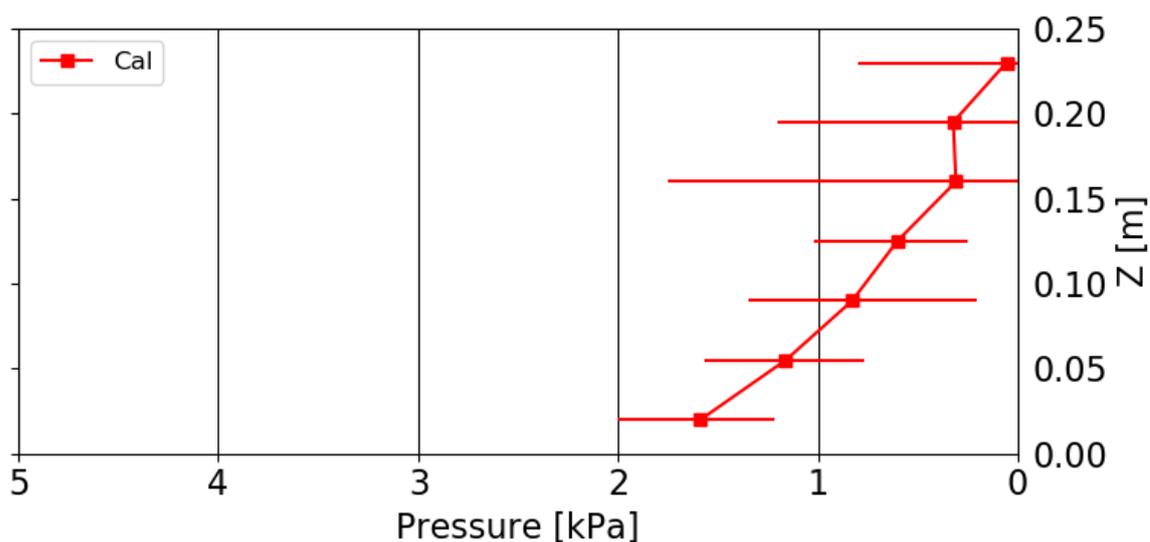


図 1-4-5-2 持続波圧の平均値【孤立波 7.5cm, 汀線-75cm】

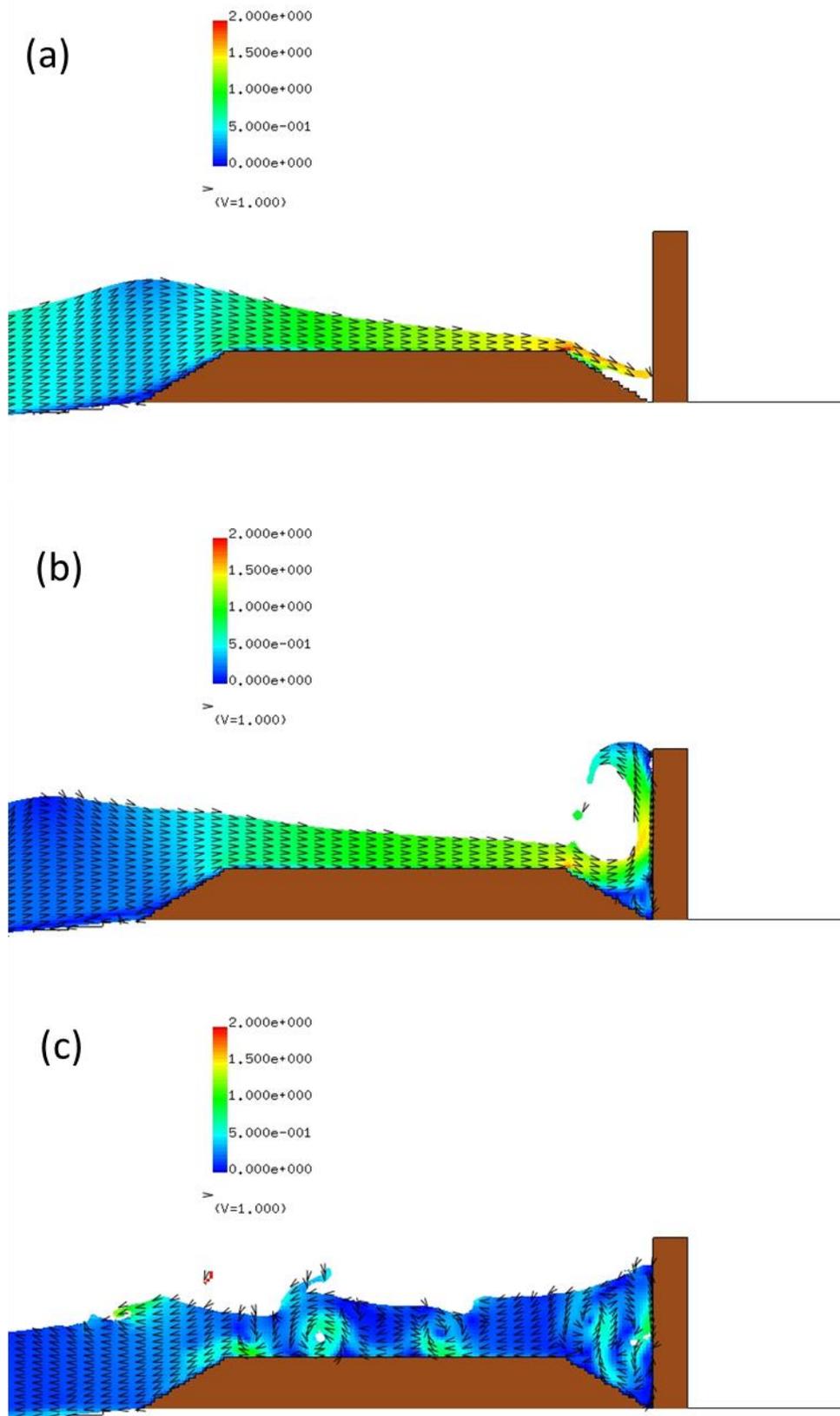


図 1-4-5-3 二次元流速スナップショット【孤立波 7.5cm, 汀線-75cm】

(2) Case 2 (孤立波 10.0cm, 汀線-75cm)

図 1-4-5-4, 図 1-4-5-5 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の平均値の鉛直分布を示す. また, 段波波圧開始, 持続波圧開始, 持続波圧終了の各時刻付近の 2 次元流速スナップショットを図 1-4-5-6 に示す.

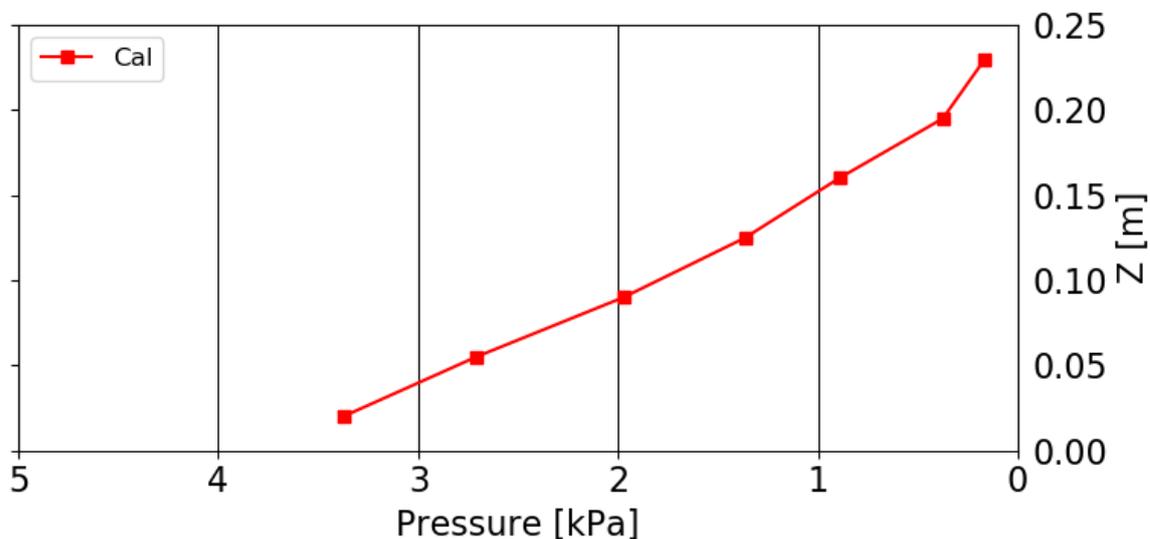


図 1-4-5-4 段波波圧の最大値【孤立波 10.0cm, 汀線-75cm】

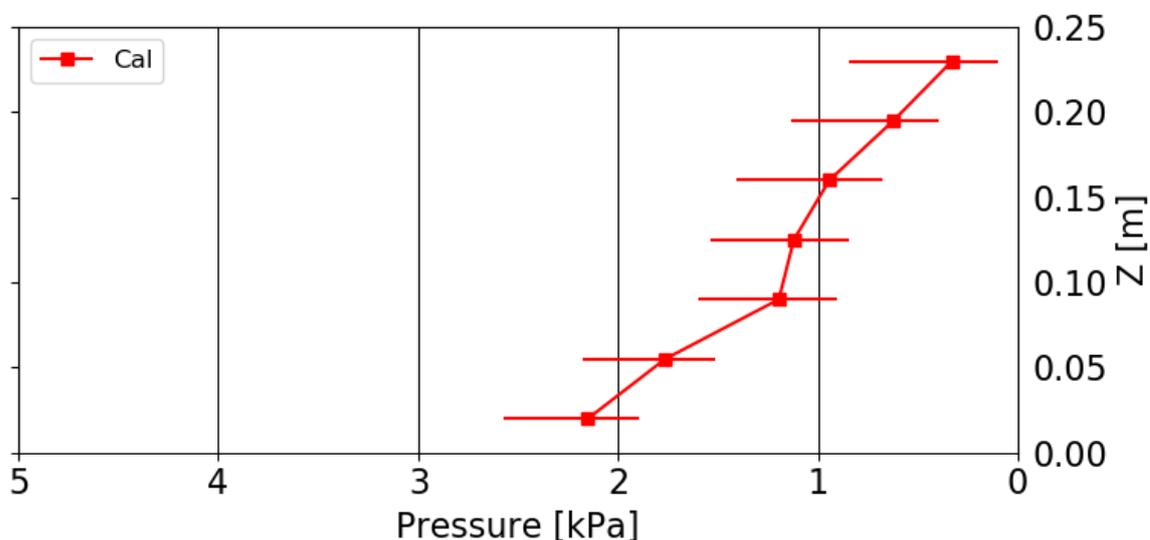


図 1-4-5-5 持続波圧の平均値【孤立波 10.0cm, 汀線-75cm】

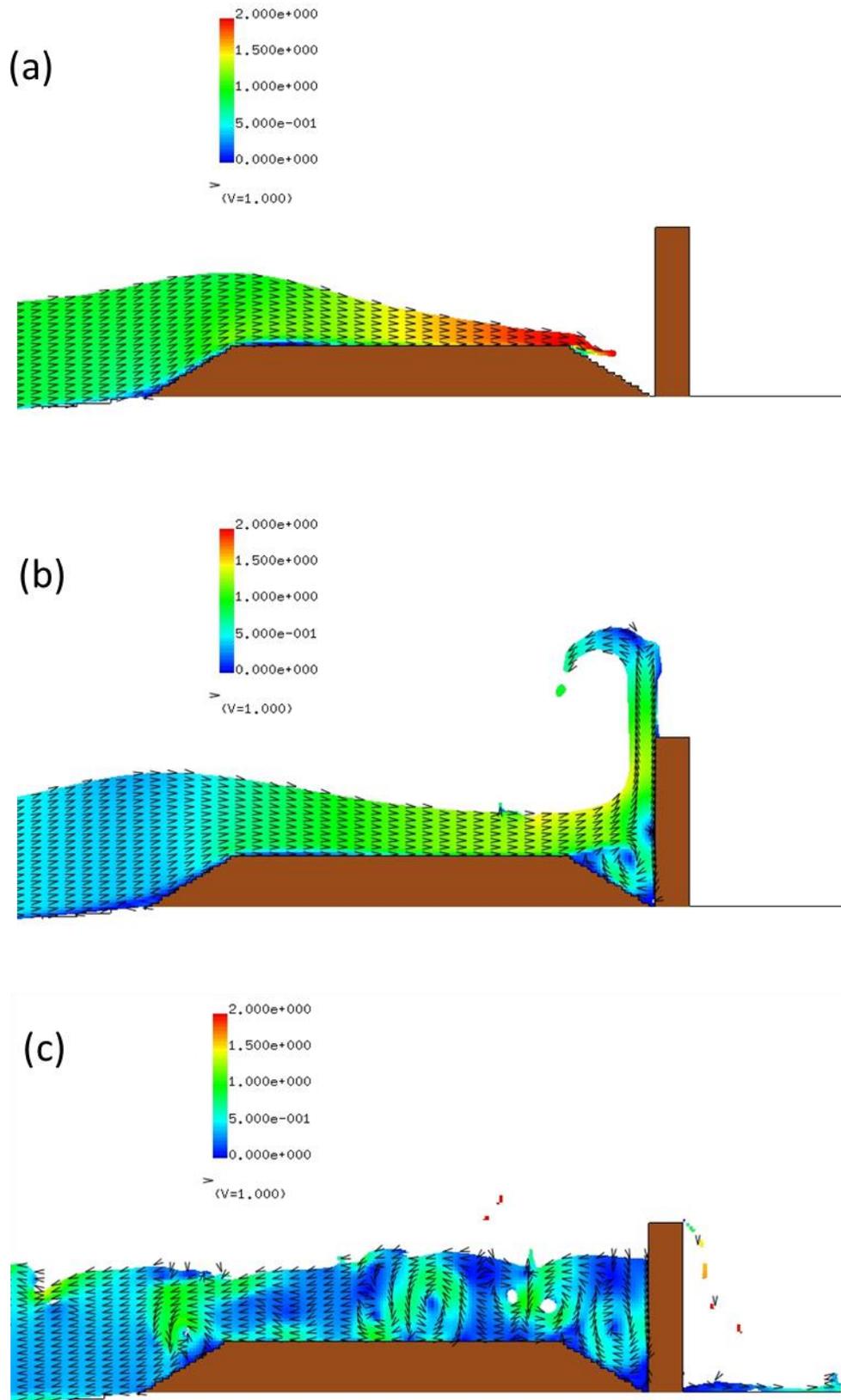


図 1-4-5-6 二次元流速スナップショット【孤立波 10cm, 汀線-75cm】

(3) Case 3 (孤立波 12.5cm, 汀線-75cm)

図 1-4-5-7, 図 1-4-5-8 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の平均値の鉛直分布を示す. また, 段波波圧開始, 持続波圧開始, 持続波圧終了の各時刻付近の 2次元流速スナップショットを図 1-4-5-9 に示す.

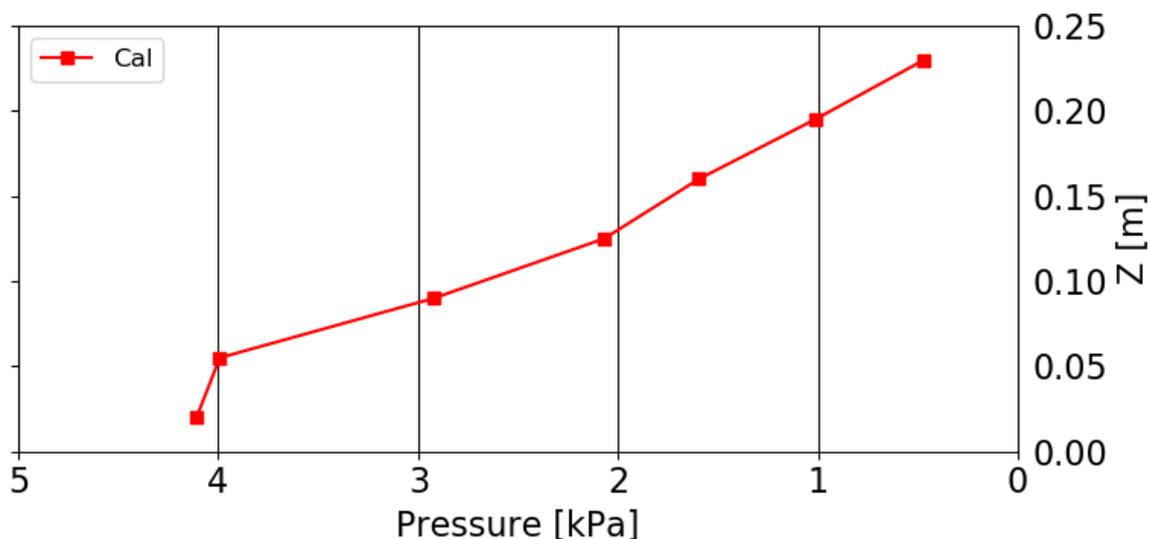


図 1-4-5-7 段波波圧の最大値【孤立波 12.5cm, 汀線-75cm】

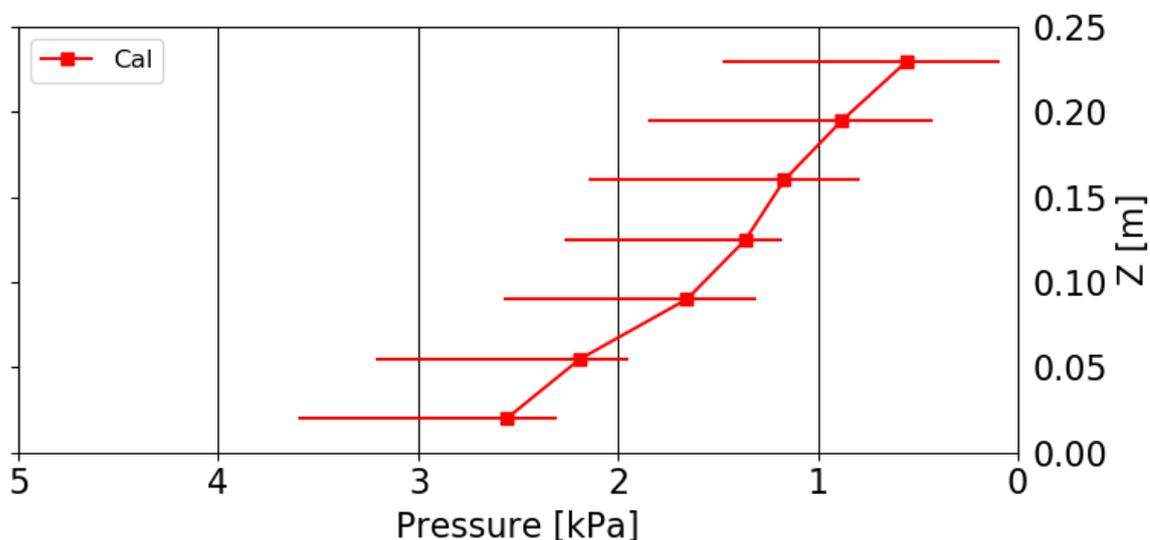


図 1-4-5-8 持続波圧の平均値【孤立波 12.5cm, 汀線-75cm】

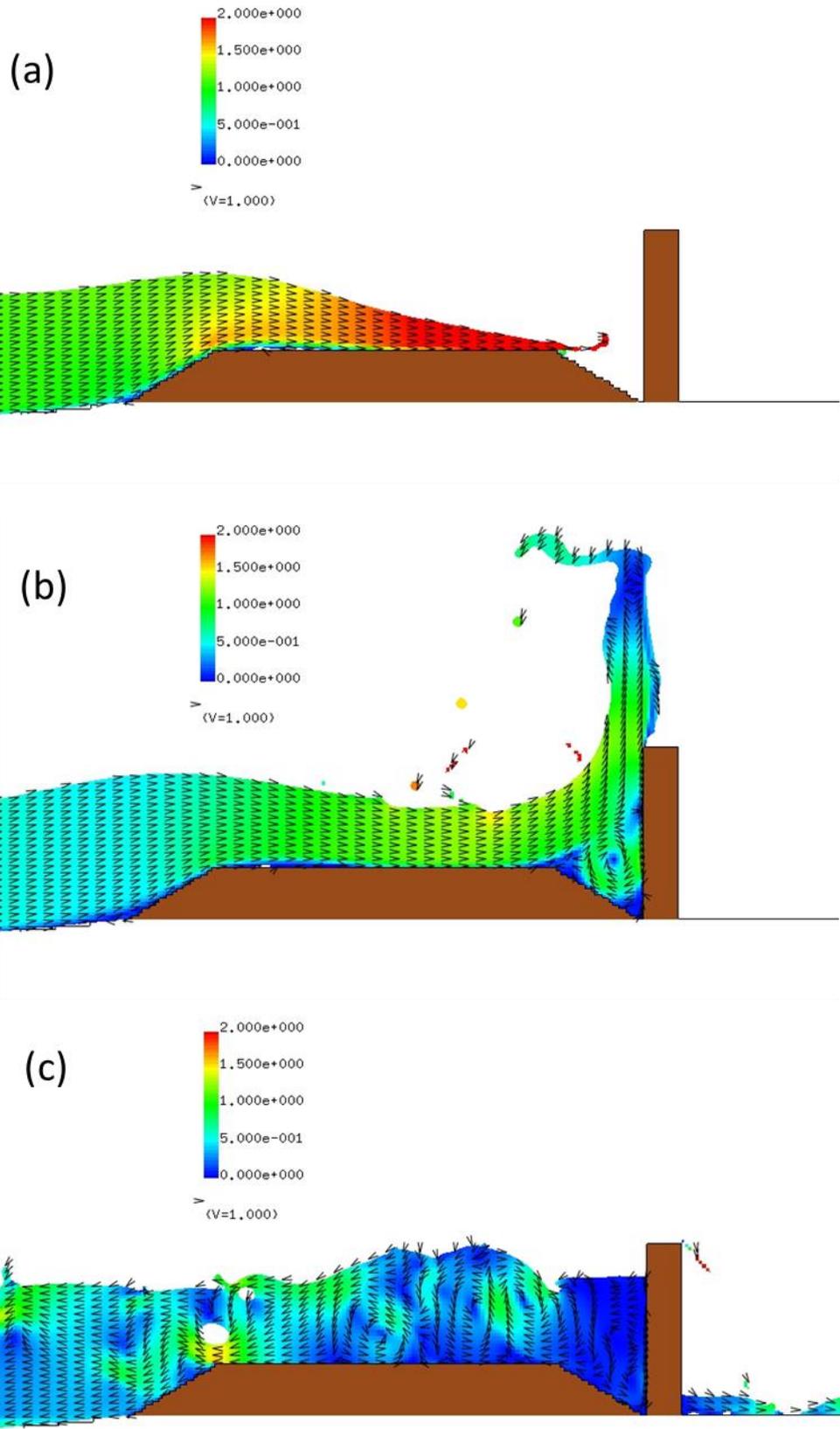


図 1-4-5-9 二次元流速スナップショット【孤立波 12.5cm, 汀線-75cm】

(4) Case 4 (孤立波 15cm, 汀線-75cm)

図 1-4-5-10, 図 1-4-5-11 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の平均値の鉛直分布を示す. また, 段波波圧開始, 持続波圧開始, 持続波圧終了の各時刻付近の 2次元流速スナップショットを図 1-4-5-12 に示す.

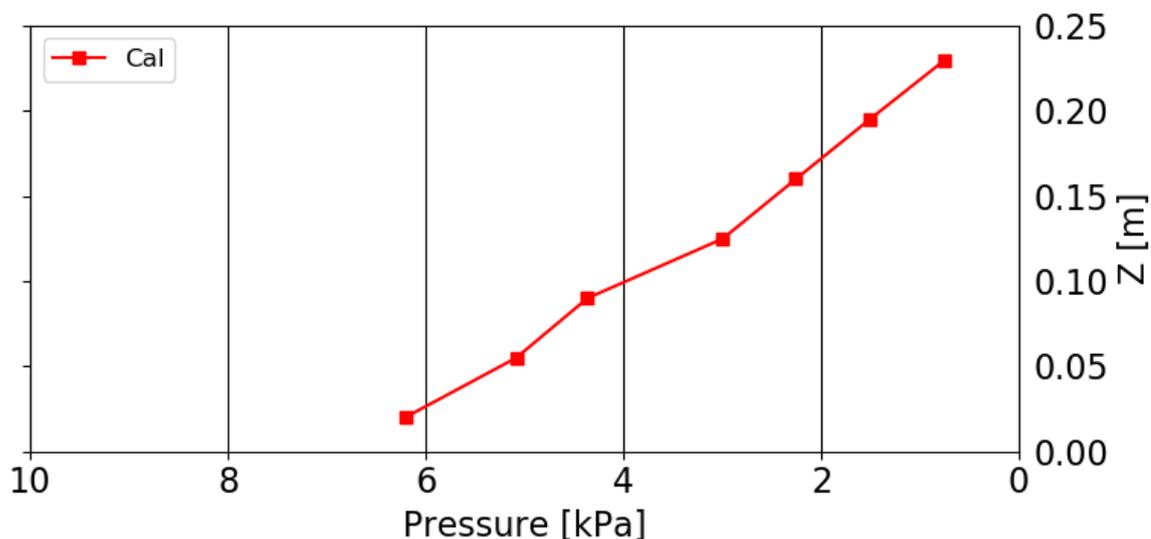


図 1-4-5-10 段波波圧の最大値【孤立波 15cm, 汀線-75cm】

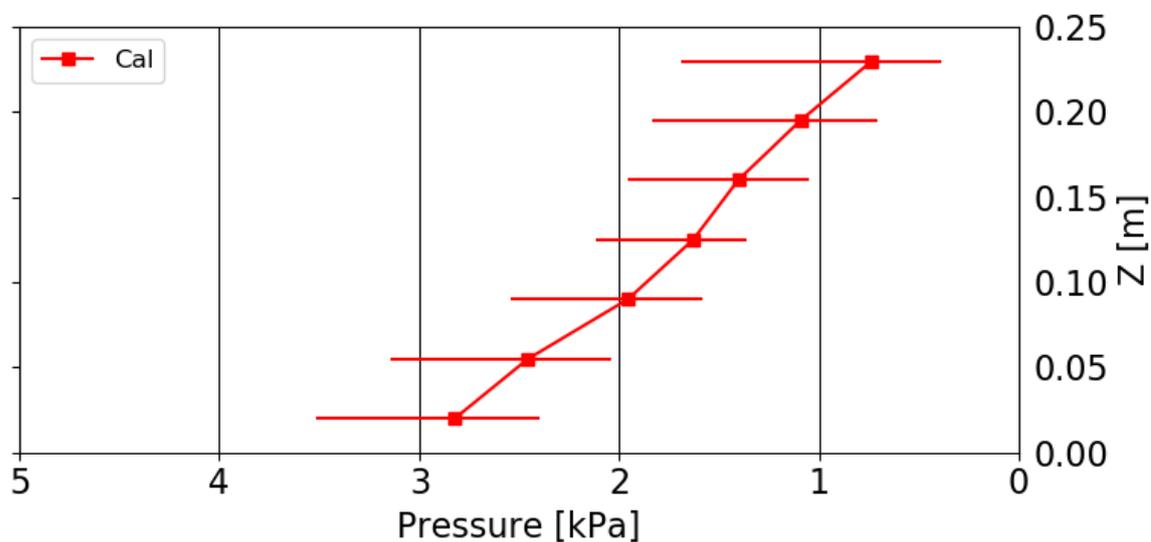


図 1-4-5-11 持続波圧の平均値【孤立波 15cm, 汀線-75cm】

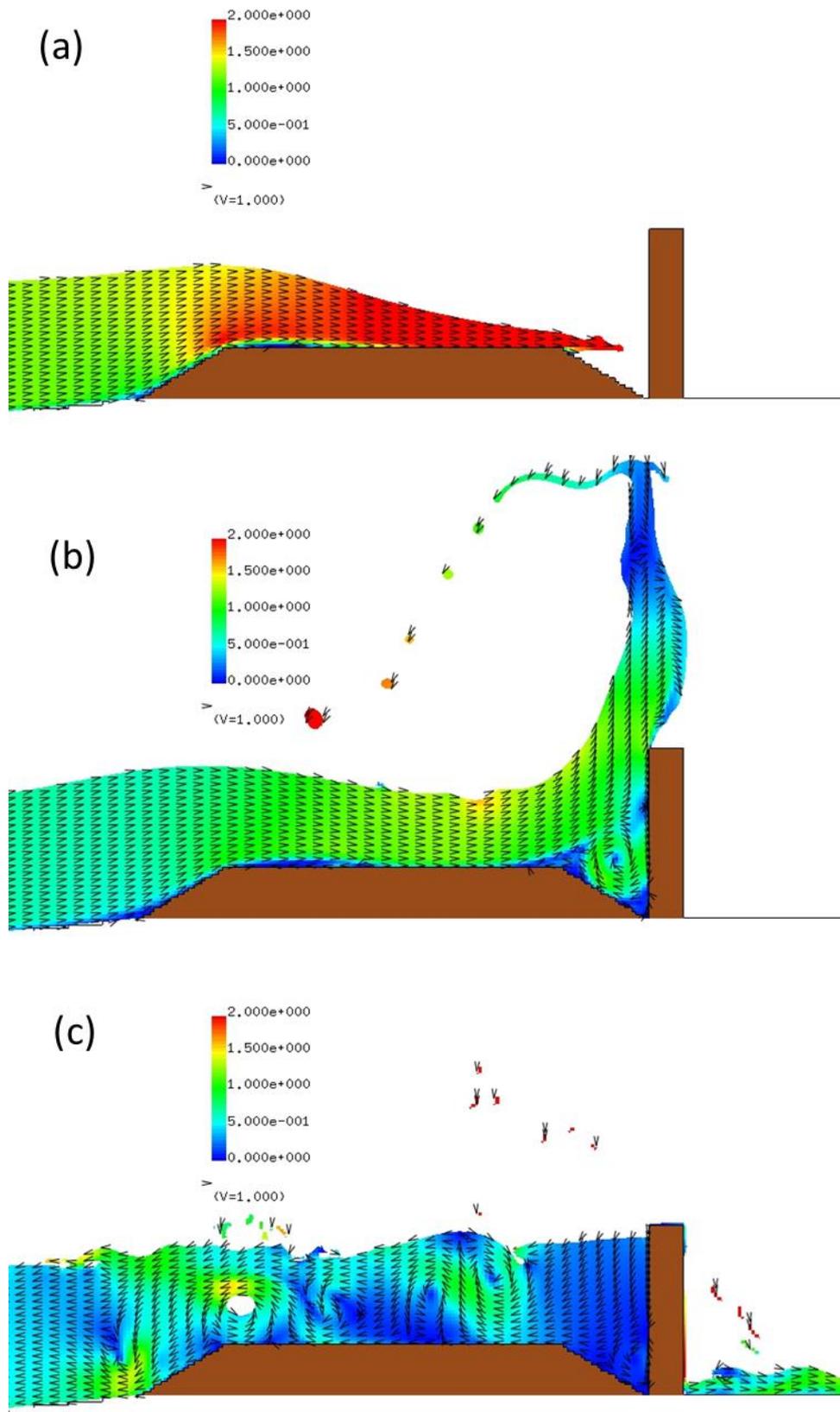


図 1-4-5-12 二次元流速スナップショット【孤立波 15cm, 汀線-75cm】

(5) Case 5 (孤立波 7.5cm, 汀線-137.5cm)

図 1-4-5-13, 図 1-4-5-14 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の平均値の鉛直分布を示す. また, 段波波圧開始, 持続波圧開始, 持続波圧終了の各時刻付近の 2次元流速スナップショットを図 1-4-5-15 に示す.

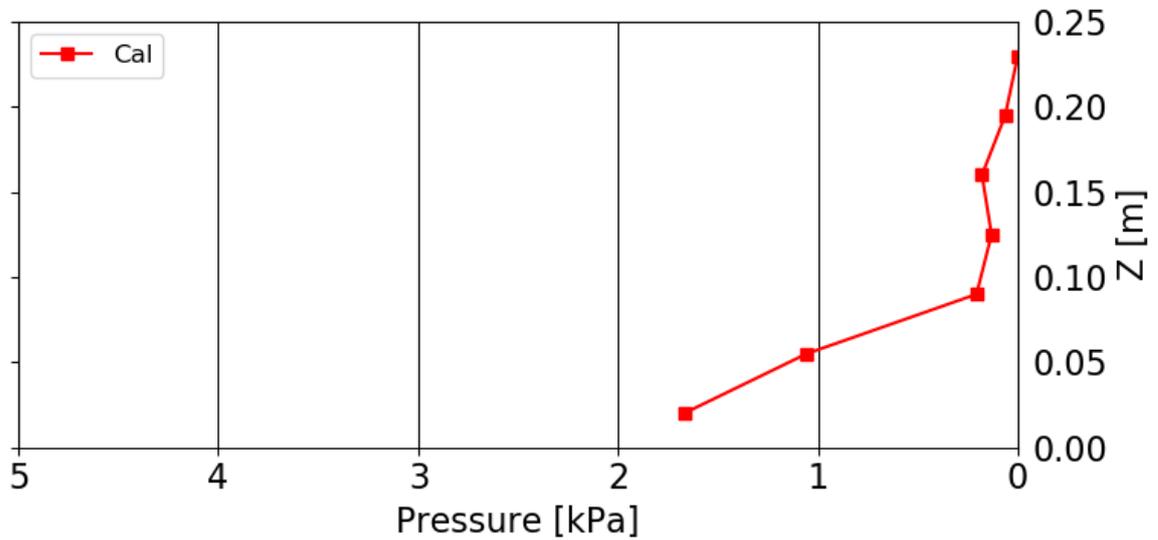


図 1-4-5-13 段波波圧の最大値【孤立波 7.5cm, 汀線-137.5cm】

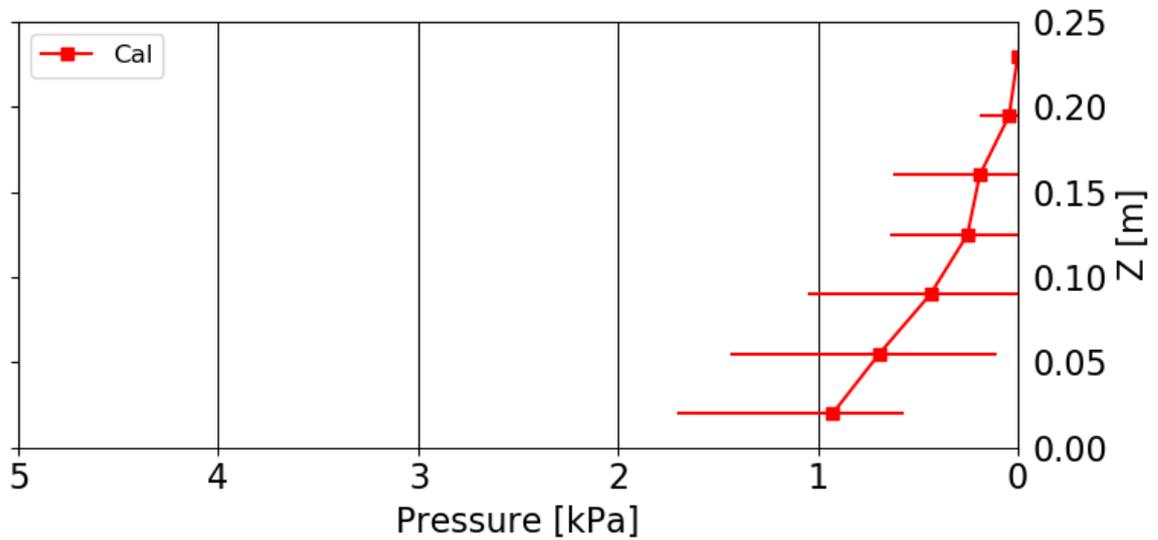


図 1-4-5-14 持続波圧の平均値【孤立波 7.5cm, 汀線-137.5cm】

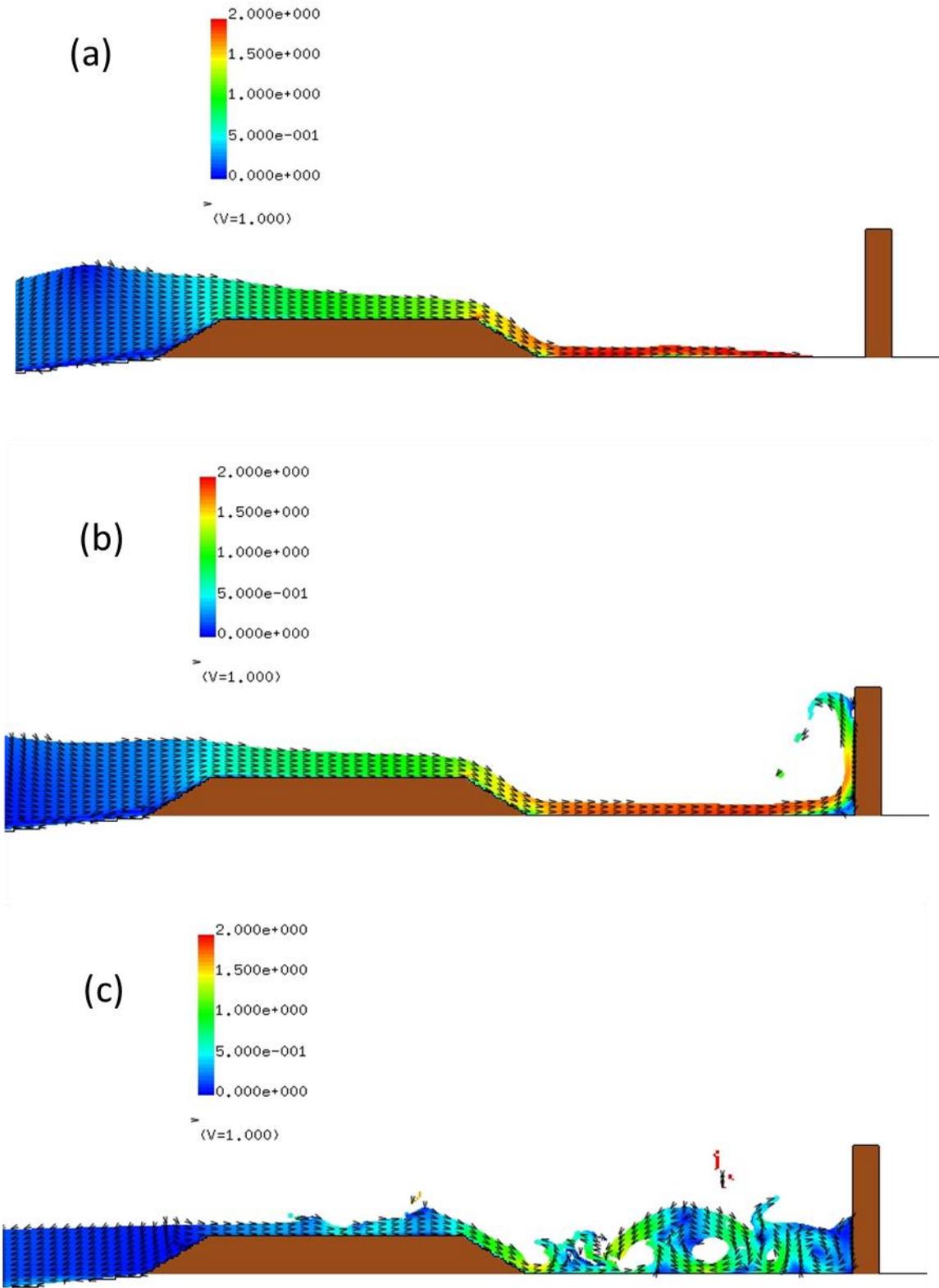


図 1-4-5-15 二次元流速スナップショット【孤立波 7.5cm, 汀線-137.5cm】

(6)Case 6 (孤立波 10.0cm, 汀線-137.5cm)

図 1-4-5-16, 図 1-4-5-17 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の平均値の鉛直分布を示す. また, 段波波圧開始, 持続波圧開始, 持続波圧終了の各時刻付近の 2次元流速スナップショットを図 1-4-5-18 に示す.

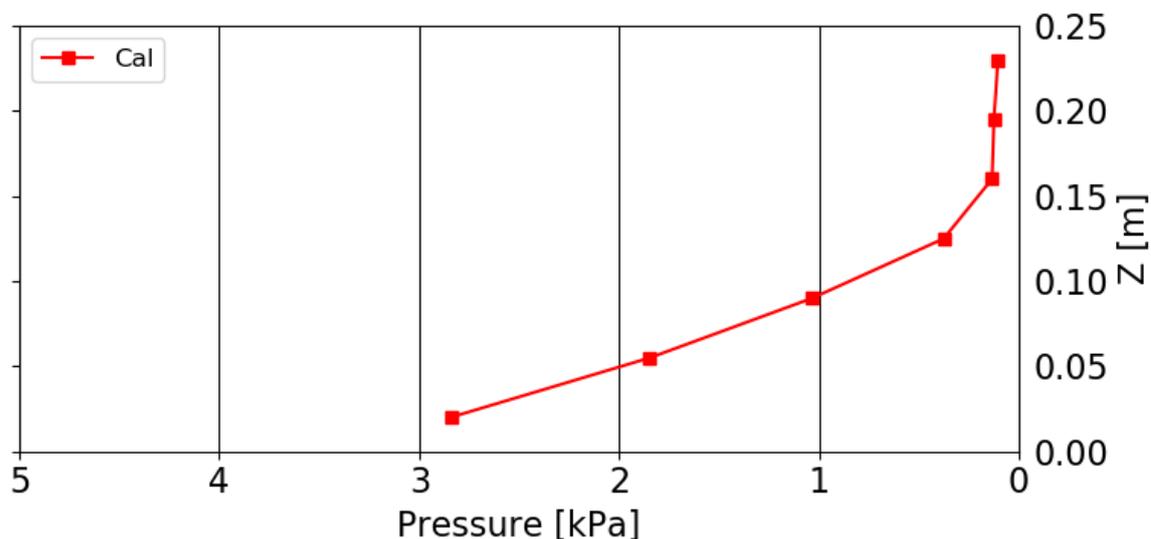


図 1-4-5-16 段波波圧の最大値【孤立波 10.0cm, 汀線-137.5cm】

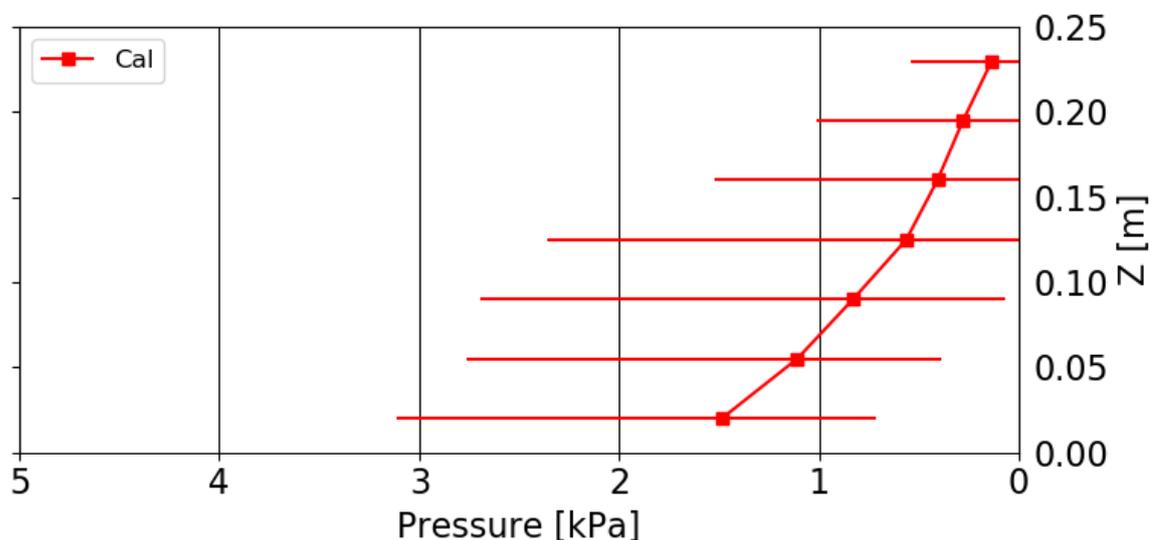


図 1-4-5-17 持続波圧の平均値【孤立波 10.0cm, 汀線-137.5cm】

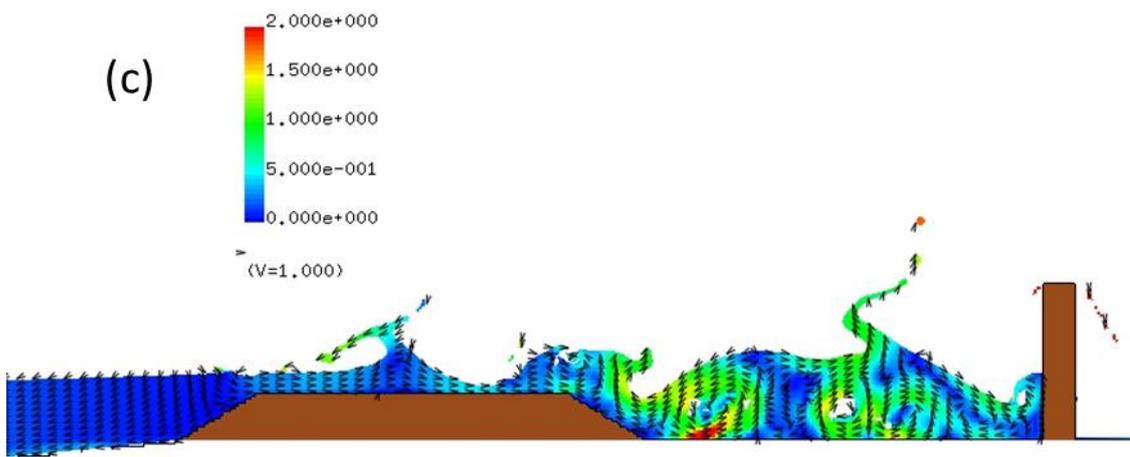
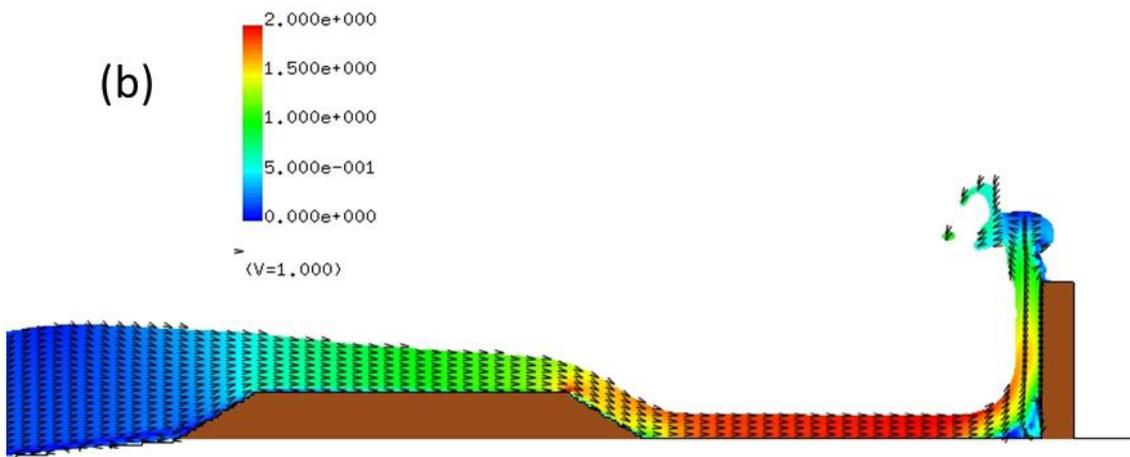
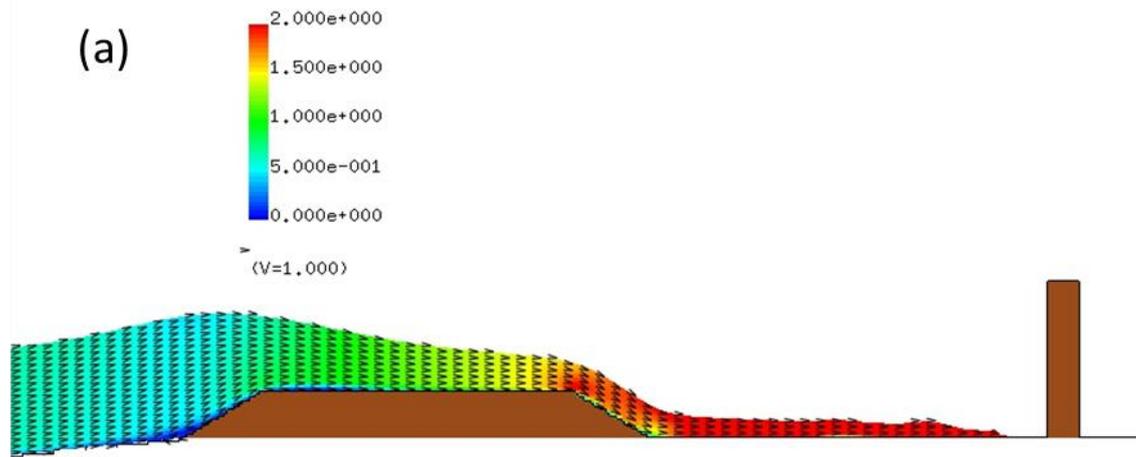


図 1-4-5-18 二次元流速スナップショット【孤立波 10cm, 汀線-137.5cm】

(7)Case 7 (孤立波 12.5cm, 汀線-137.5cm)

図 1-4-5-19, 図 1-4-5-20 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の平均値の鉛直分布を示す. また, 段波波圧開始, 持続波圧開始, 持続波圧終了の各時刻付近の 2次元流速スナップショットを図 1-4-5-21 に示す.

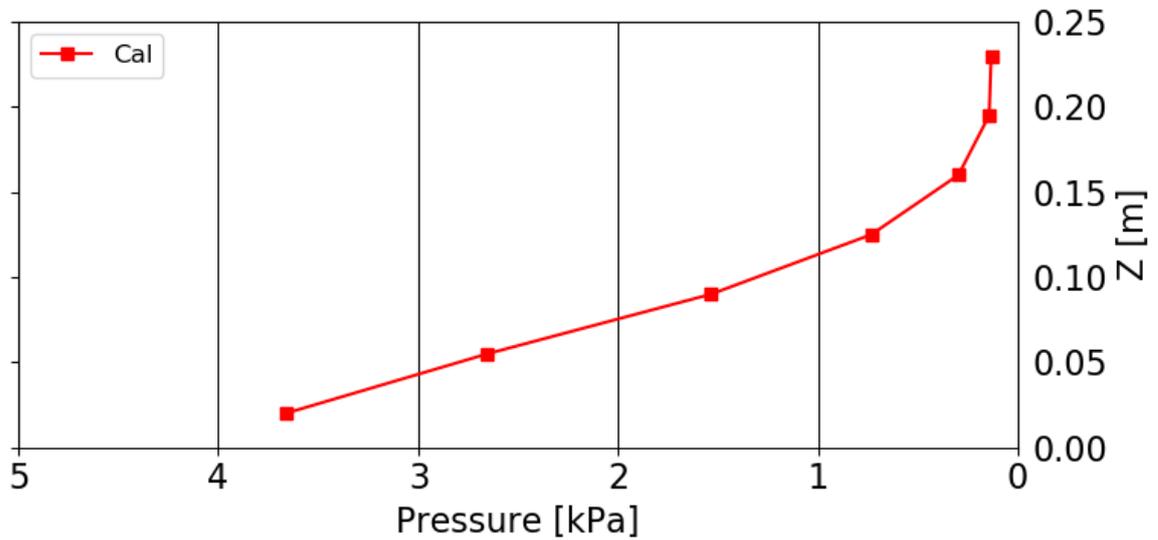


図 1-4-5-19 段波波圧の最大値【孤立波 12.5cm, 汀線-137.5cm】

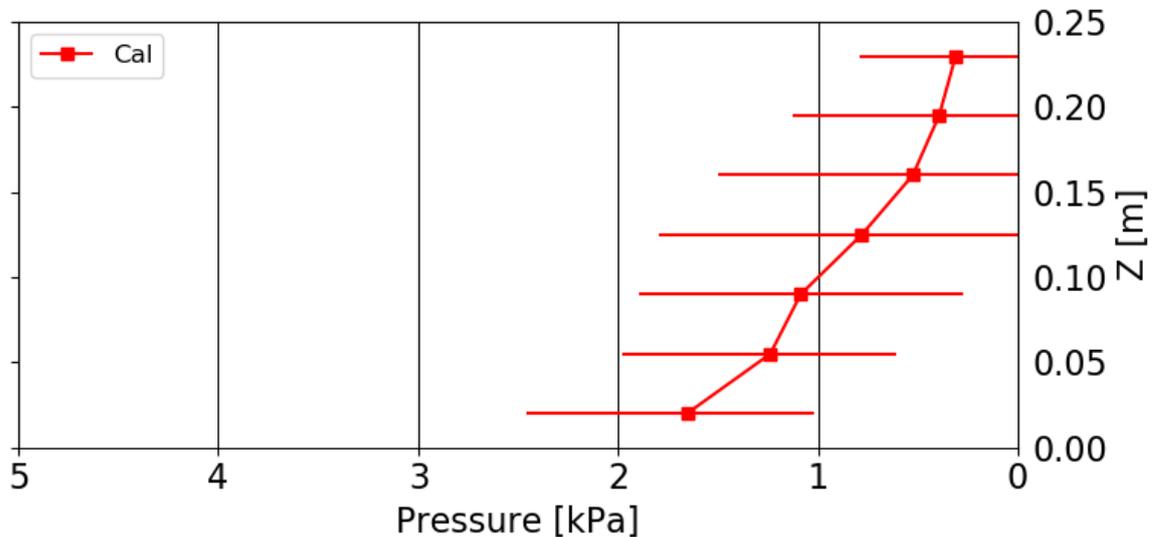


図 1-4-5-20 持続波圧の平均値【孤立波 12.5cm, 汀線-137.5cm】

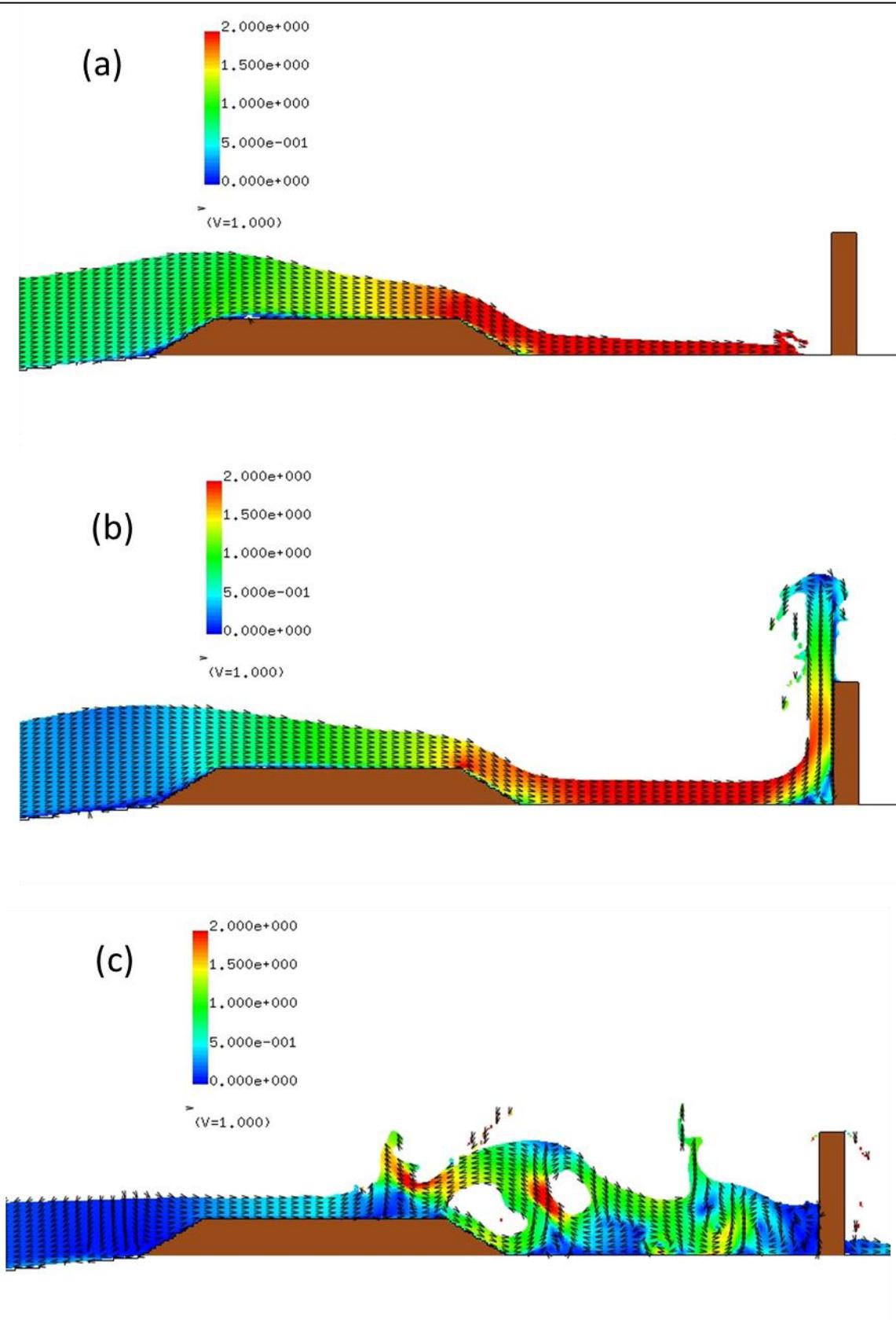


図 1-4-5-21 二次元流速スナップショット【孤立波 12.5cm, 汀線-137.5cm】

(8)Case 8 (孤立波 15cm, 汀線-137.5cm)

図 1-4-5-22, 図 1-4-5-23 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の平均値の鉛直分布を示す. また, 段波波圧開始, 持続波圧開始, 持続波圧終了の各時刻付近の 2 次元流速スナップショットを図 1-4-5-24 に示す.

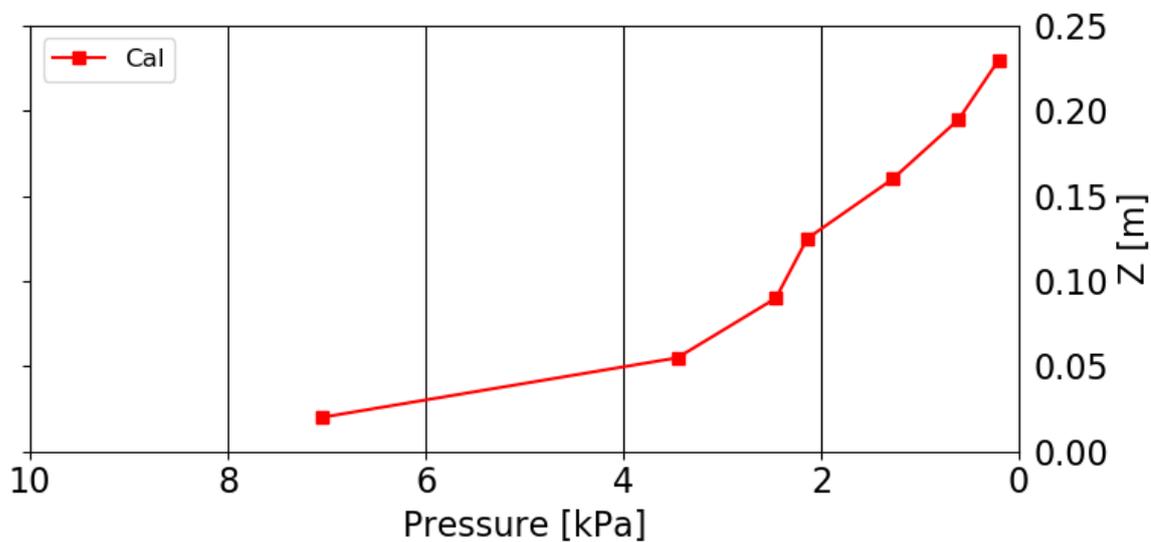


図 1-4-5-22 段波波圧の最大値【孤立波 12.5cm, 汀線-137.5cm】

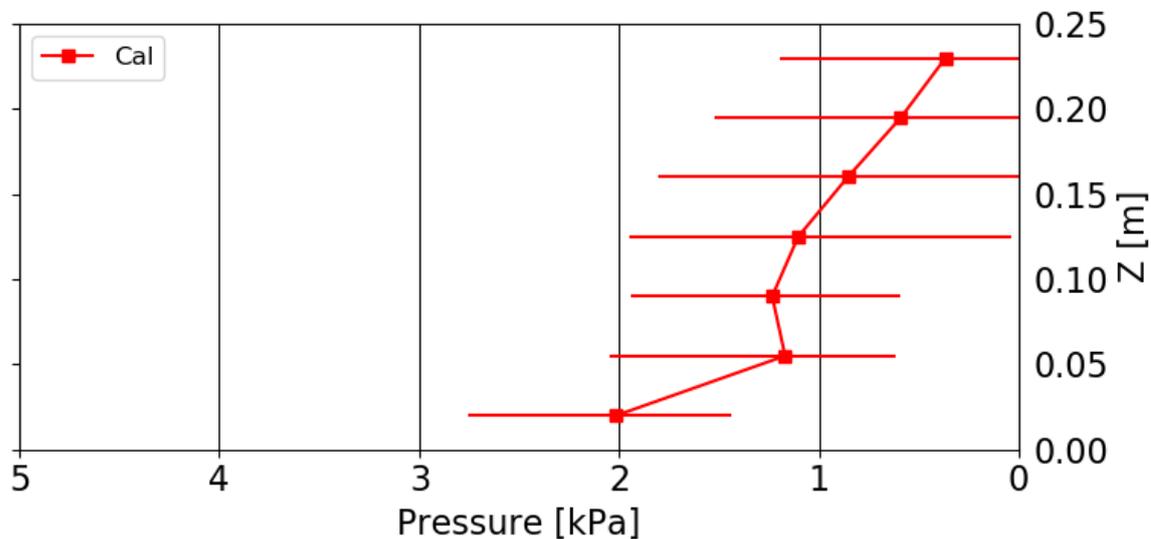


図 1-4-5-23 持続波圧の平均値【孤立波 12.5cm, 汀線-137.5cm】

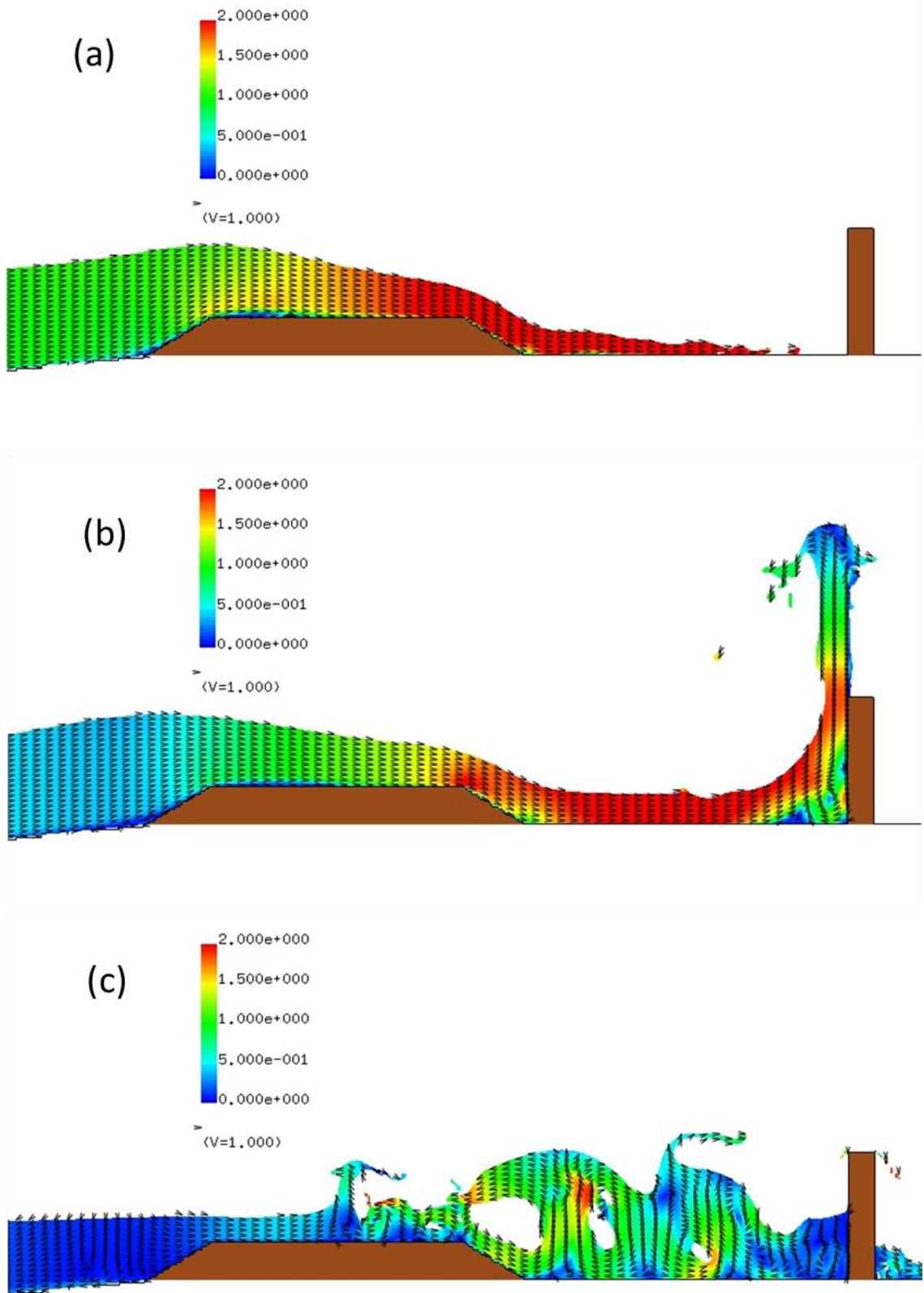


図 1-4-5-24 二次元流速スナップショット【孤立波 15cm, 汀線-137.5cm】

(9)段波波圧の最大値の比較（孤立波 7.5, 10, 12.5, 15cm）

図 1-4-5-25, 図 1-4-5-26 に防潮堤前面における段波波圧の最大値の鉛直分布の比較を防潮堤位置別にそれぞれ示す. すなわち, 図 1-4-5-25 は防潮堤位置が汀線-75cm にある場合の比較, 及び, 図 1-4-5-26 は防潮堤位置が汀線-137.5cm にある場合の比較を示す.

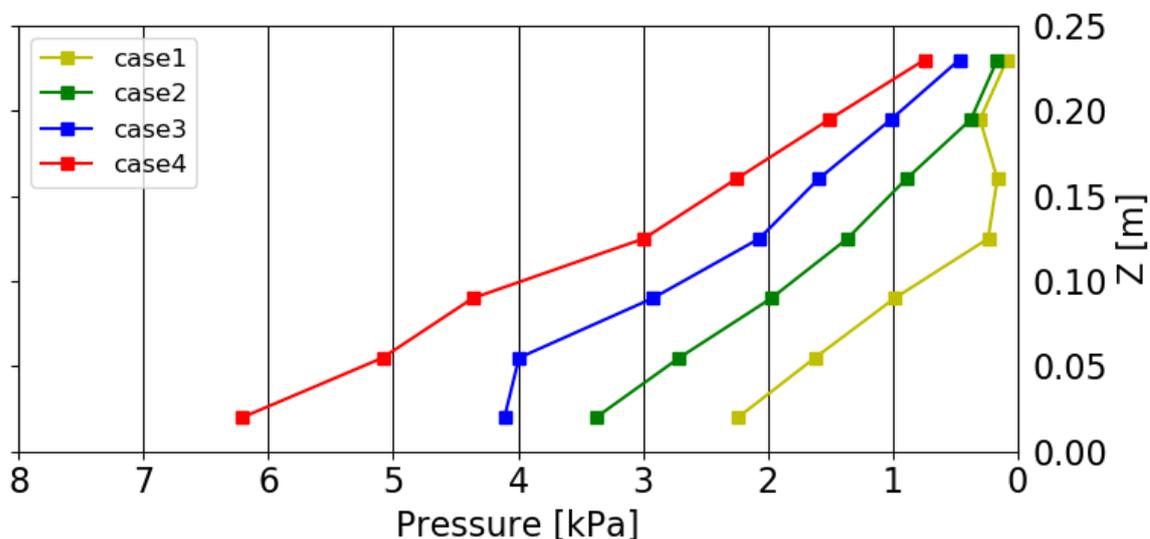


図 1-4-5-25 段波波圧の最大値の比較【孤立波 7.5, 10, 12.5, 15cm, 汀線-75cm】

図 1-4-5-26

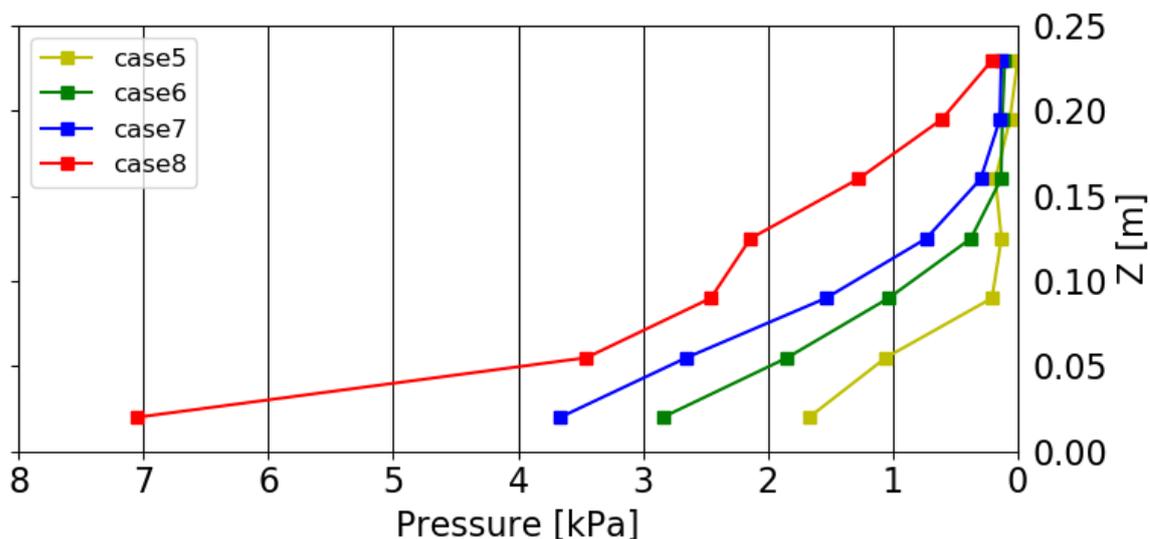


図 1-4-5-26 段波波圧の最大値の比較【孤立波 7.5, 10, 12.5, 15cm, 汀線-137.5cm】

(10) 持続波圧の平均値の比較（孤立波 7.5, 10, 12.5, 15cm）

図 1-4-5-27, 図 1-4-5-28 に防潮堤前面における持続波圧の平均値の鉛直分布の比較を防潮堤位置別にそれぞれ示す. すなわち, 図 1-4-5-27 は防潮堤位置が汀線-75cm にある場合の比較, 及び, 図 1-4-5-28 は防潮堤位置が汀線-137.5cm にある場合の比較を示す.

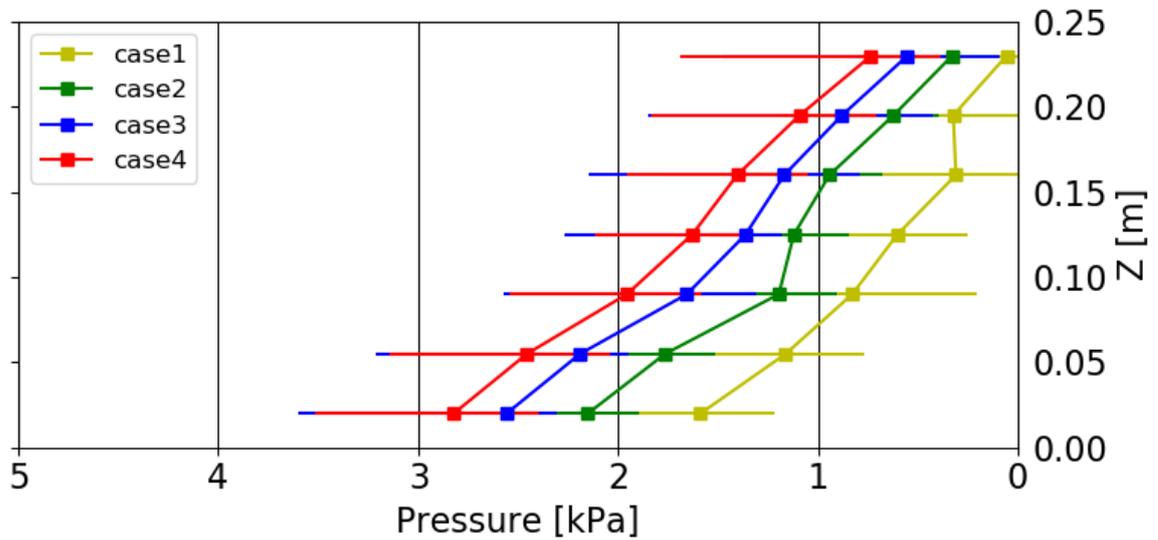


図 1-4-5-27 持続波圧の平均値の比較
【孤立波 7.5, 10, 12.5, 15cm, 汀線-75cm】

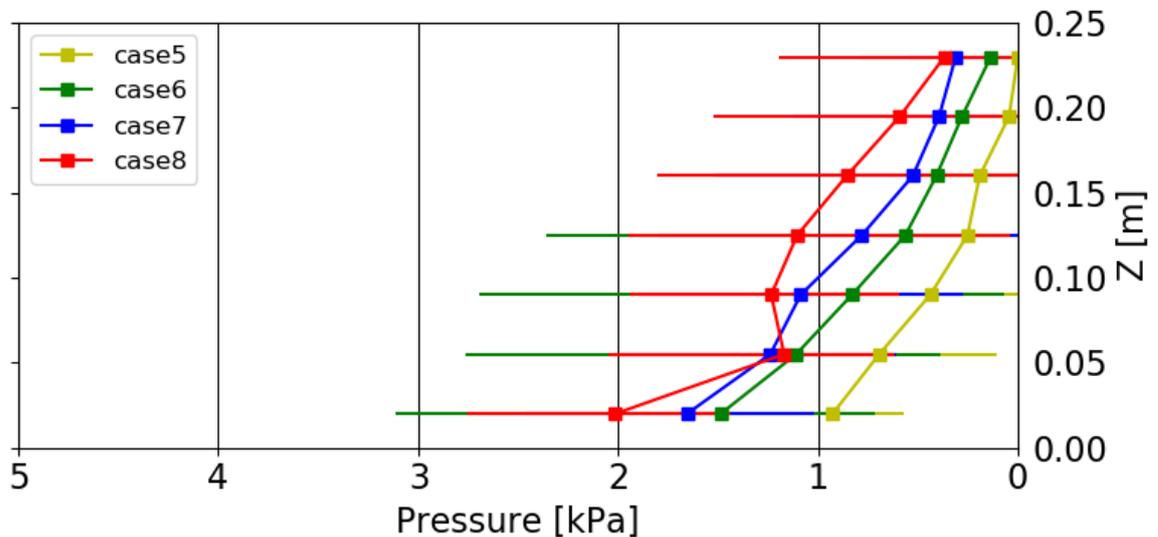


図 1-4-5-28 持続波圧の平均値の比較
【孤立波 7.5, 10, 12.5, 15cm, 汀線-137.5cm】

(11)段波波圧の最大値の試験結果との比較（孤立波 7.5, 10, 12.5, 15cm）

図 1-4-5-29, 図 1-4-5-30 に防潮堤前面における段波波圧の最大値の鉛直分布の試験結果との比較を防潮堤位置別にそれぞれ示す. すなわち, 図 1-4-5-29 は防潮堤位置が汀線-75cm にある場合の比較, 及び, 図 1-4-5-30 は防潮堤位置が汀線-137.5cm にある場合の比較を示す.

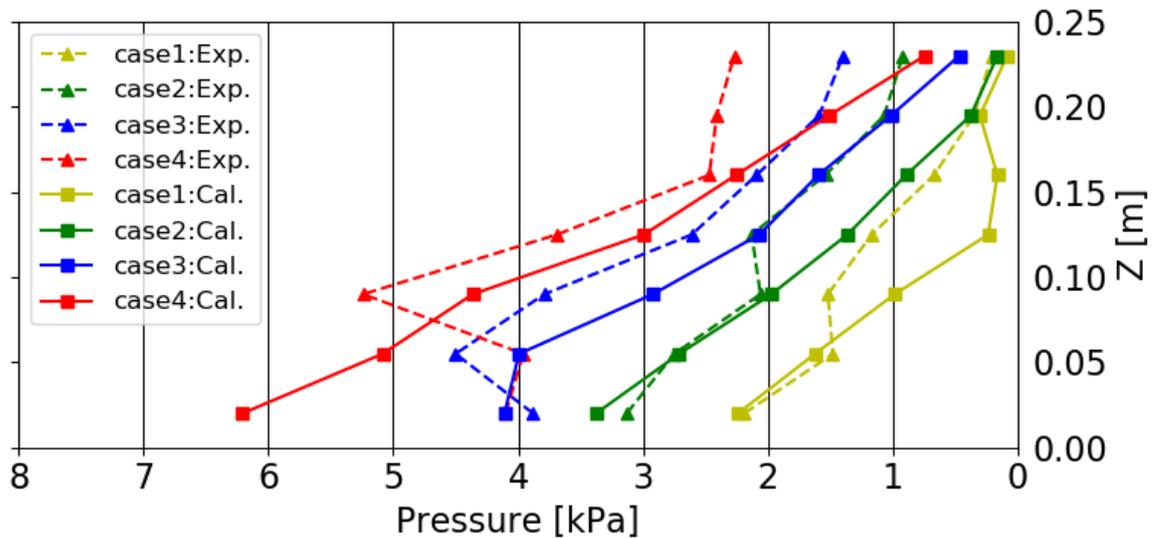


図 1-4-5-29 段波波圧の最大値の試験結果との比較
【孤立波 7.5, 10, 12.5, 15cm, 汀線-75cm】

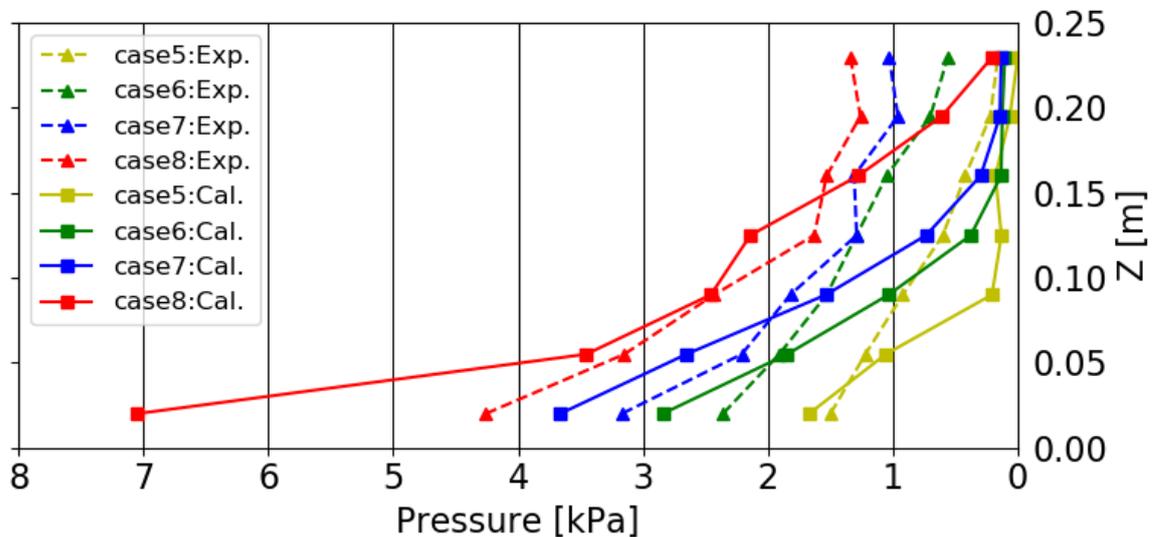


図 1-4-5-30 段波波圧の最大値の試験結果との比較
【孤立波 7.5, 10, 12.5, 15cm, 汀線-137.5cm】

1-4-6 解析結果のまとめ

1-4-5 に示した防潮堤前面に砂丘地形がある場合について，砂丘地形が固定床の場合での影響を，津波波力の解析結果から波高及び防潮堤位置別に示す．

(1) 波高

段波波圧の最大値については，全計測地点において波高が大きくなるとともに波圧も大きくなる傾向があるが，計測地点下部においては計測地点上部より更にその傾向が強くと現れる．

一方，持続波圧の平均値についても同様に，全計測地点において波高が大きくなるとともに波圧も大きくなる傾向があるが，段波波圧の最大値ほど顕著な変化は見られない．

(2) 防潮堤位置

防潮堤位置が汀線-75cm と汀線-137.5cm にある場合を同じ波高において比較すると，汀線-75cm のケースの方が，段波波圧の最大値及び持続波圧の平均値ともに全計測地点において波圧が大きくなる傾向を示している．

(3) 試験結果との比較

段波波圧最大値の鉛直分布の試験結果との比較をしたところ，波圧のオーダーは試験結果と概ね一致しており，再現性は高いことが確認された．

しかしながら，孤立波 15cm，防潮堤位置汀線-137.5cm のケース (Case8) の防潮堤下部の計測地点においては，解析結果と試験結果との間に乖離が見られた．防潮堤位置汀線-137.5cm のケースでは，砂丘を乗り越えた津波が砂丘と防潮堤の間の水平部を高速に流れ，防潮堤下部に衝突して大きな圧力を生じさせる．孤立波 15cm のケースが特に乖離が大きかったのは，水平部の流れの速度が実験よりも大きかったためと考えられる．水平部鉛直方向のメッシュ間隔や底面摩擦等を工夫することで，水平部の流れを減速してこの乖離を小さくすることが可能である．

第2章 移動床砂丘シミュレーション解析

2-1 業務の目的

平成 25 年 7 月，新規制基準や関連する審査ガイドが施行された。また，平成 25 年 11 月改正の核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律では，「発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価」を事業者に求め，「原子力規制委員会で定める時期ごとに，当該発電用原子炉施設の安全性について，自ら評価をしなければならない」としている。さらに，平成 25 年 11 月策定の「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」では，新規制基準を適用したプラントの安全性向上を「外部事象に係る確率論的リスク評価（PRA）」等を用いて評価することが求められており，リスク評価に資する施設・設備のフラジリティ評価手法の高度化が必要となっている。

本業務は，防潮堤に関する耐津波設計・フラジリティ評価手法の高度化を目的に，水理試験及びシミュレーション解析を実施し，防潮堤に作用する砂移動の影響を考慮した波力に関する試験データを取得する。水理試験結果及びシミュレーション解析結果を整理・分析することで，砂移動影響評価手法を検討する。

2-2 業務内容

本業務では，防潮堤を対象とした砂移動に関する水理試験，シミュレーション解析を行い，その結果を基に，砂移動影響評価手法を検討する。本業務の詳細については，関係者間で協議の上決定する。

水理試験には，京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーに設置されている津波再現水槽を使用することとし，シミュレーション解析用計算機は京都大学宇治地区研究所本館に設置されている Dell 社製 PowerEdge R930 (CPU: Intel® Xeon E7-4850 v3@2.20GHz×4, Memory:1,536 GB)4 台を使用する。また，シミュレーション解析には京都大学防災研究所で開発された完全 3 次元流体解析モデル（H-FRESH）を用いる。

(1) 砂移動による影響の把握

砂移動が防潮堤に与える影響について，水理試験，シミュレーション解析を行い，その結果を整理・分析することで砂移動の影響を検討するとともに，シミュレーション解析手法の適用範囲を確認する。また，砂移動が防潮堤に与える影響について，過去の文献等で得られた知見を整理・分析する。

(2) 水理試験（詳細は【水理試験編】参照）

防潮堤よりも海側に段丘が存在する場合を想定した水理試験を実施し，防潮堤に作用する砂移動の影響を考慮した波力に関する試験データを取得する。水理試験では，防潮堤に作用する波力，土圧及び砂移動の状況について整理し，砂移動が防潮堤に与える影響を評価・検討する。試験模型のイメージを図 2-2-1 に示す。

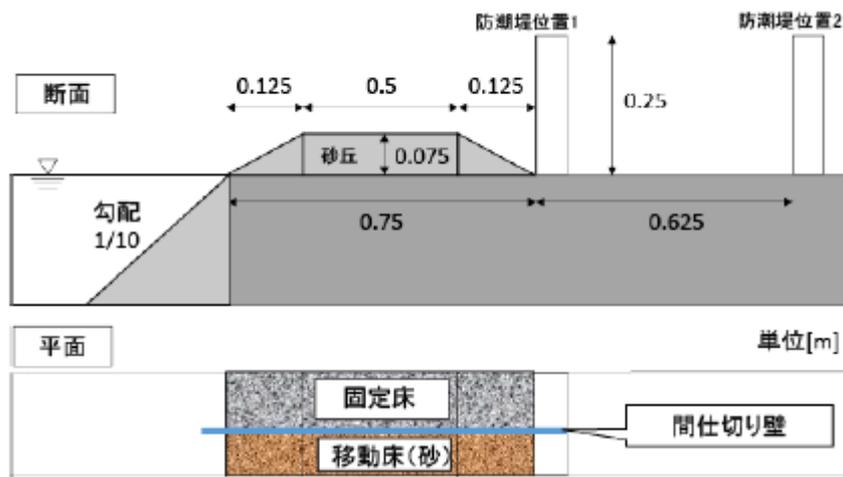


図 2-2-1 実験模型のイメージ

水理試験は、6 ケース（入力津波波形 3 種類×防潮堤位置 2 か所）とし、各ケースあたり 4 回の試行を行う。入力津波波形は、受注者が 3 種類指定する。測定項目は水位、流速、津波作用後の砂丘形状の測定および水面形状の動画撮影とする。詳細な測定位置等は、関係者間で相談して決定する。

(3) シミュレーション解析

本業務で実施する水理試験を対象としたシミュレーション解析を実施する。また、試験では実施しない海底勾配 1/40 のケースや砂粒径を変化させたケース、砂層を考慮したケースの解析も実施する。実施する解析ケースは以下に示す、計 27 ケースである。

1) 実験比較ケース：河床勾配 1 (1/10)×入力津波波形 3 ×防潮堤位置 2 ×砂粒径 1

(6 ケース)

2) 砂粒径変化ケース：河床勾配 1 (1/40)×入力津波波形 3 ×防潮堤位置 2 ×砂粒径 3

(18 ケース)

3) 砂層考慮ケース：河床勾配 1 (1/40)×入力津波波形 3 ×防潮堤位置 1 ×砂粒径 1

(3 ケース)

(4) 砂移動が防潮堤に与える影響の検討および文献調査

水理試験で計測されたデータ、動画等を基に、砂移動が防潮堤に与える影響について検討する。この際、縮尺の影響についても考察する。また、水理試験と解析結果の整合程度から解析手法の適用範囲を確認する。さらに、砂移動が防潮堤に与える影響について、過去の文献等で得られた知見を整理・分析した上で、砂粒径や砂層が砂移動に与える影響を考察する。

2-3 試験の概要（詳細は【水理試験編】参照）

実験ケースとして，下記に示した津波条件について，それぞれ 4 回試行し，津波変形，防波堤および砂丘底面に作用する圧力，津波作用後の砂丘形状の計測を行った。

- ・津波条件

孤立波 波高（3 種類；固定床試験結果を踏まえて設定）

7.5cm 【沖波】 （試行：4 回）

10.0cm " " "

12.5cm " " "

- ・防波堤位置（2 種類）

1：汀線 -75.0cm（砂丘地形直下流）

2：汀線 -137.5cm（砂丘地形-62.5cm）

※防波堤高さは 25cm

入力津波波高（3 種類）×防波堤位置（2 種類）×試行：4 回＝24 ケース

2-4 試験条件（詳細は【水理試験編】参照）

試験の概要を図 2-4-1 に示す．海底地形は単純勾配（勾配 1/10）とした．なお，試験に用いた水槽は，図 1-3-2-2 及び図 1-3-2-3 に示した試験水槽と同様である．

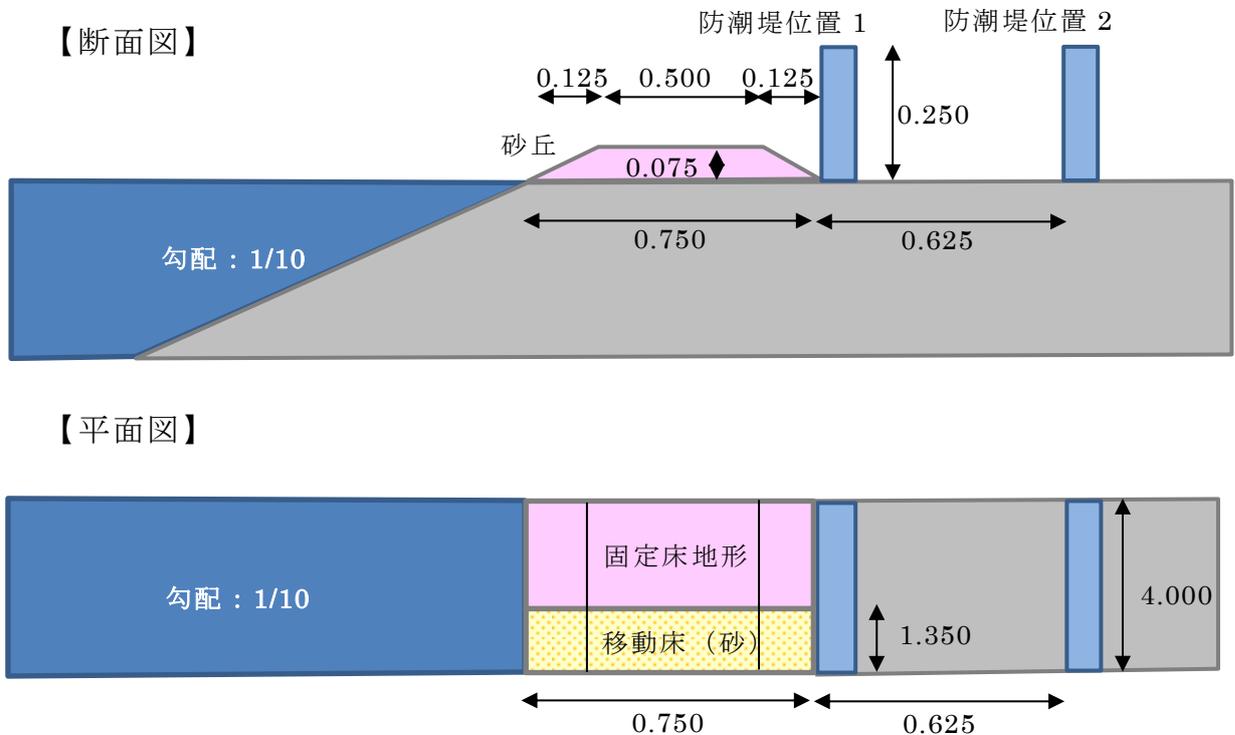


図 2-4-1 実験模型の概略図（移動床試験，単位：m）

2-5 砂移動が防潮堤に与える影響に関する既往研究

津波による砂移動に関する既往研究を、「(I) 平面的に捉えた実現象」、「(II) 断面 2 次元的に捉えた陸上構造物による洗掘現象」及び「(III) 断面 2 次元的に捉えた砂丘の侵食特性」の 3 つに大別して整理を行う。

まず、(I) 平面的に捉えた実現象としては、2011 年東北地方太平洋沖地震の津波により生じた地形変化に関する研究事例が近年多く挙げられる。例えば、加藤ら¹⁾は、岩手県の高田海岸，越喜来海岸，両石漁港海岸，金浜海岸，大槌川河口を対象に、2011 年 5 月に航空レーザ測量，深淺測量，ボーリング，スウェーデン式サウンディングを実施し，東北地方太平洋沖地震の津波による地形変化を明らかにした。これを受けて，被害が最も大きかった地域の一つである岩手県陸前高田市を対象とし，山下ら²⁾は，当該地域における大規模土砂移動を対象とした再現計算を実施し，津波の遡上過程や浸水高，地形変化量や海域における堆積土砂の分布傾向を良好に再現した。有光ら³⁾も同地域において，津波移動床モデルにおける飽和浮遊砂濃度および流砂量係数の設定が地形変化の再現性に及ぼす影響を把握するために，地形変化の再現計算を行った。また，今井ら⁴⁾は，北上川河口部やその周辺地域における地形変化の過程を明らかにすることを目的として，津波土砂移動解析を実施し，河口砂州の大規模な洗掘は押し波時に生じ，同時に背後耕作地に土砂が堆積したことや河口部沖側の洗掘は引き波時に生じていたことを明らかにした。さらに，諏訪ら⁵⁾は，青森県から千葉県の大域を対象に，航空レーザ測量，空中写真等を用いて，津波による砂丘，盛土，丘および地盤等の地形変化を把握し，特異な地形変化が生じた千葉県旭市の盛土について，航空レーザ測量等による実態分析と津波シミュレーションによる侵食量の試算を行い，局所的な侵食の発生状況およびその要因の考察を行った。

次に，(II) 断面 2 次元的に捉えた陸上構造物による洗掘現象としては，多数の既往研究事例が存在する。例えば，有川ら⁶⁾は直立型堤防を用いて，越流した際に生じる背後の洗掘深について，スケールの異なる水理模型実験を用いて検討し，越流深と洗掘深は相関が高い比例関係にあり，沈降速度に応じた相似則により定量的に評価できることを示した。吉森ら⁷⁾は複数ののり面勾配条件下における堤防裏のり尻部の洗掘現象の基本特性を把握すると共に，洗掘対策工の配置条件を工夫し，堤防の耐越流侵食性向上効果の検討を行った。

一方，(III) 断面 2 次元的に捉えた砂丘の侵食特性としては，沿岸に砂丘等が存在する背後地域では津波による減災効果が確認されていることから，津波減勢効果に関する研究がいくつか行われている。例えば，二階堂ら⁸⁾や柳沢ら⁹⁾が水理模型実験から津波越流時の砂丘の侵食実態を分析している。また，二階堂ら¹⁰⁾が津波越流による砂丘の侵食実態および砂丘侵食への津波移動床計算の適用性を検討するため，ダムブレイク型造波による砂丘の侵食実験とその再現計算を行っている。これらの研究は，砂丘を堤体としており，当該堤体の表層が侵食される研究事例である。しかしながら，砂丘の更に岸側に別途防潮堤があるような検証計算を実施した既往研究は存在しない。

そこで本業務では、津波による砂移動が防潮堤に及ぼす影響の評価手法の検討に資するため、津波が遡上し、陸にある砂丘のような土塊に衝突・越流する際に、津波によって段丘が侵食される河床変動解析を実施し、砂移動が防潮堤に与える影響について検討する。

- 1) 加藤史訓・野口賢二・諏訪義雄・坂上敏彦・佐藤祥昭：津波による地形変化に関する現地調査，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.68, No.2, pp.174-179, 2012.
- 2) 山下啓・菅原大助・高橋智幸・今村文彦・齋藤友一・今任嘉幸・甲斐恭・上原均・加藤季広・中田一人・坂良太郎・西川朝雄：岩手県陸前高田市における2011年東北地方太平洋沖地震津波による大規模土砂移動の再現計算，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 71, No.2, pp.499-504, 2015.
- 3) 有光剛・松田周吾・村上嘉謙・志方建仁・川崎浩司・三島豊秋・清水涼太郎・菅原大助：津波移動床モデルの再現性に及ぼす流砂パラメータの影響，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.73, No.2, pp.589-594,2017.
- 4) 今井健太郎・菅原大助・高橋智幸・岩間俊二・田中仁：2011年東北津波における北上川河口部の大規模洗掘・堆積に関する数値的検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.71, No.2,pp.247-252, 2015.
- 5) 諏訪義雄・二階堂竜司・浜口耕平・原野崇・渡辺国広・中園大介・原文宏・青木伸一：航空レーザ測量を用いた東北地方太平洋沖地震津波による地形変化の実態，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.72, No.2, pp.181-186,2016.
- 6) 有川太郎・池田剛・窪田幸一郎：越流による直立型堤防背後の洗掘量に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学）Vol.70, No.2, pp.926-930,2014.
- 7) 吉森佑介・倉上由貴・二瓶泰雄・森田麻友：堤防裏のり尻部の洗掘現象の把握と対策工配置条件の基礎的検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.71, No.2, pp.1117-1122,2015
- 8) 二階堂竜司・青木伸一・加藤茂・岡辺拓巳：津波越流時の砂丘・盛土の侵食機構に関する研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.71, No. 2, pp.425-430,2015.
- 9) 柳沢舞美・二瓶泰雄・山口晋平・川邊翔平・龍岡文夫：海岸砂丘と補強盛土技術を組み合わせた新形式防潮堤の提案，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68, No.2, pp.886-890,2012
- 10) 二階堂竜司・青木伸一・荒木進歩・常田賢一・MUHAJJIR：ダムブレイク型造波による砂丘の津波越流実験と数値計算，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.72, No.2, pp.619-624,2016.

2-6 シミュレーションの概要

対津波設計・フラジリティ評価手法の高度化に資することを目的に、別途実施される水理模型試験結果を対象とした完全三次元流体解析モデル（H-FRESH）による数値シミュレーションを実施することで、砂移動が防潮堤に与える影響について検討する。また、掃流砂・浮遊砂モデルの詳細は付録に記載した。なお、流入土砂量の調整係数は掃流砂、浮遊砂ともに0であり、摩擦速度の調整係数は1.0としている。

2-7 解析条件

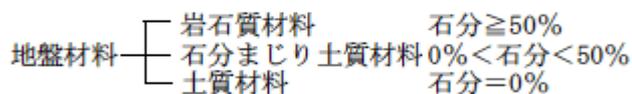
解析の概要及びケース数を表 2-7-1 に示す。Case1-1～Case1-6 は、2-2 の業務内容で上述した(3) シミュレーション解析の 1)「実験比較ケース」に該当し、Case2-1～Case2-18 は、2)「砂粒径変化ケース」に該当し、Case3-1～Case3-3 は、3)「砂層考慮ケース」に該当する。

すなわち、1)「実験比較ケース」では、河床勾配は一律 1/10 とし、入力波高及び堤体位置を可変とする。

2)「砂粒径変化ケース」では、河床勾配は一律 1/40 とし、入力波高、堤体位置、及び、砂粒径を可変とする。地盤材料の工学的分類方法（地盤工学会基準：JGS 0051）に示されている図 2-7-1 の分類によると、試験材料の珪砂 6 号（粒径約 0.2mm）は細砂に相当する。本解析では、試験材料の 0.23mm に加え、試験材料よりも細かい粒径として、粘土・シルト分に相当する 0.005mm、及び、試験材料よりも粗い粒径として、粗砂に相当する 0.85mm の 2 粒径を設定し、粒径の違いによる砂移動・河床変動の違いを確認する。

粒 径 (mm)										
0.075		2			75					
0.005	0.25	0.85	4.25	19	300					
粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石	巨礫	
		砂			礫			石		
細粒分		粗粒分						石分		

図－1 地盤材料の粒径区分とその呼び名



図－2 地盤材料の工学的分類体

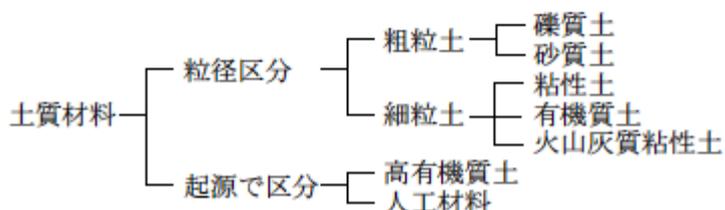


図 2-7-2 土質材料の工学的分類体系

3) 「砂層考慮ケース」では，河床勾配は一律 1/40 とし，入力波高，及び，砂層を可変とする．ここでいう「砂層考慮」とは，図 2-7-3 で示される 2 層からなる成層構造を扱う．すなわち，地表から砂丘の高さの 8 割である 0.06m より下の層を，岩盤層（茶色部分）とし，その上部の 0.06m から 0.075m までの層は他のケースと同様の砂層（白色部分）とする，非一様分布を扱う．

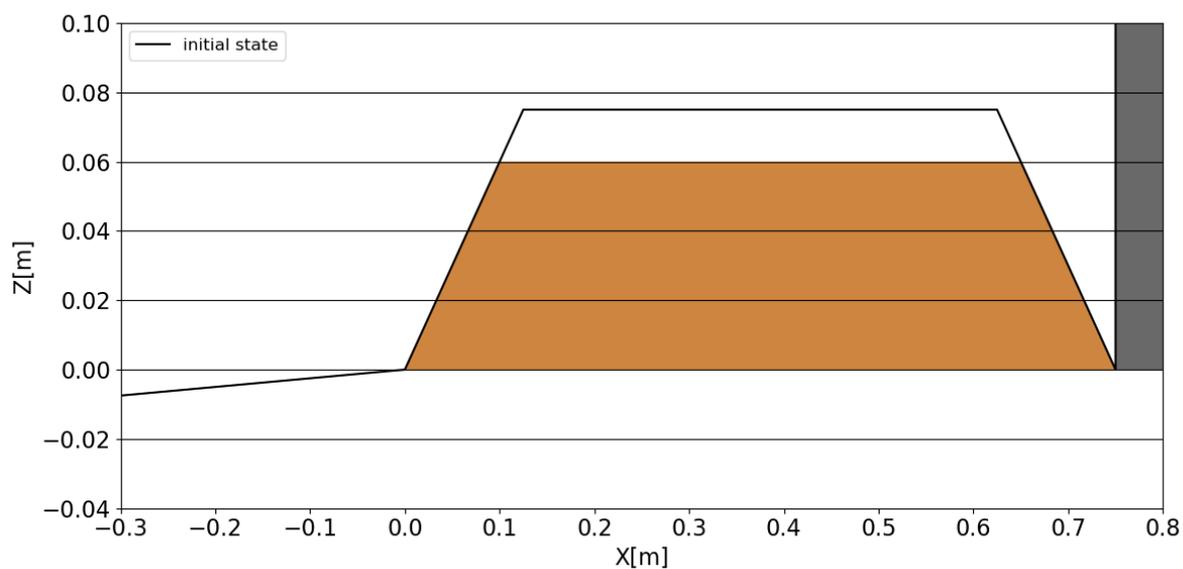


図 2-7-3 本解析で用いた砂層の非一様分布

表 2-7-1 シミュレーション解析ケース一覧表

ケース名	河床勾配	入力波_波高	堤体位置	砂粒径	砂層
Case 1-1	1/10	孤立波_7.5cm	汀線-75cm	0.23mm	考慮しない 【一様分布】
Case 1-2		孤立波_10.0cm			
Case 1-3		孤立波_12.5cm			
Case 1-4		孤立波_7.5cm	汀線-137.5cm		
Case 1-5		孤立波_10.0cm			
Case 1-6		孤立波_12.5cm			
Case 2-1	1/40	孤立波_7.5cm	汀線-75cm	0.23mm	
Case 2-2		孤立波_10.0cm			
Case 2-3		孤立波_12.5cm			
Case 2-4		孤立波_7.5cm		0.005mm	
Case 2-5		孤立波_10.0cm			
Case 2-6		孤立波_12.5cm			
Case 2-7		孤立波_7.5cm		0.85mm	
Case 2-8		孤立波_10.0cm			
Case 2-9		孤立波_12.5cm			
Case 2-10		孤立波_7.5cm	汀線-137.5cm	0.23mm	
Case 2-11		孤立波_10.0cm			
Case 2-12		孤立波_12.5cm			
Case 2-13		孤立波_7.5cm		0.005mm	
Case 2-14		孤立波_10.0cm			
Case 2-15		孤立波_12.5cm			
Case 2-16		孤立波_7.5cm		0.85mm	
Case 2-17		孤立波_10.0cm			
Case 2-18		孤立波_12.5cm			
Case 3-1		孤立波_7.5cm	汀線-75cm	0.23mm	考慮する 【非一様分布】
Case 3-2		孤立波_10.0cm			
Case 3-3		孤立波_12.5cm			

1)計算メッシュ

計算メッシュは、図 1-3-2-2 の試験水槽の形状を適切に表現できるように作成した。水路縦断方向のメッシュ分割について、遡上時の津波の変形・伝播過程を詳細に検討できるように、計算メッシュサイズを 1cm に設定した。横断方向のメッシュ分割について、津波の横断方向の変化が少ない事を勘案し、計算メッシュサイズを 4m に設定した。

鉛直方向のメッシュ分割について、解析対象となる津波波形の形状を表現するために、計算メッシュサイズを 1cm に設定した。

2)防潮堤

防潮堤を汀線から-75cm ないし-137.5cm の位置に設置する条件で解析を実施した。

3)入力波

入力波高 7.5cm～12.5cm の孤立波を入力波とする条件で解析を実施した。

2-8 実験比較ケースの解析結果

2-8-1 防潮堤に作用する波圧の比較

Case 1-1～Case 1-6 の波圧時系列の段波波圧開始、持続波圧開始の各時刻を表 2-8-1-1 に示す。なお、持続波圧の継続時間は全ケース計算終了時刻までとした。

表 2-8-1-1 段波波圧及び持続波圧の開始時刻

ケース名	段波波圧開始時刻	持続波圧開始時刻
Case 1-1	10.1416sec	10.5289sec
Case 1-2	9.1544sec	9.5543sec
Case 1-3	8.4796sec	8.867sec
Case 1-4	10.4415sec	10.8663sec
Case 1-5	9.3793sec	9.8417sec
Case 1-6	8.6921sec	9.1044sec

図 2-8-1-1 及び図 2-8-1-2 は Case1-1～Case1-6 の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を試験結果と比較して示す。図 2-8-1-1 は防潮堤位置が汀線-75cm の場合を示し、図 2-8-1-2 は防潮堤位置が汀線-137.5cm の場合を示す。また、実線が解析結果を示し、破線が試験結果を示す。

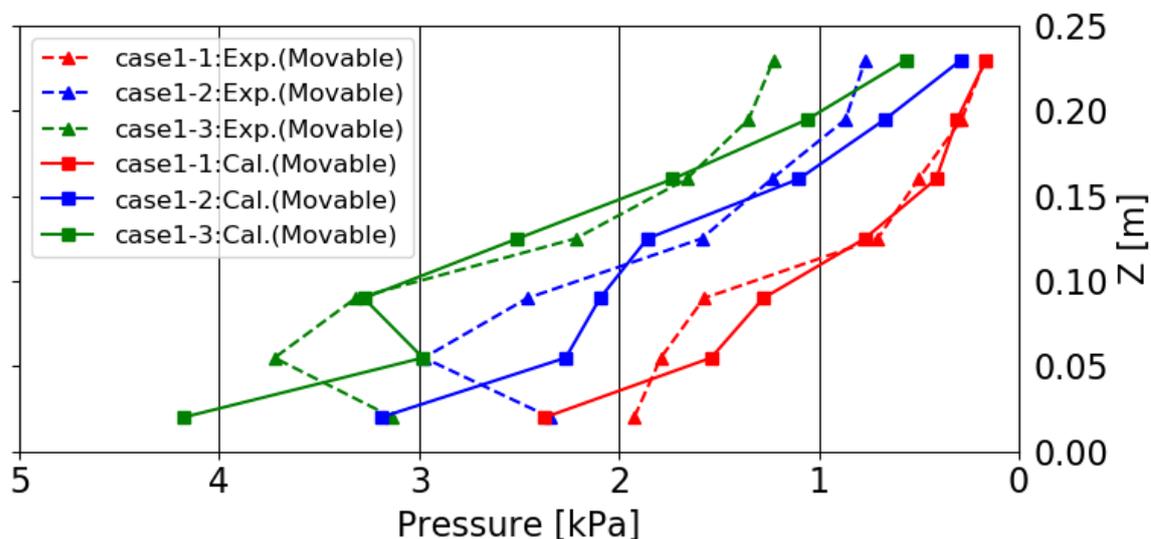


図 2-8-1-1 防潮堤に作用する段波波圧の最大値

【防潮堤位置：汀線-75cm】

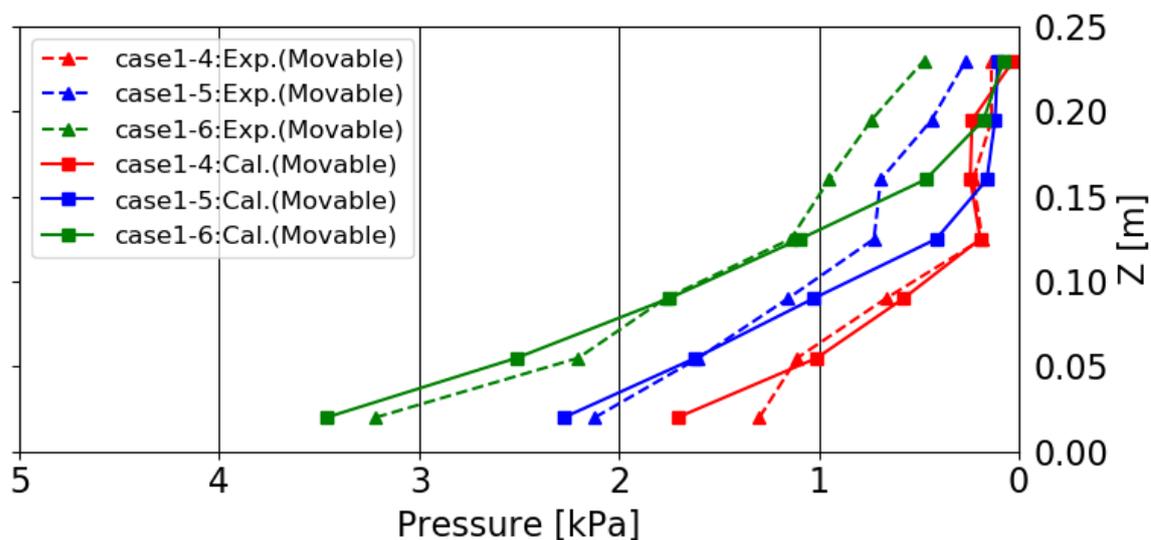


図 2-8-1-2 防潮堤に作用する段波波圧の最大値

【防潮堤位置：汀線-137.5cm】

図 2-8-1-3 及び図 2-8-1-4 は Case1-1～Case1-6 の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を固定床の場合と比較して示す。図 2-8-1-3 は防潮堤位置が汀線-75cm の場合を示し、図 2-8-1-4 は防潮堤位置が汀線-137.5cm の場合を示す。また、実線が移動床の結果を示し、破線が固定床の結果を示す。

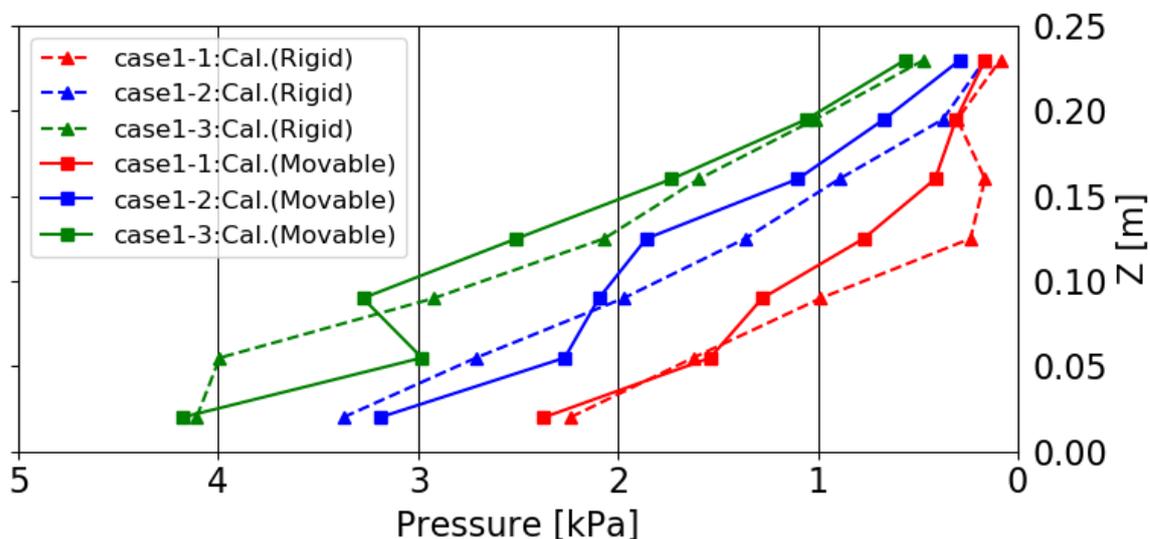


図 2-8-1-3 防潮堤に作用する段波波圧の最大値

【防潮堤位置：汀線-75cm】

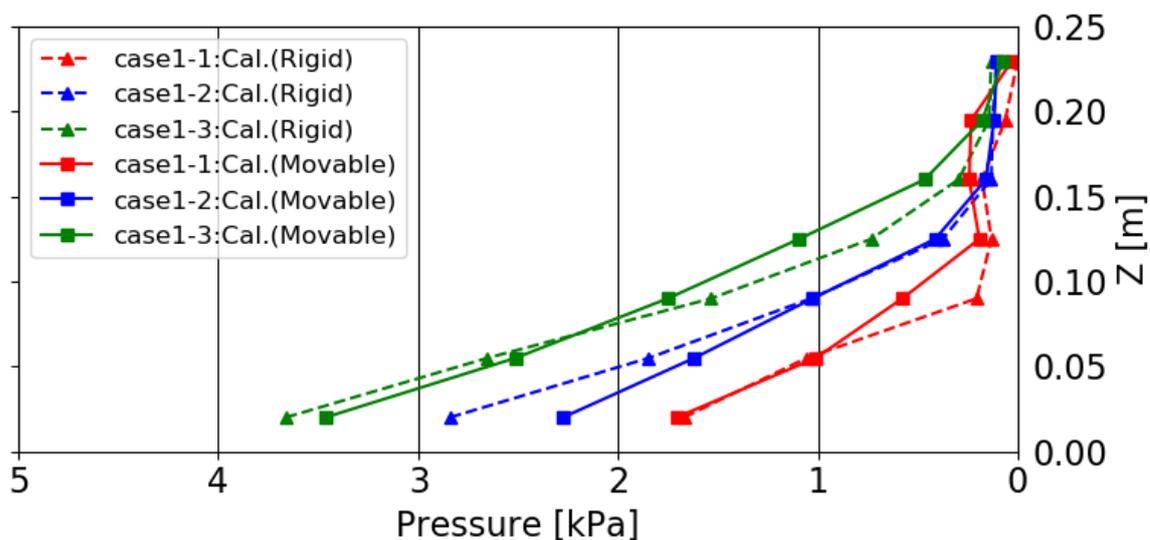


図 2-8-1-4 防潮堤に作用する段波波圧の最大値

【防潮堤位置：汀線-137.5cm】

図 2-8-1-5 及び図 2-8-1-6 は Case1-1~Case1-6 の移動床における防潮堤に作用する持続波圧の平均値を固定床の場合と比較して示す。図 2-8-1-5 は防潮堤位置が汀線-75cm の場合を示し, 図 2-8-1-6 は防潮堤位置が汀線-137.5cm の場合を示す。

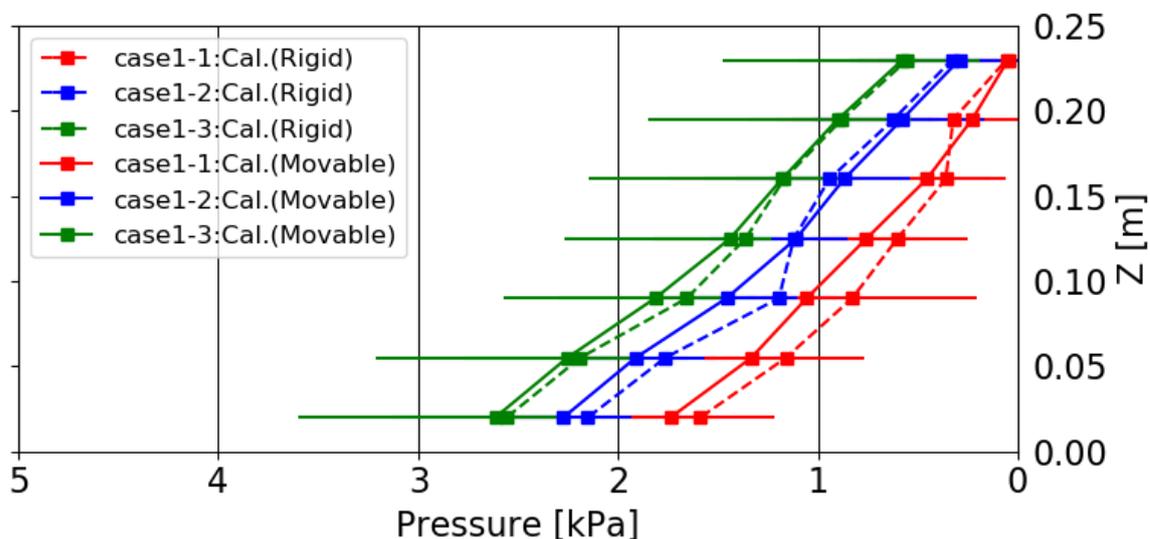


図 2-8-1-5 防潮堤に作用する持続波圧の平均値

【防潮堤位置：汀線-75cm】

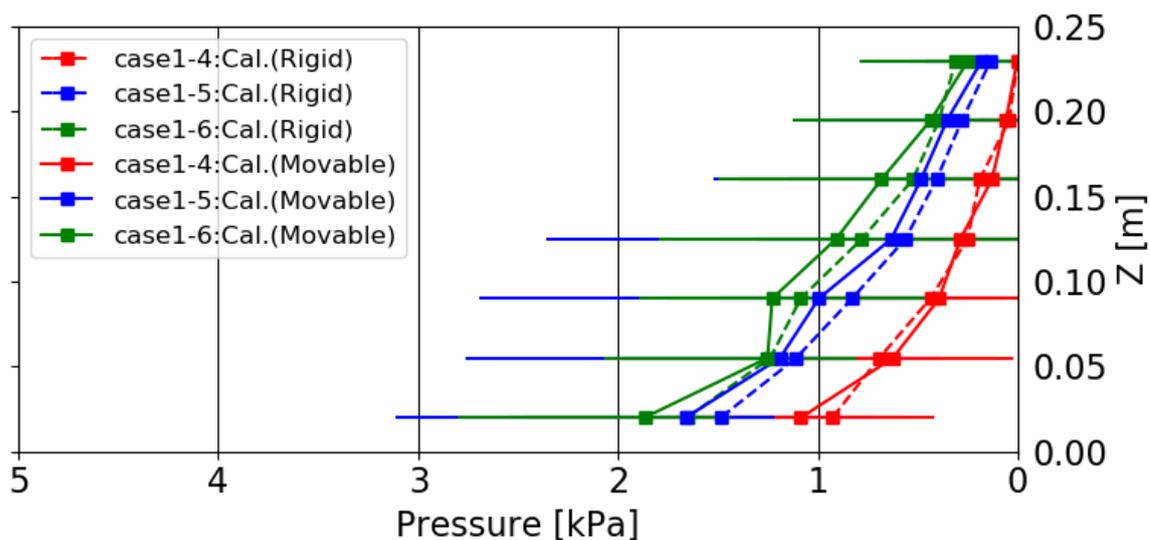


図 2-8-1-6 防潮堤に作用する持続波圧の平均値

【防潮堤位置：汀線-137.5cm】

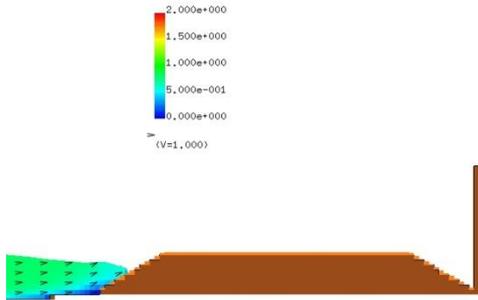
2-8-2 流速場，河床変動高の縦断分布の比較

以下では，Case1-1～Case1-6 における流速場の計算結果，浮遊砂濃度分布の計算結果及び防潮堤前面における河床変動高の縦断分布の計算結果を示す（図 2-8-2-1～図 2-8-2-18 参照）．ここでの浮遊砂濃度の単位は mg/l である．なお，全ケースの河床変動高の縦断分布について，解析結果においては防潮堤からの引き波が十分収まる時刻の結果を採用し，試験結果においては測定された「ガラス面側」と「移動床中央」との両方における洗掘深の結果を図化した．

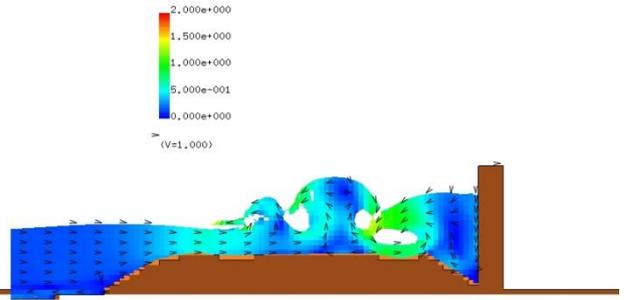
(1) 入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case1-1)

図 2-8-2-1 は, Case1-1【河床勾配: 1/10, 入力波高: 7.5cm, 防潮堤位置: 汀線-75cm】の断面二次元流速スナップショットを示す.

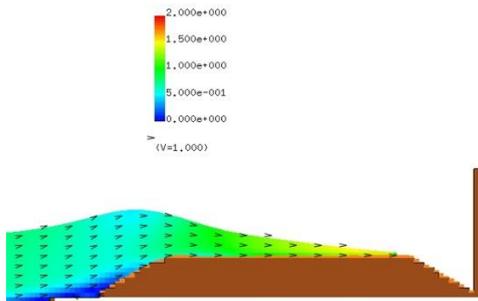
T= 9.5018 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



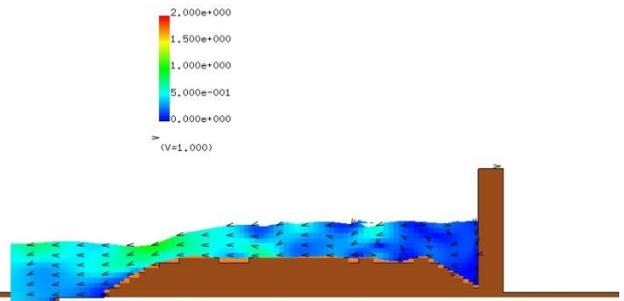
T= 11.0013 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



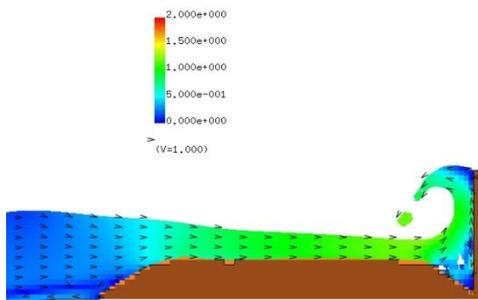
T= 10.0016 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 12.0009 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 10.5014 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 13.0006 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

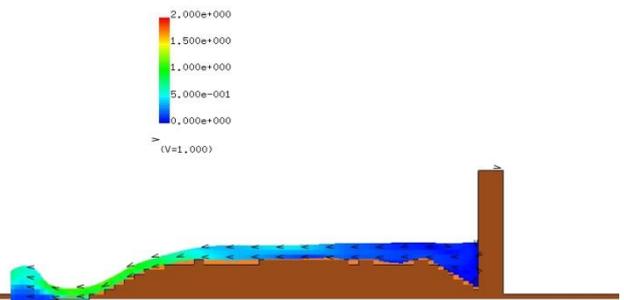


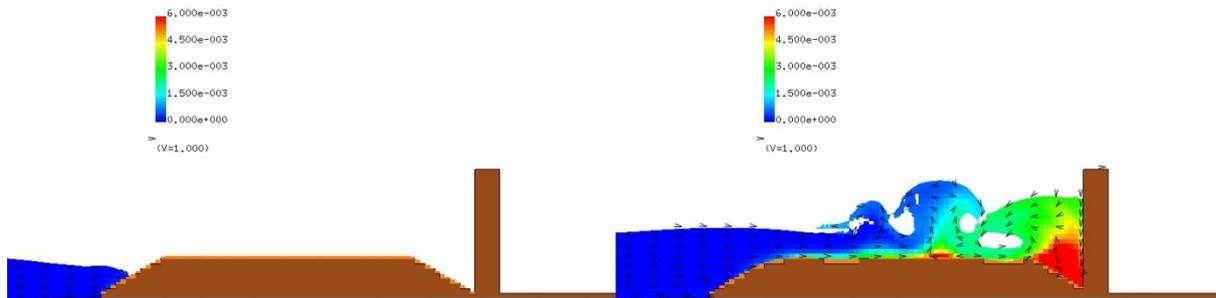
図 2-8-2-1 Case1-1 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/10, 入力波高: 7.5cm, 防潮堤位置: -75cm】

図 2-8-2-2 は、Case1-1【河床勾配：1/10，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：汀線-75cm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを示す。

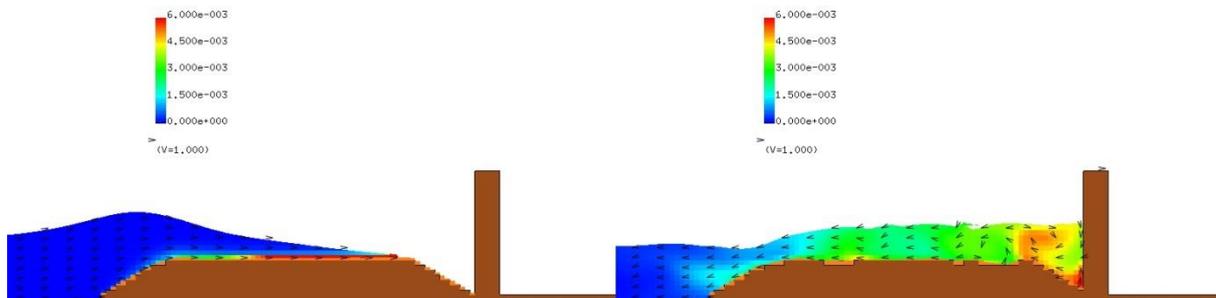
T= 9.50178 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 11.00127 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 10.00161 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 12.00093 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 10.50144 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 13.00059 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

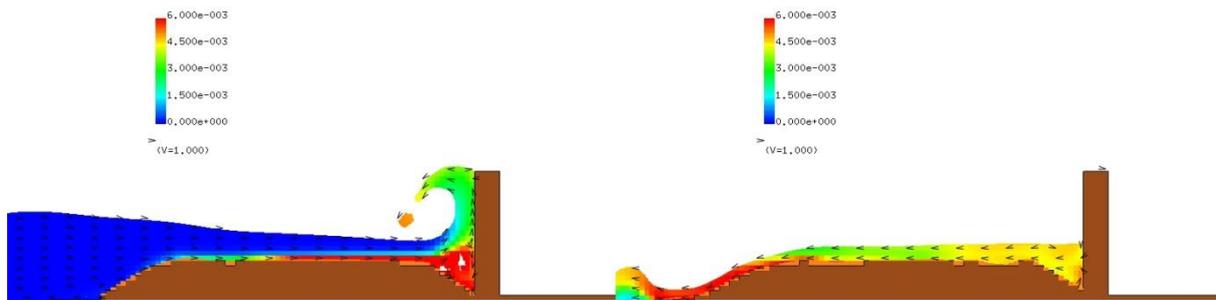


図 2-8-2-2 Case1-1 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
【河床勾配：1/10，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-75cm】

Case1-1【河床勾配：1/10，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：汀線-75cm】の河床変動高の縦断分布を図 2-8-2-3 に示す。砂丘地形の初期状態を黒の実線で示し，解析結果の河床高を赤の実線で示す。また，試験結果においては，測定された「ガラス面側」の河床高を水色の破線で示し，「移動床中央」の河床高を黄色の破線で示す。

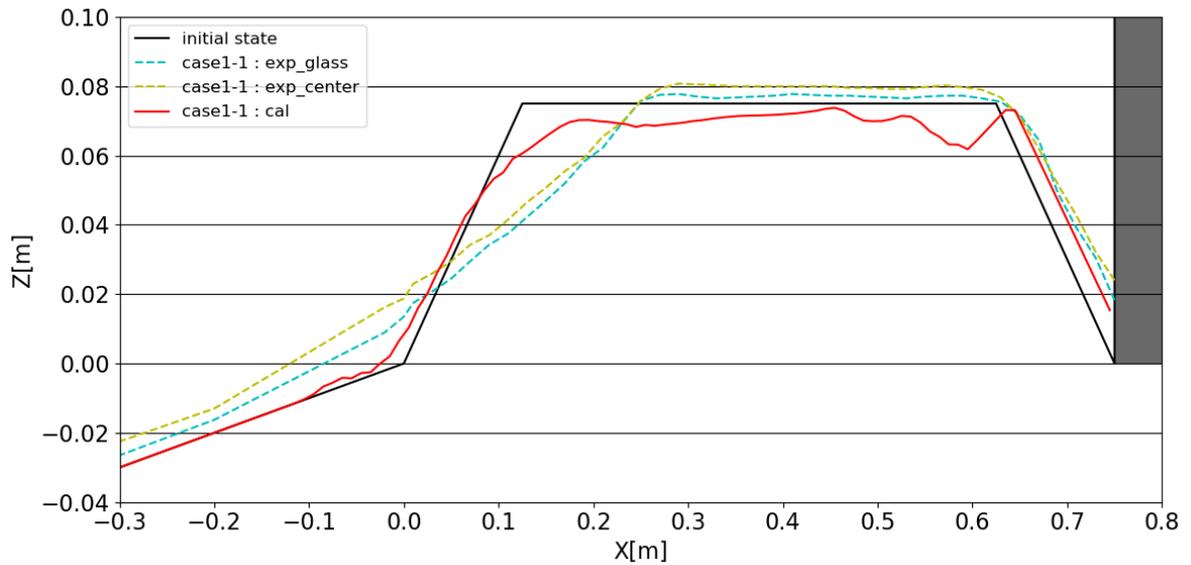


図 2-8-2-3 Case1-1 の河床変動高の縦断分布

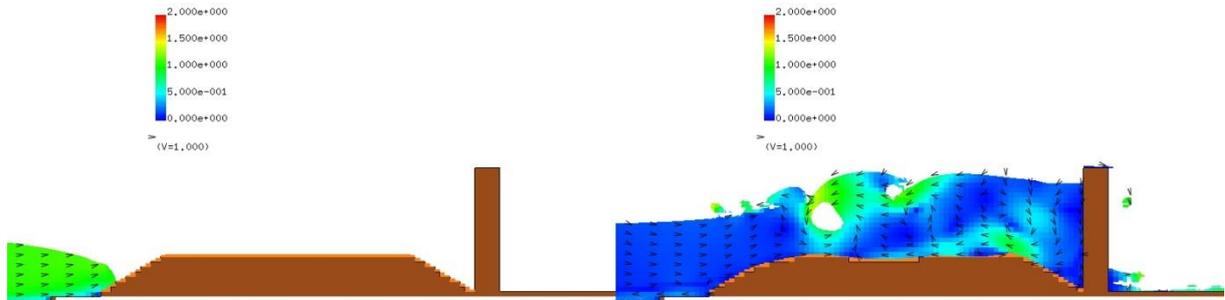
【河床勾配：1/10，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-75cm】

(2) 入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case1-2)

図 2-8-2-4 は, Case1-2【河床勾配: 1/10, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: 汀線-75cm】の断面二次元流速スナップショットを示す。

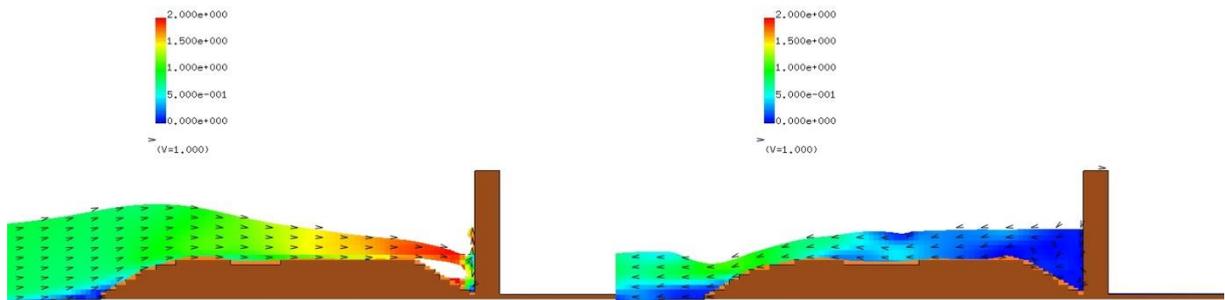
T= 8.7020 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 10.2015 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 9.2019 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 11.5011 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 9.6017 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 13.0006 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

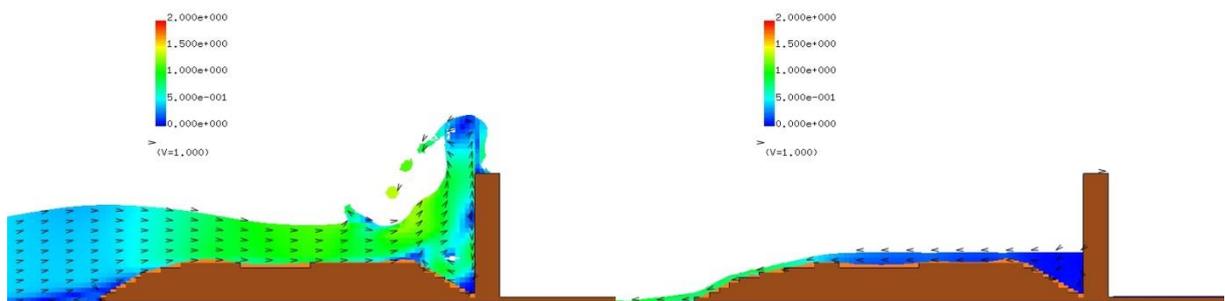


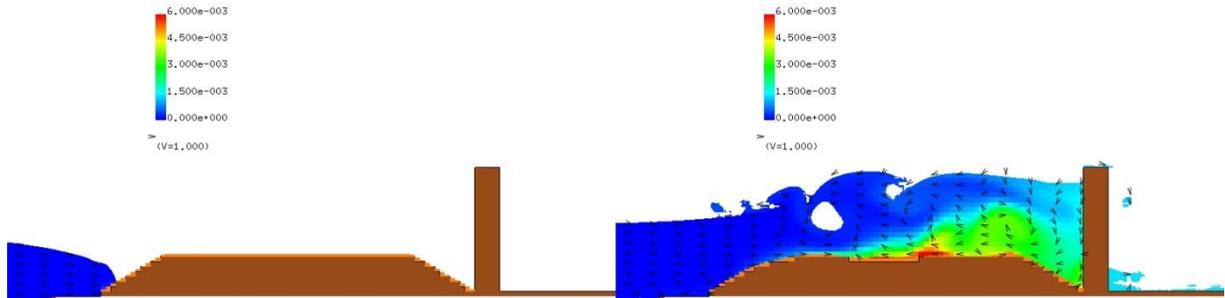
図 2-8-2-4 Case1-2 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/10, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -75cm】

図 2-8-2-5 は、Case1-2【河床勾配：1/10，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：汀線-75cm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを示す。

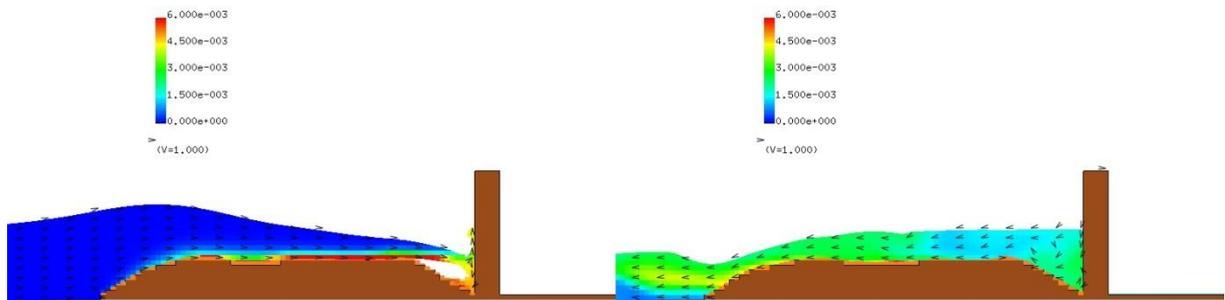
T= 8.70205 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 10.20154 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 9.20188 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 11.50110 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 9.60174 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 13.00059 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

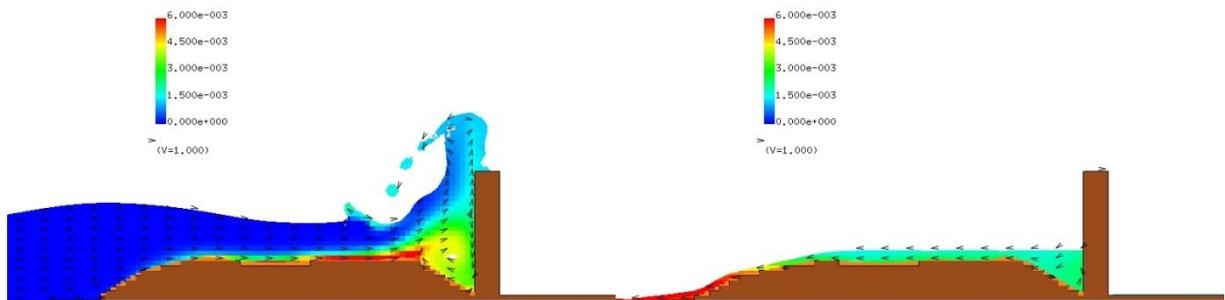


図 2-8-2-5 Case1-2 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
【河床勾配：1/10，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-75cm】

Case1-2【河床勾配：1/10，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：汀線-75cm】の河床変動高の縦断分布を図 2-8-2-6 に示す。砂丘地形の初期状態を黒の実線で示し，解析結果の河床高を赤の実線で示す。また，試験結果においては，測定された「ガラス面側」の河床高を水色の破線で示し，「移動床中央」の河床高を黄色の破線で示す。

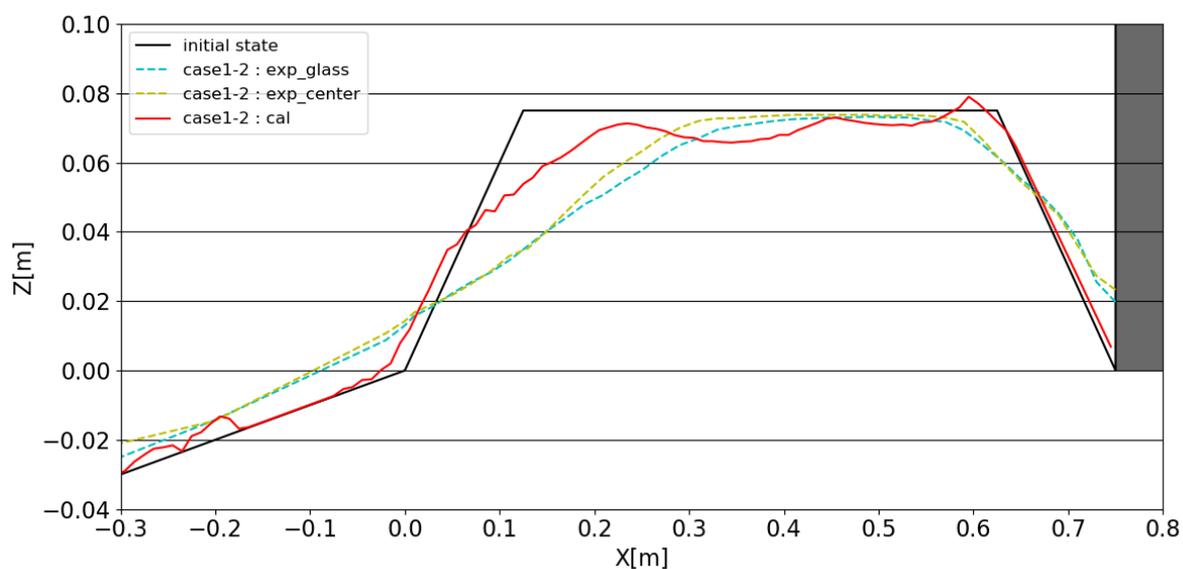


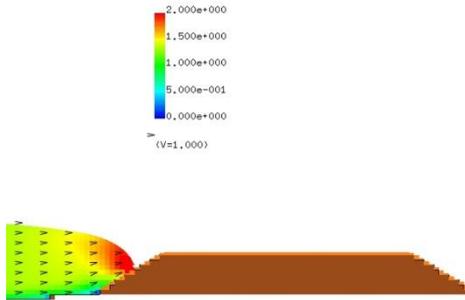
図 2-8-2-6 Case1-2 の河床変動高の縦断分布

【河床勾配：1/10，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-75cm】

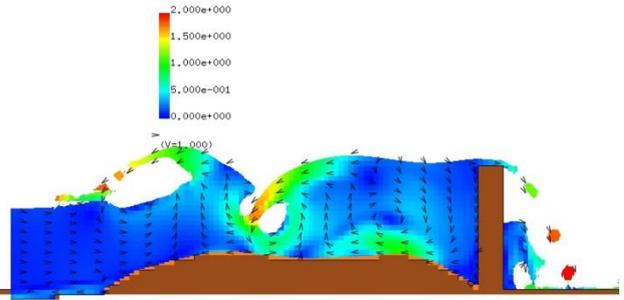
(3) 入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case1-3)

図 2-8-2-7 は, Case1-3【河床勾配: 1/10, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: 汀線-75cm】の断面二次元流速スナップショットを示す。

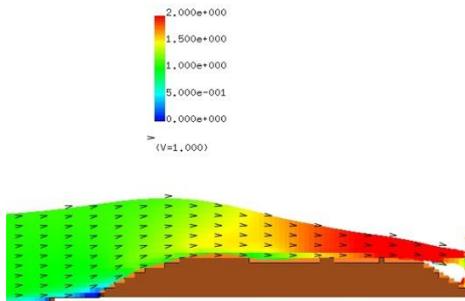
T= 8.1522 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



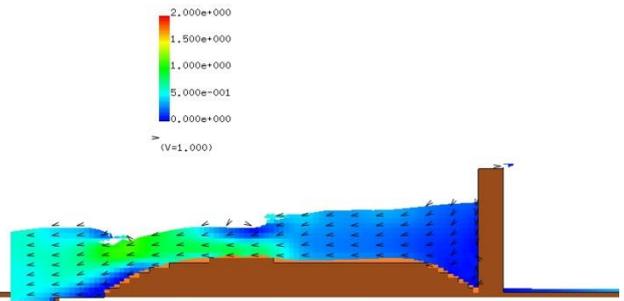
T= 9.5018 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



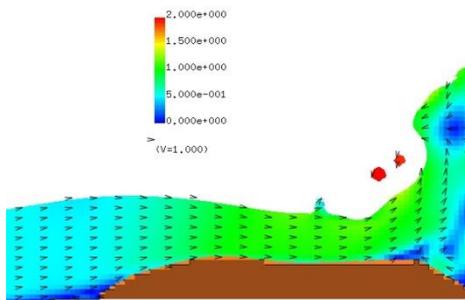
T= 8.5021 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 10.5014 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 9.0019 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 13.0006 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

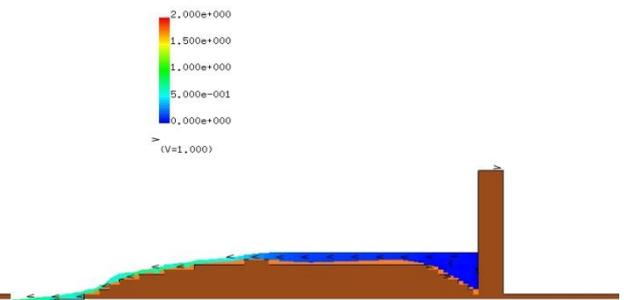


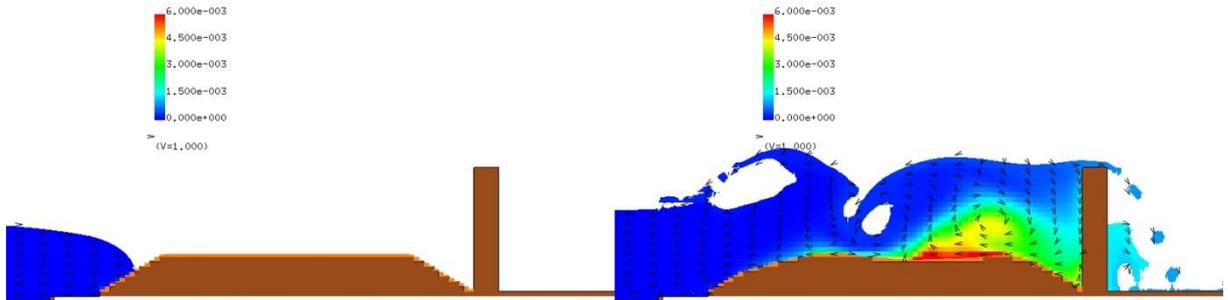
図 2-8-2-7 Case1-3 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/10, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -75cm】

図 2-8-2-8 は、Case1-3【河床勾配：1/10，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：汀線-75cm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを示す。

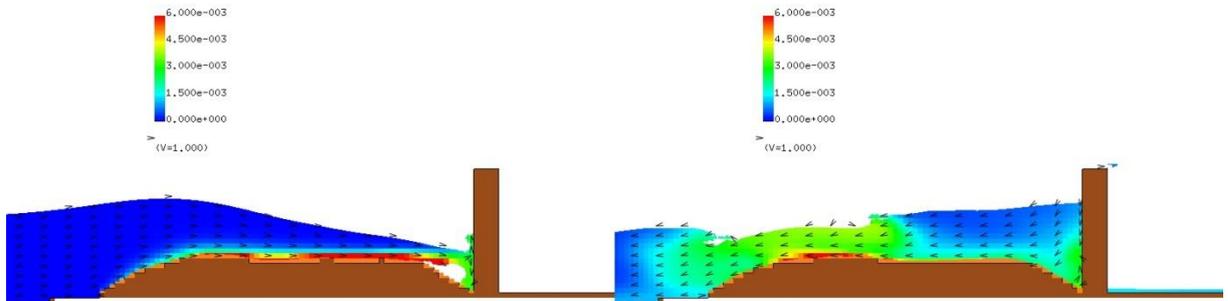
T= 8.15223 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 9.50178 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 8.50212 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 10.50144 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 9.00195 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 13.00059 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

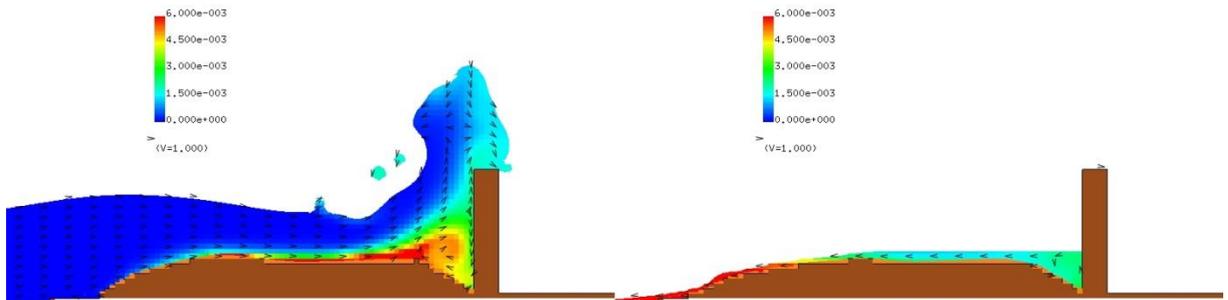


図 2-8-2-8 Case1-3 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
【河床勾配：1/10，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-75cm】

Case1-3【河床勾配：1/10，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：汀線-75cm】の河床変動高の縦断分布を図 2-8-2-9 に示す。砂丘地形の初期状態を黒の実線で示し，解析結果の河床高を赤の実線で示す。また，試験結果においては，測定された「ガラス面側」の河床高を水色の破線で示し，「移動床中央」の河床高を黄色の破線で示す。

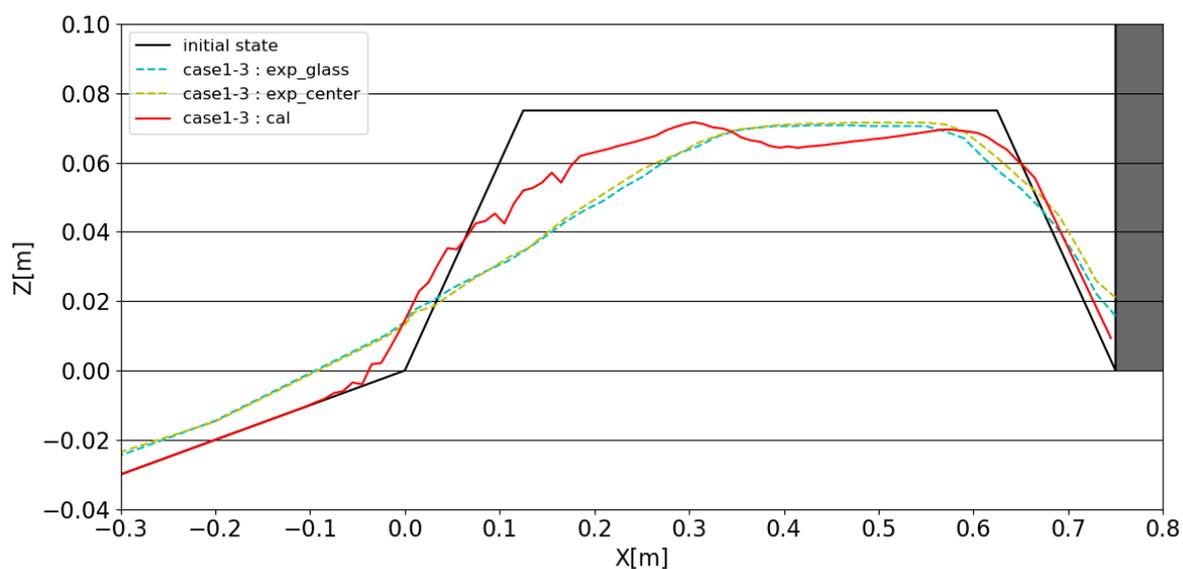


図 2-8-2-9 Case1-3 の河床変動高の縦断分布

【河床勾配：1/10，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-75cm】

(4) 入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm (Case1-4)

図 2-8-2-10 は, Case1-4【河床勾配 : 1/10, 入力波高 : 7.5cm, 防潮堤位置 : 汀線-137.5cm】の断面二次元流速スナップショットを示す.

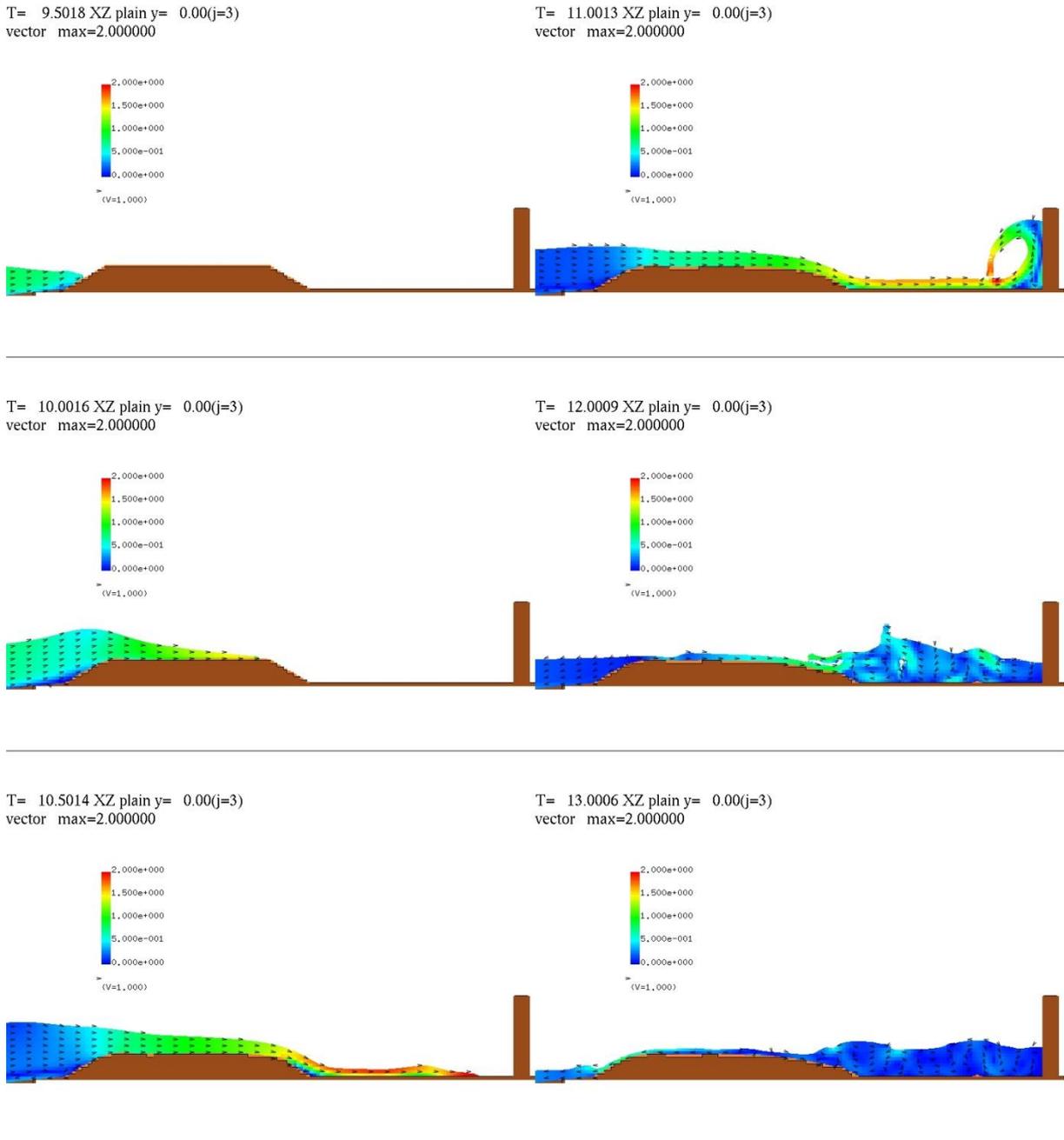


図 2-8-2-10 Case1-4 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配 : 1/10, 入力波高 : 7.5cm, 防潮堤位置 : -137.5cm】

図 2-8-2-11 は、Case1-4【河床勾配：1/10，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：汀線-137.5cm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを示す。

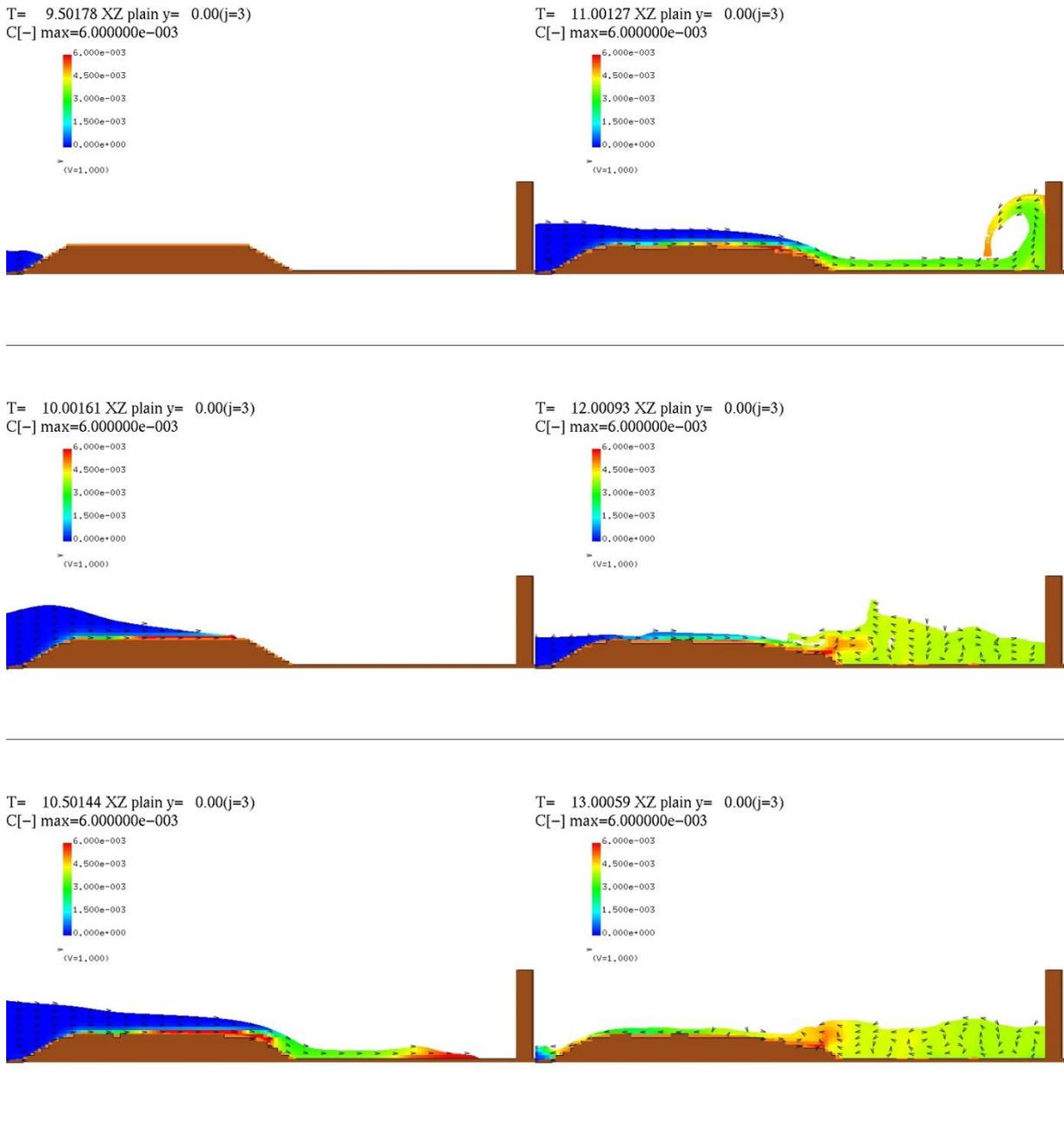


図 2-8-2-11 Case1-4 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
【河床勾配：1/10，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-137.5cm】

Case1-4【河床勾配：1/10，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：汀線-137.5cm】の河床変動高の縦断分布を図 2-8-2-12 に示す。砂丘地形の初期状態を黒の実線で示し，解析結果の河床高を赤の実線で示す。また，試験結果においては，測定された「ガラス面側」の河床高を水色の破線で示し，「移動床中央」の河床高を黄色の破線で示す。

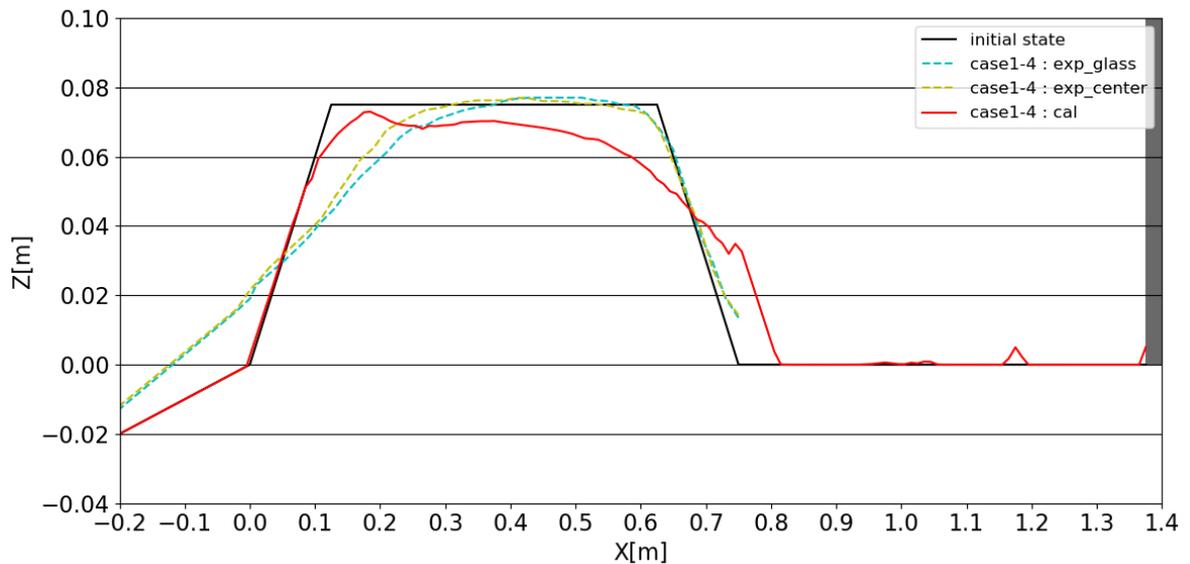


図 2-8-2-12 Case1-4 の河床変動高の縦断分布

【河床勾配：1/10，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-137.5cm】

(5) 入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm (Case1-5)

図 2-8-2-13 は, Case1-5【河床勾配 : 1/10, 入力波高 : 10.0cm, 防潮堤位置 : 汀線-137.5cm】の断面二次元流速スナップショットを示す.

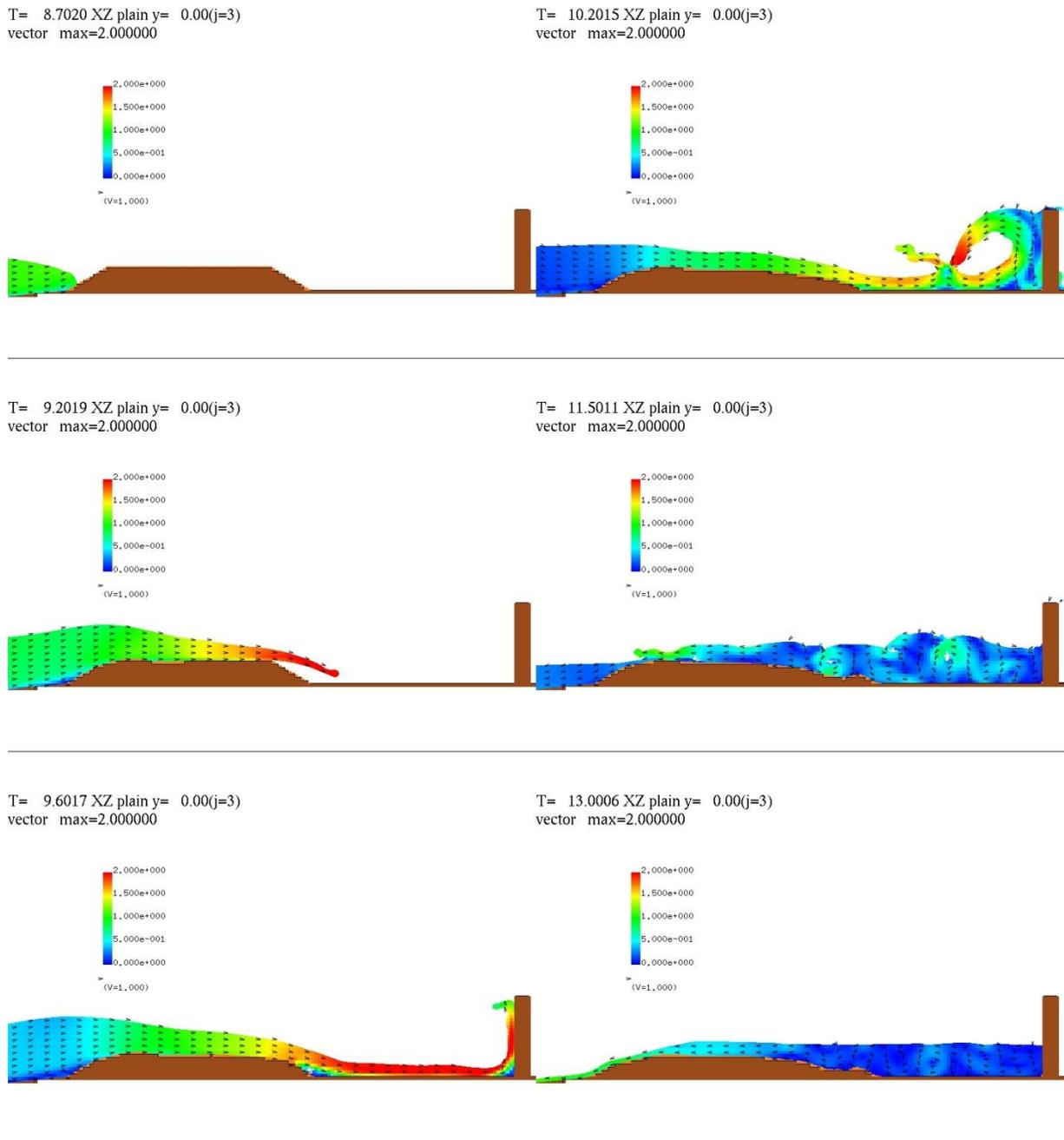


図 2-8-2-13 Case1-5 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配 : 1/10, 入力波高 : 10.0cm, 防潮堤位置 : -137.5cm】

図 2-8-2-14 は、Case1-5【河床勾配：1/10，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：汀線-137.5cm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを示す。

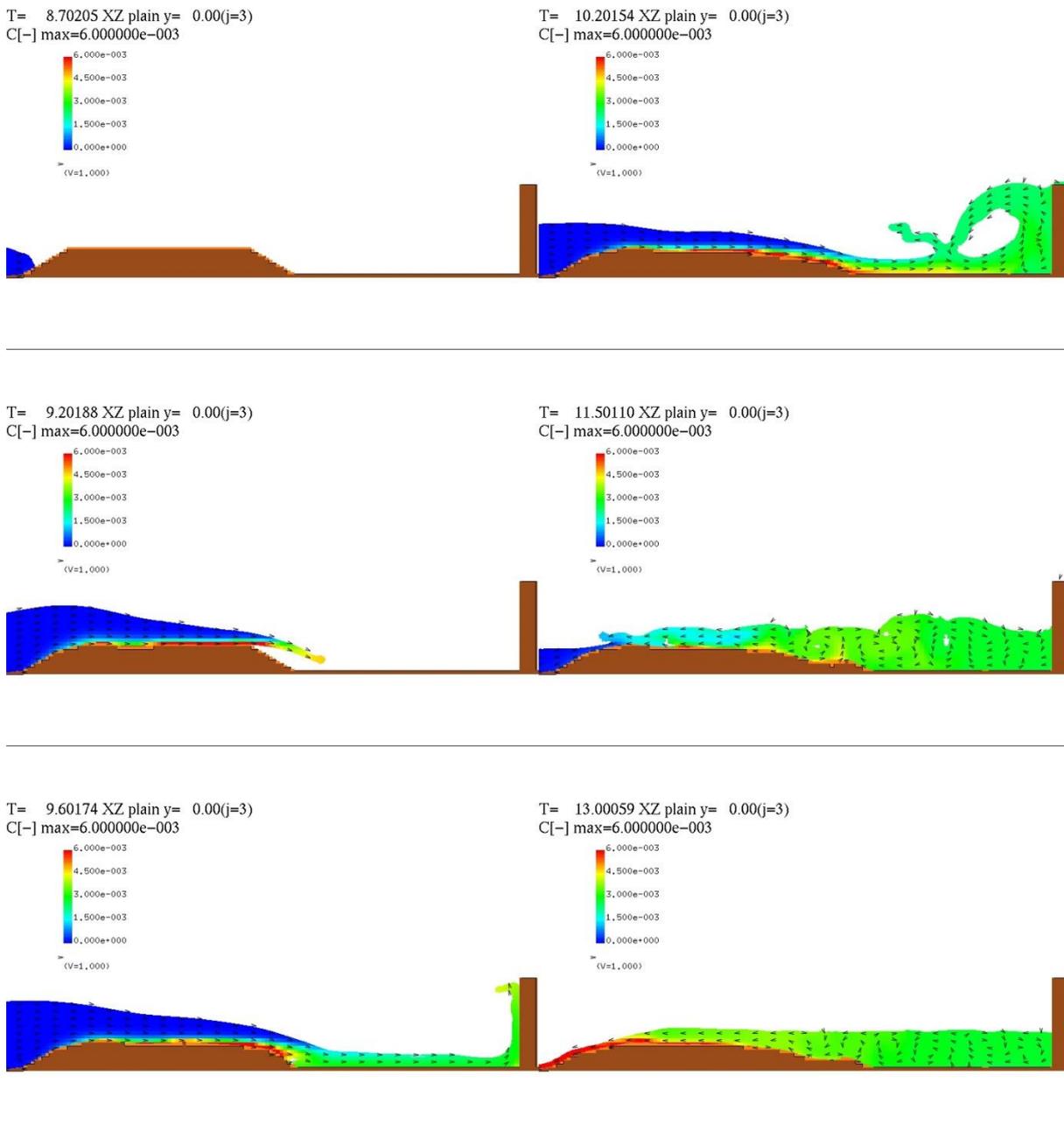


図 2-8-2-14 Case1-5 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
【河床勾配：1/10，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-137.5cm】

Case1-5【河床勾配：1/10，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：汀線-137.5cm】の河床変動高の縦断分布を図 2-8-2-15 に示す。砂丘地形の初期状態を黒の実線で示し，解析結果の河床高を赤の実線で示す。また，試験結果においては，測定された「ガラス面側」の河床高を水色の破線で示し，「移動床中央」の河床高を黄色の破線で示す。

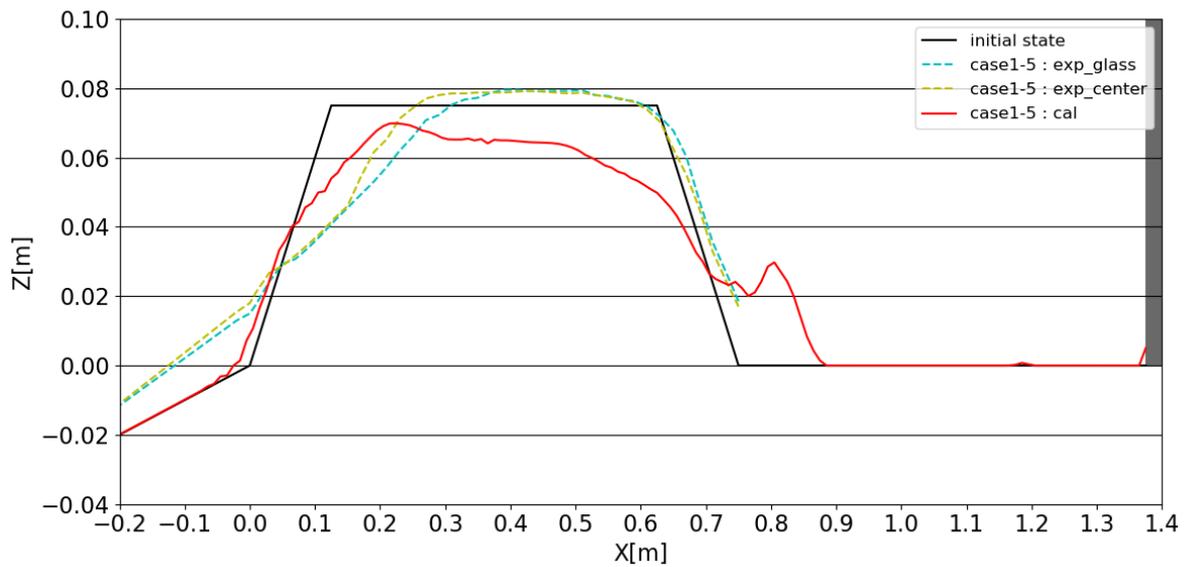


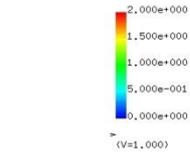
図 2-8-2-15 Case1-5 の河床変動高の縦断分布

【河床勾配：1/10，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-137.5cm】

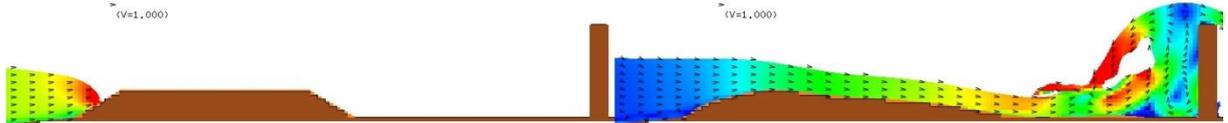
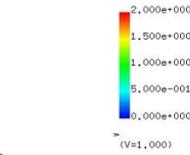
(6) 入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm (Case1-6)

図 2-8-2-16 は, Case1-6【河床勾配 : 1/10, 入力波高 : 12.5cm, 防潮堤位置 : 汀線-137.5cm】の断面二次元流速スナップショットを示す.

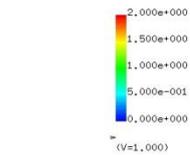
T= 8.1522 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



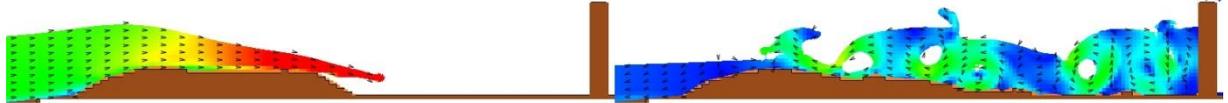
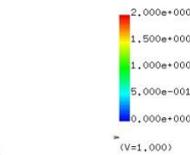
T= 9.5018 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



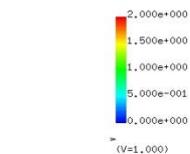
T= 8.5021 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 10.5014 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 9.0019 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 13.0006 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

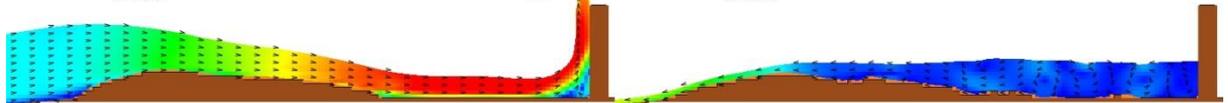
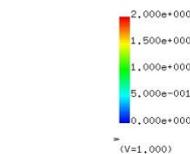


図 2-8-2-16 Case1-6 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配 : 1/10, 入力波高 : 12.5cm, 防潮堤位置 : -137.5cm】

図 2-8-2-17 は、Case1-6【河床勾配：1/10，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：汀線-137.5cm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを示す。

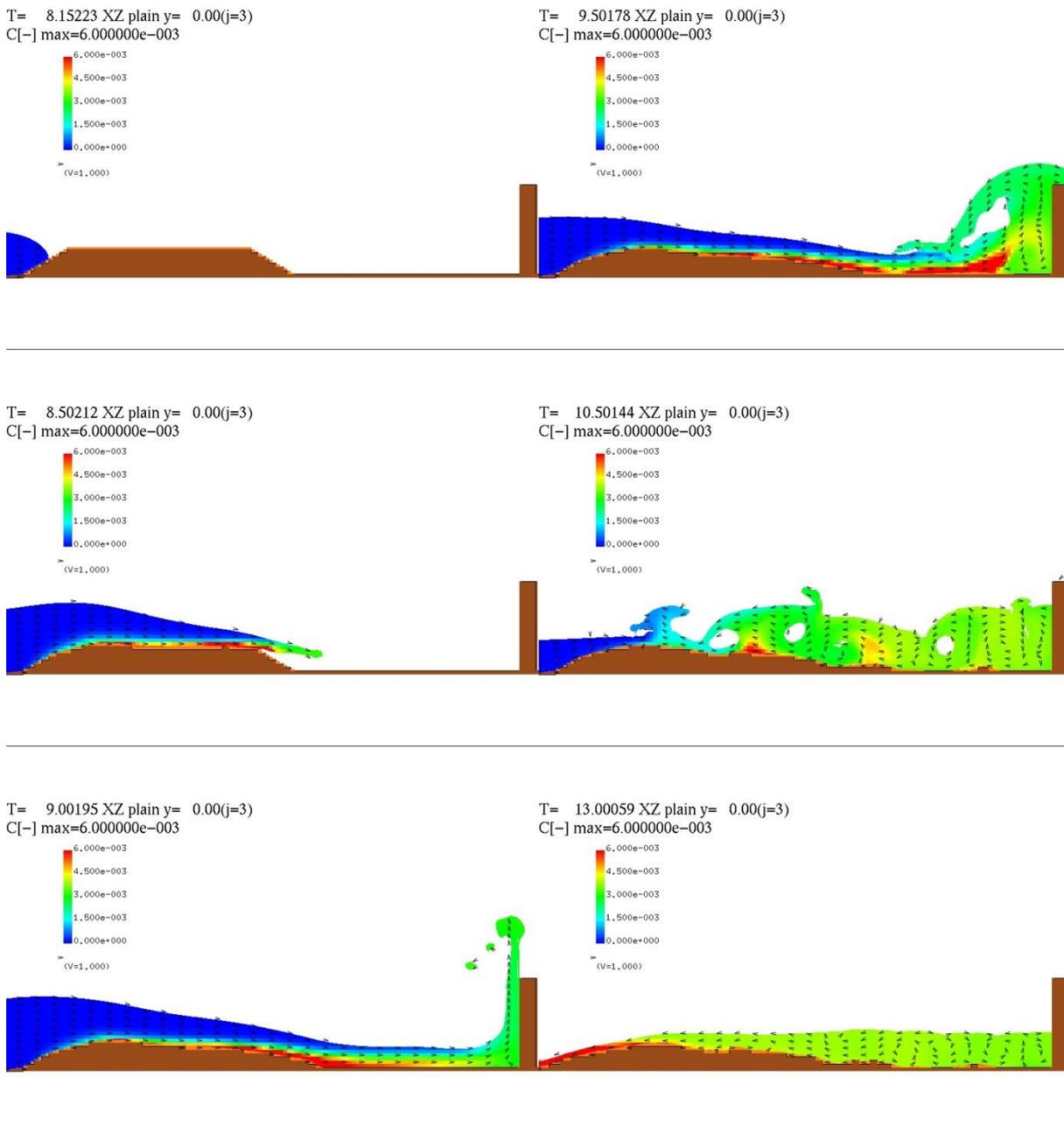


図 2-8-2-17 Case1-6 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
【河床勾配：1/10，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-137.5cm】

Case1-6【河床勾配：1/10，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：汀線-137.5cm】の河床変動高の縦断分布を図 2-8-2-18 に示す。砂丘地形の初期状態を黒の実線で示し，解析結果の河床高を赤の実線で示す。また，試験結果においては，測定された「ガラス面側」の河床高を水色の破線で示し，「移動床中央」の河床高を黄色の破線で示す。

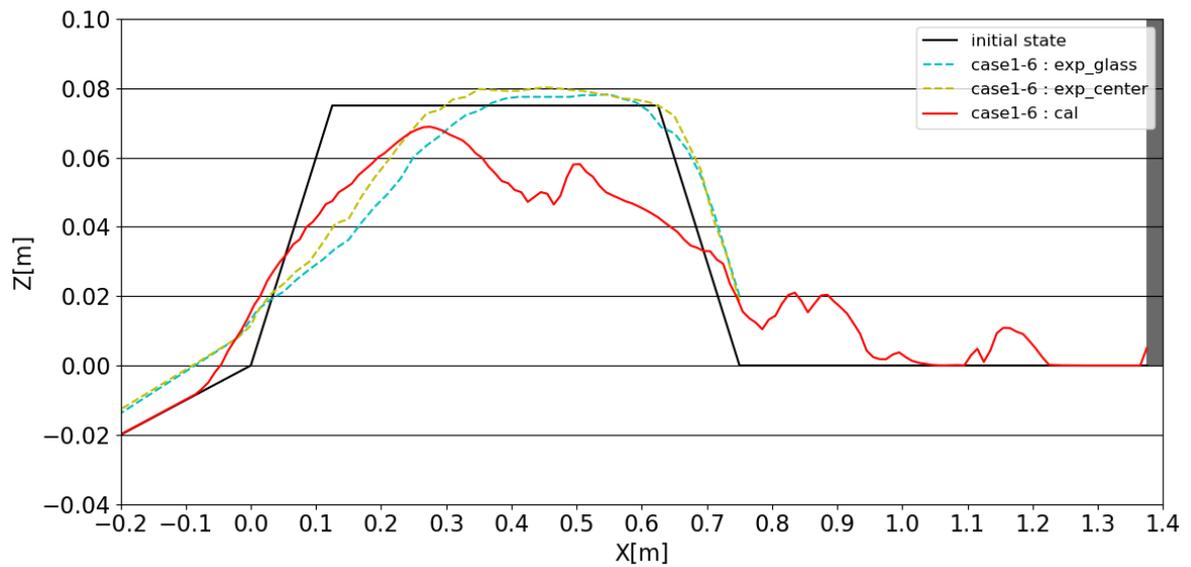


図 2-8-2-18 Case1-6 の河床変動高の縦断分布

【河床勾配：1/10，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-137.5cm】

(7) Case1-1~Case1-6 における河床変動高の比較

Case1-1~Case1-6 における試験結果と解析結果の河床変動高の縦断分布の比較を図 2-8-2-19 (防潮堤位置: -75cm) 及び図 2-8-2-20 (防潮堤位置: -137.5cm) にそれぞれまとめて示す. 解析結果の河床高を実線で示し, 試験結果の河床高を破線で示す. なお, 試験結果においては測定された「ガラス面側」の河床高と「移動床中央」の河床高との平均値を河床高として示している.

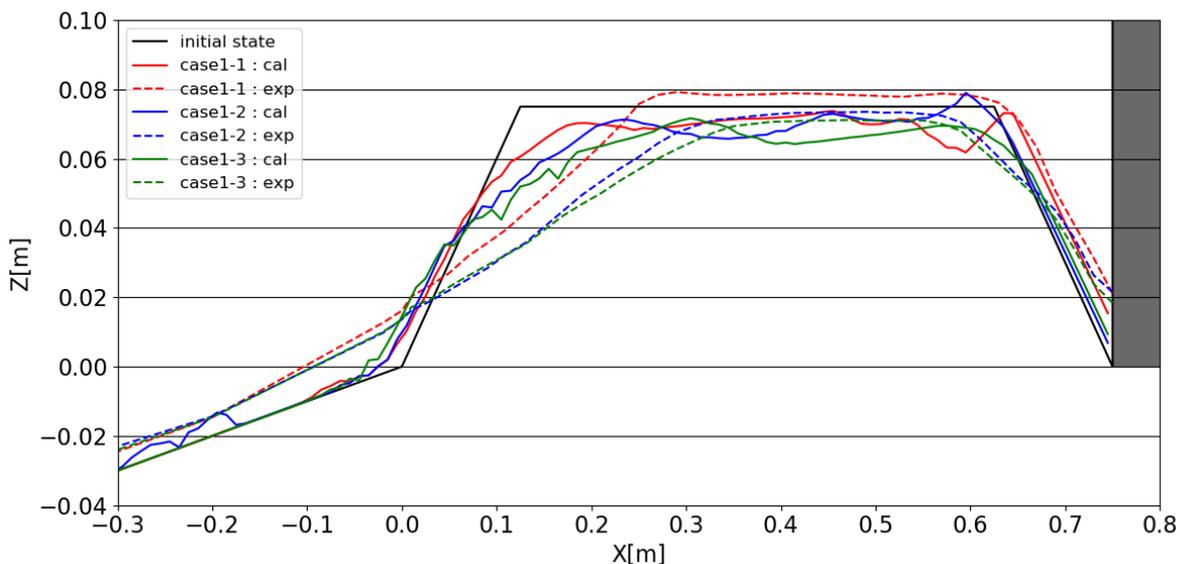


図 2-8-2-19 各ケースにおける河床変動高の試験結果と解析結果との比較

【河床勾配: 1/10, 防潮堤位置: -75cm】

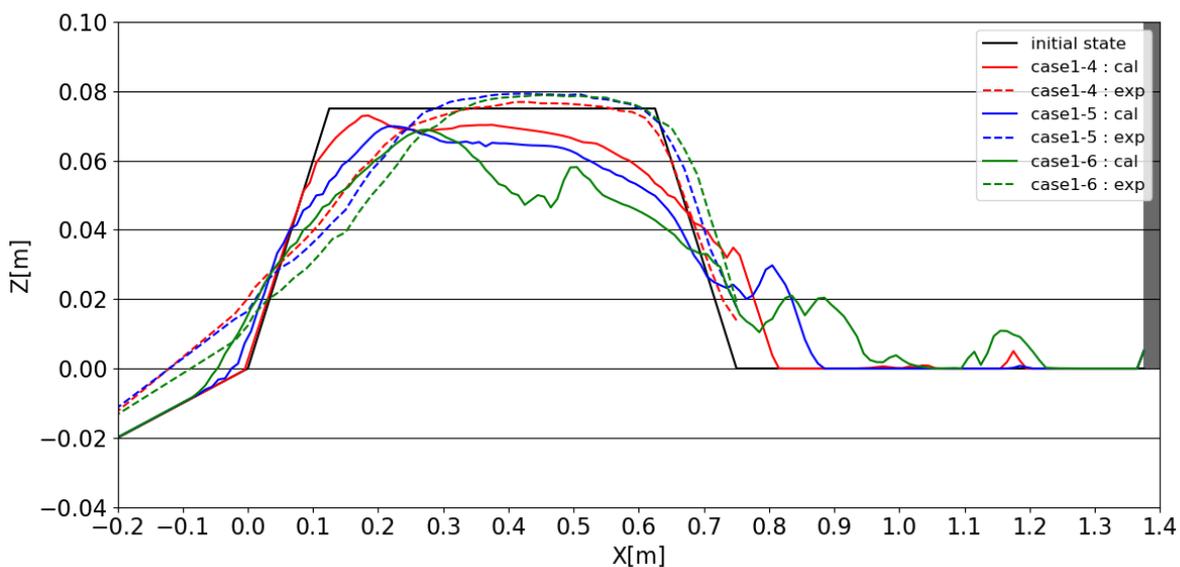


図 2-8-2-20 各ケースにおける河床変動高の試験結果と解析結果との比較

【河床勾配: 1/10, 防潮堤位置: -137.5cm】

2-9 砂粒径変化ケースの解析結果

2-9-1 防潮堤に作用する波圧の比較

以下では、砂粒径変化による防潮堤に作用する波圧の差異を調べる目的で、Case2-1～Case2-18 における段波波圧の最大値及び持続波圧の平均値を示す（図 2-9-1-1～図 2-9-1-12 参照）。ここでは、波圧の差異を明らかにするために、入力波高及び防潮堤位置が同条件の下での解析結果を比較して示す。

Case 2-1～Case 2-18 の波圧時系列の段波波圧開始、持続波圧開始の各時刻を表 2-9-1-1 に示す。なお、持続波圧の継続時間は全ケース計算終了時刻までとした。

表 2-9-1-1 段波波圧及び持続波圧の開始時刻

ケース名	段波波圧開始時刻	持続波圧開始時刻
Case 2-1	21.2678sec	21.5677sec
Case 2-2	19.7908sec	20.553sec
Case 2-3	18.5212sec	19.7208sec
Case 2-4	21.1778sec	21.5652sec
Case 2-5	19.7033sec	20.528sec
Case 2-6	18.4912sec	19.7158sec
Case 2-7	21.1778sec	21.5527sec
Case 2-8	19.8283sec	20.528sec
Case 2-9	18.5037sec	19.6408sec
Case 2-10	21.5402sec	21.9526sec
Case 2-11	20.2031sec	20.8654sec
Case 2-12	18.9161sec	20.0407sec
Case 2-13	21.6901sec	21.9401sec
Case 2-14	20.1282sec	20.8654sec
Case 2-15	18.8286sec	20.0657sec
Case 2-16	21.6027sec	21.9526sec
Case 2-17	20.2156sec	20.8779sec
Case 2-18	18.7661sec	20.0782sec

(1) 入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case2-1, Case2-4, Case2-7)
 入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm の同条件の下, Case2-1【砂粒径 : 0.23mm】, Case2-4【砂粒径 : 0.005mm】, Case2-7【砂粒径 : 0.85mm】の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を図 2-9-1-1 に示し, 持続波圧の平均値を図 2-9-1-2 に示す. Case2-1【砂粒径 : 0.23mm】の解析結果の波圧を赤の実線, Case2-4【砂粒径 : 0.005mm】の解析結果の波圧を青の実線, Case2-7【砂粒径 : 0.85mm】の解析結果の波圧を緑の実線で示す.

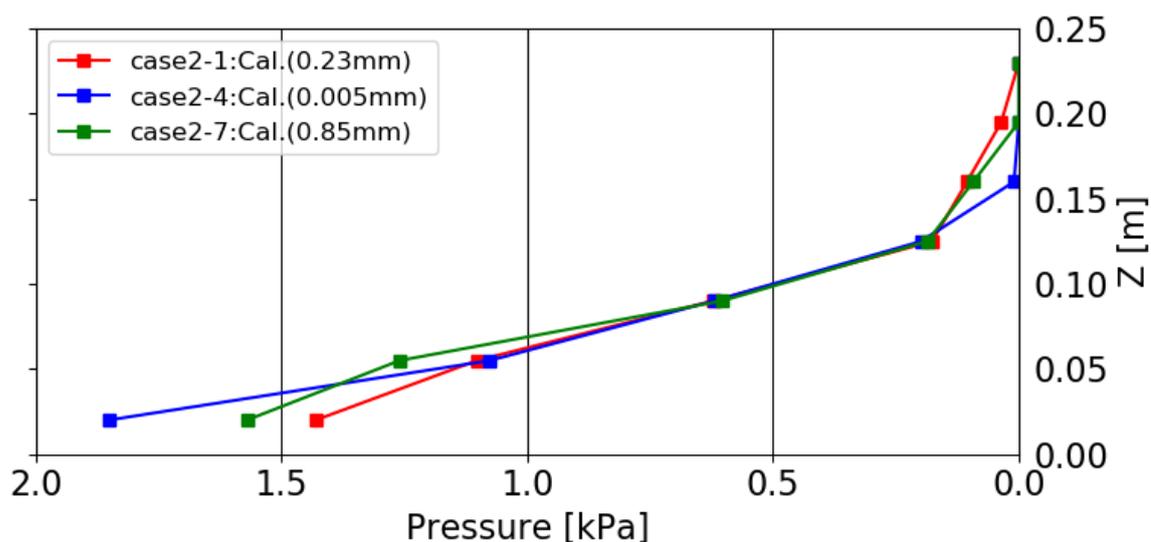


図 2-9-1-1 Case2-1, Case2-4, Case2-7 の防潮堤に作用する段波波圧の最大値
 【河床勾配 : 1/40, 入力波高 : 7.5cm, 防潮堤位置 : -75cm】

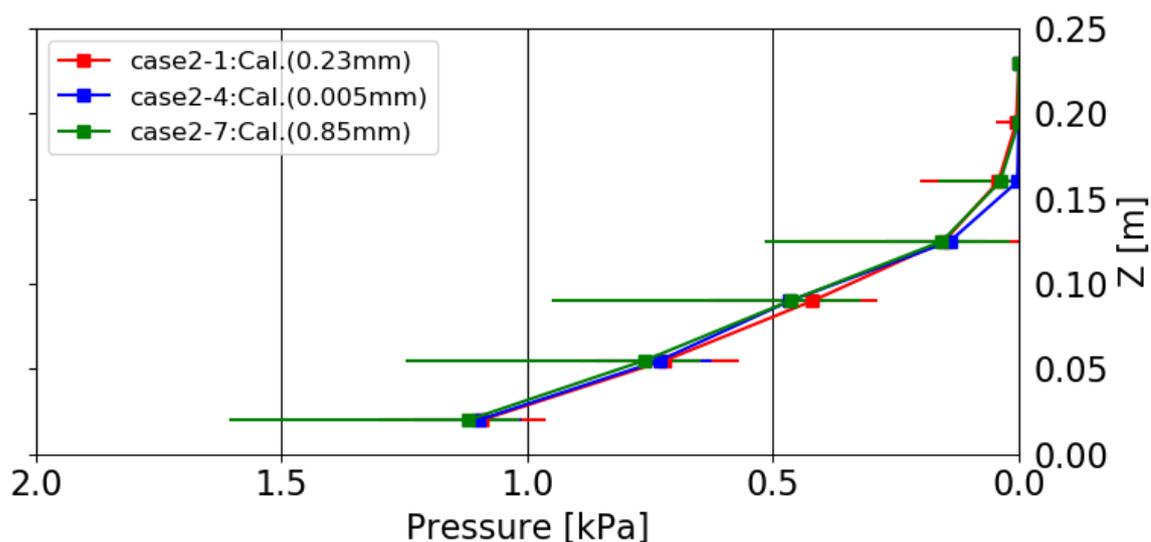


図 2-9-1-2 Case2-1, Case2-4, Case2-7 の防潮堤に作用する持続波圧の平均値
 【河床勾配 : 1/40, 入力波高 : 7.5cm, 防潮堤位置 : -75cm】

(2) 入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case2-2, Case2-5, Case2-8)
 入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-75cm の同条件の下, Case2-2【砂粒径 : 0.23mm】, Case2-5【砂粒径 : 0.005mm】, Case2-8【砂粒径 : 0.85mm】の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を図 2-9-1-3 に示し, 持続波圧の平均値を図 2-9-1-4 に示す. Case2-2【砂粒径 : 0.23mm】の解析結果の波圧を赤の実線, Case2-5【砂粒径 : 0.005mm】の解析結果の波圧を青の実線, Case2-8【砂粒径 : 0.85mm】の解析結果の波圧を緑の実線で示す.

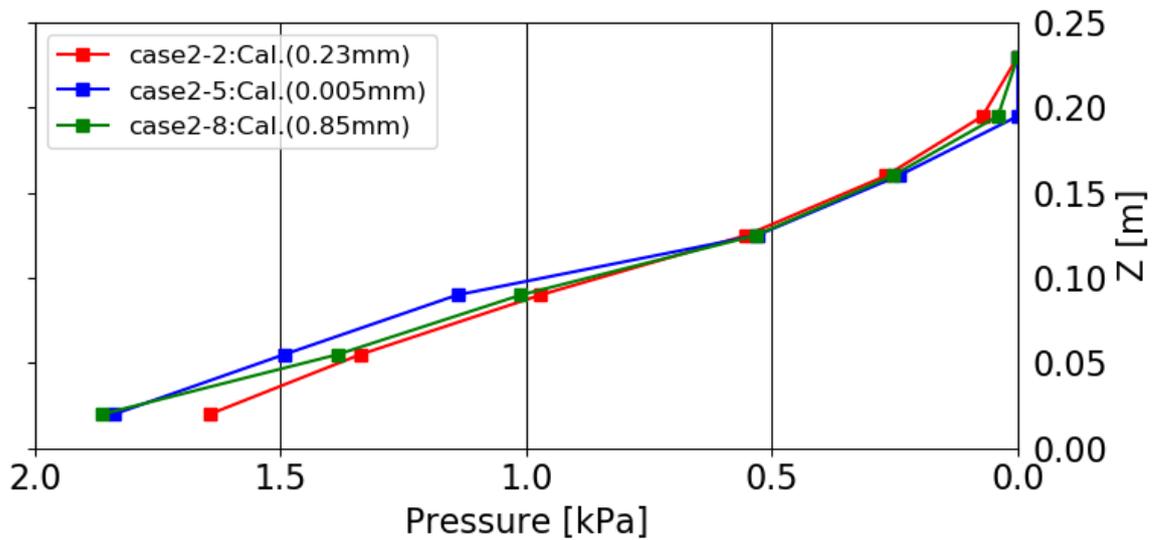


図 2-9-1-3 Case2-2, Case2-5, Case2-8 の防潮堤に作用する段波波圧の最大値
 【河床勾配 : 1/40, 入力波高 : 10.0cm, 防潮堤位置 : -75cm】

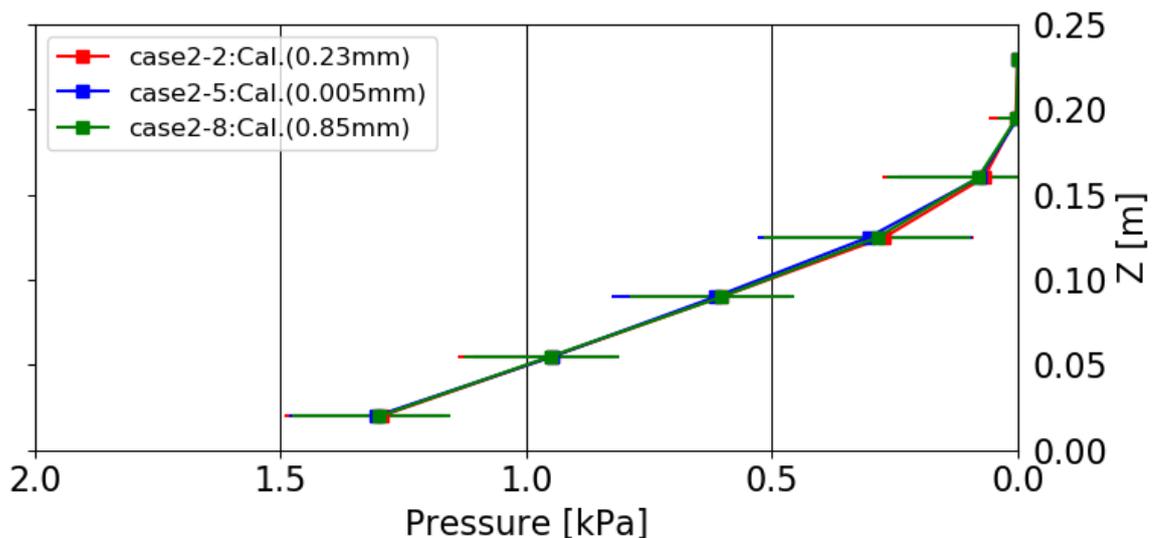


図 2-9-1-4 Case2-2, Case2-5, Case2-8 の防潮堤に作用する持続波圧の平均値
 【河床勾配 : 1/40, 入力波高 : 10.0cm, 防潮堤位置 : -75cm】

(3) 入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case2-3, Case2-6, Case2-9)

入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm の同条件の下, Case2-3【砂粒径 : 0.23mm】, Case2-6【砂粒径 : 0.005mm】, Case2-9【砂粒径 : 0.85mm】の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を図 2-9-1-5 に示し, 持続波圧の平均値を図 2-9-1-6 に示す. Case2-3【砂粒径 : 0.23mm】の解析結果の波圧を赤の実線, Case2-6【砂粒径 : 0.005mm】の解析結果の波圧を青の実線, Case2-9【砂粒径 : 0.85mm】の解析結果の波圧を緑の実線で示す.

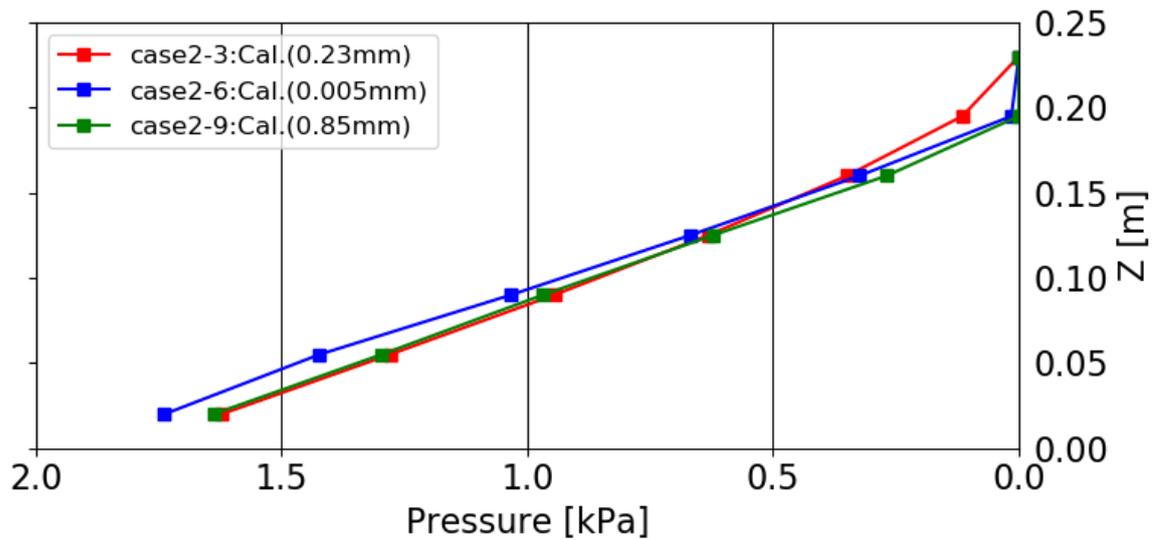


図 2-9-1-5 Case2-3, Case2-6, Case2-9 の防潮堤に作用する段波波圧の最大値【河床勾配 : 1/40, 入力波高 : 12.5cm, 防潮堤位置 : -75cm】

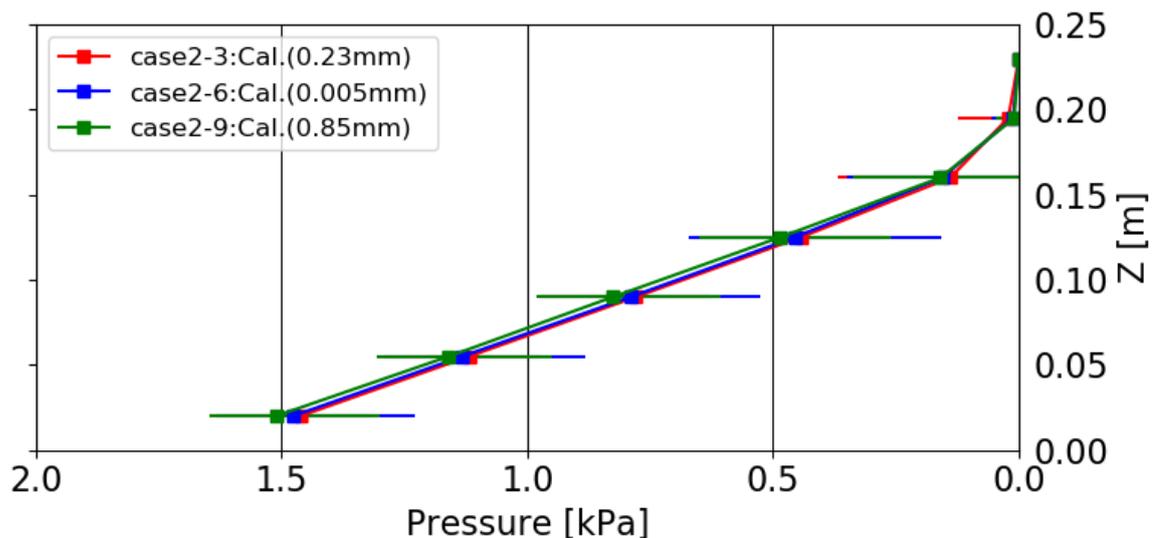


図 2-9-1-6 Case2-3, Case2-6, Case2-9 の防潮堤に作用する持続波圧の平均値【河床勾配 : 1/40, 入力波高 : 12.5cm, 防潮堤位置 : -75cm】

(4) 入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm (Case2-10, Case2-13, Case2-16)

入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm の同条件の下, Case2-10【砂粒径: 0.23mm】, Case2-13【砂粒径: 0.005mm】, Case2-16【砂粒径: 0.85mm】の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を図 2-9-1-7 に示し, 持続波圧の平均値を図 2-9-1-8 に示す. Case2-10【砂粒径: 0.23mm】の解析結果の波圧を赤の実線, Case2-13【砂粒径: 0.005mm】の解析結果の波圧を青の実線, Case2-16【砂粒径: 0.85mm】の解析結果の波圧を緑の実線で示す.

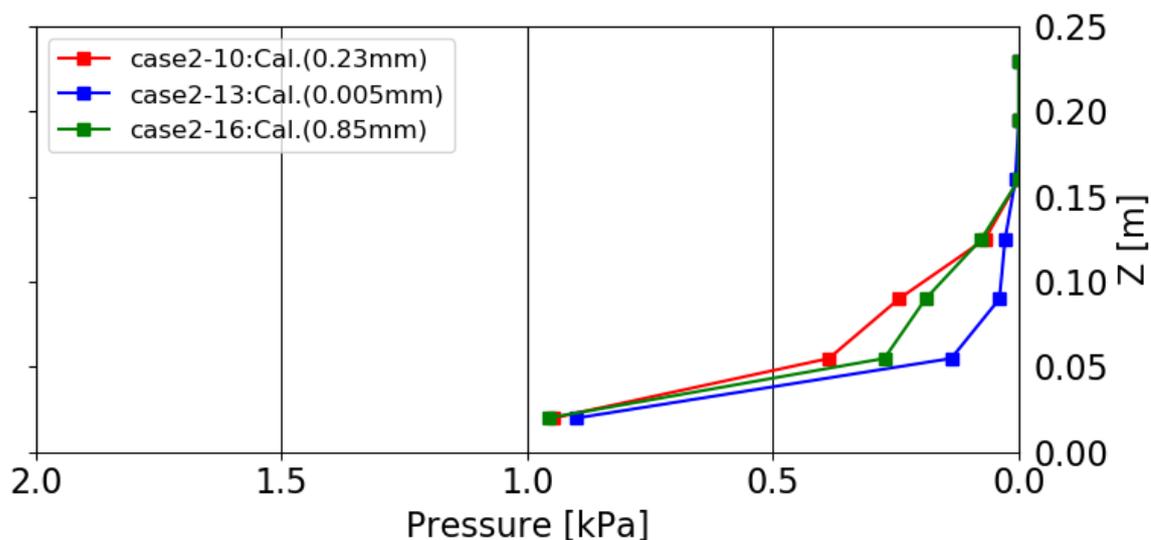


図 2-9-1-7 Case2-10, Case2-13, Case2-16 の防潮堤に作用する段波波圧の最大値【河床勾配: 1/40, 入力波高: 7.5cm, 防潮堤位置: -137.5cm】

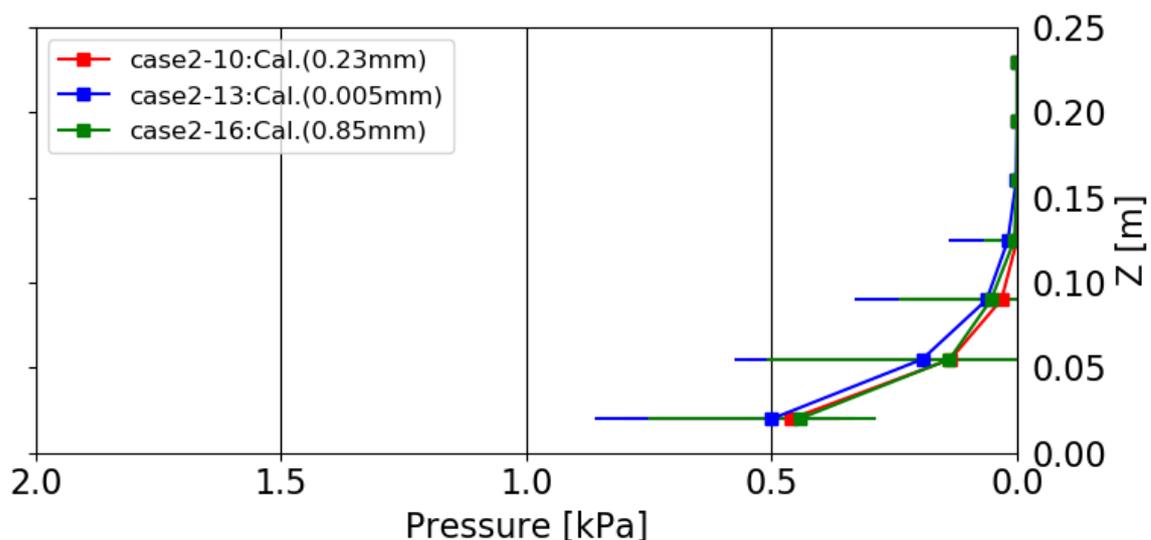


図 2-9-1-8 Case2-10, Case2-13, Case2-16 の防潮堤に作用する持続波圧の平均値【河床勾配: 1/40, 入力波高: 7.5cm, 防潮堤位置: -137.5cm】

(5) 入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm (Case2-11, Case2-14, Case2-17)

入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm の同条件の下, Case2-11【砂粒径: 0.23mm】, Case2-14【砂粒径: 0.005mm】, Case2-17【砂粒径: 0.85mm】の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を図 2-9-1-9 に示し, 持続波圧の平均値を図 2-9-1-10 に示す. Case2-11【砂粒径: 0.23mm】の解析結果の波圧を赤の実線, Case2-14【砂粒径: 0.005mm】の解析結果の波圧を青の実線, Case2-17【砂粒径: 0.85mm】の解析結果の波圧を緑の実線で示す.

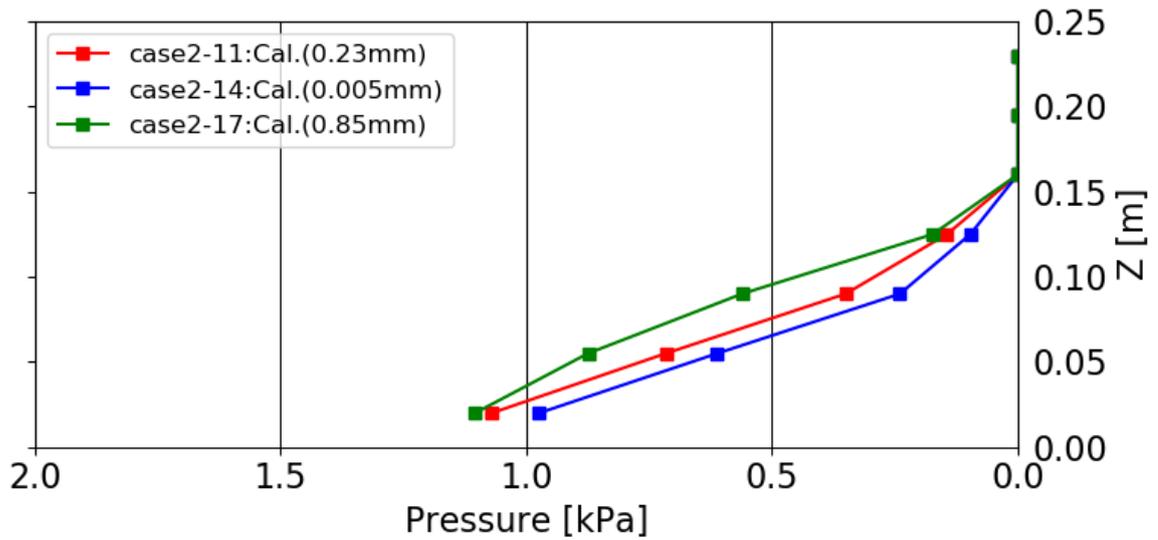


図 2-9-1-9 Case2-11, Case2-14, Case2-17 の防潮堤に作用する段波波圧の最大値【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -137.5cm】

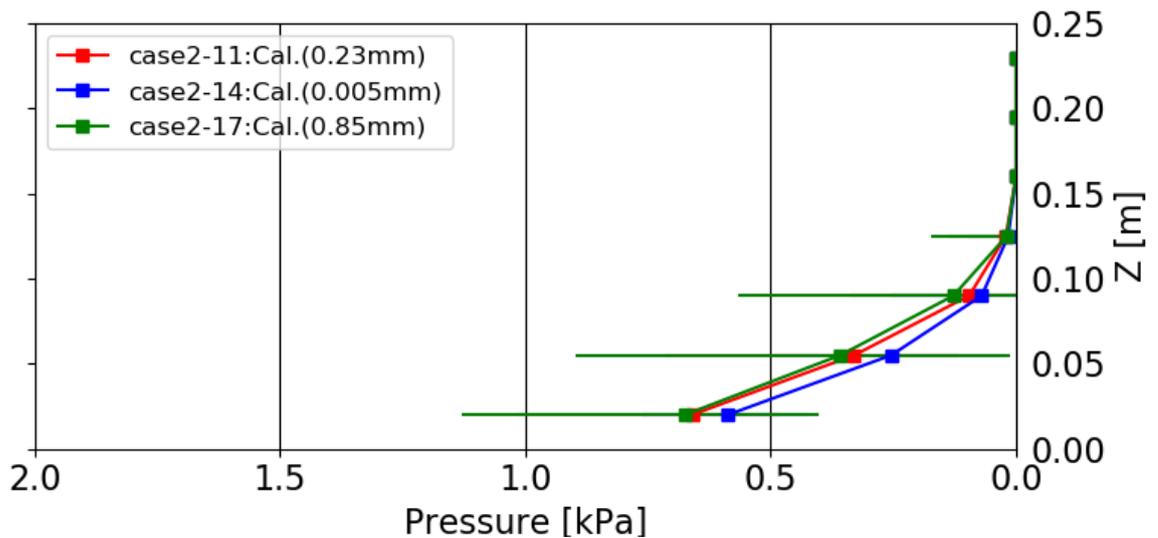


図 2-9-1-10 Case2-11, Case2-14, Case2-17 の防潮堤に作用する持続波圧の平均値【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -137.5cm】

(6) 入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm (Case2-12, Case2-15, Case2-18)

入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm の同条件の下, Case2-12【砂粒径: 0.23mm】, Case2-15【砂粒径: 0.005mm】, Case2-18【砂粒径: 0.85mm】の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を図 2-9-1-11 に示し, 持続波圧の平均値を図 2-9-1-12 に示す. Case2-12【砂粒径: 0.23mm】の解析結果の波圧を赤の実線, Case2-15【砂粒径: 0.005mm】の解析結果の波圧を青の実線, Case2-18【砂粒径: 0.85mm】の解析結果の波圧を緑の実線で示す.

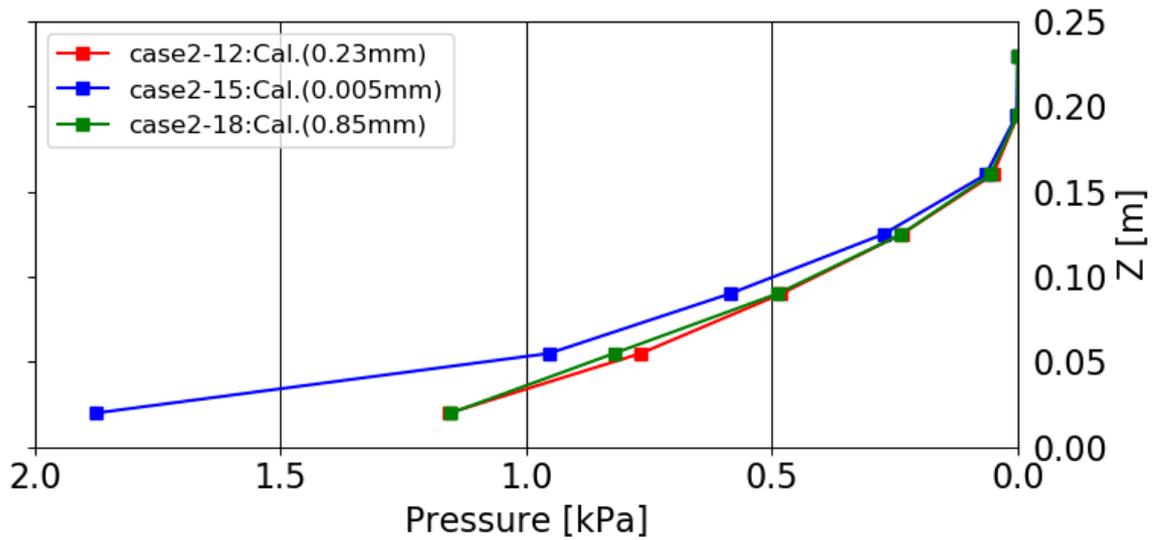


図 2-9-1-11 Case2-12, Case2-15, Case2-18 の防潮堤に作用する段波波圧の最大値【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -137.5cm】

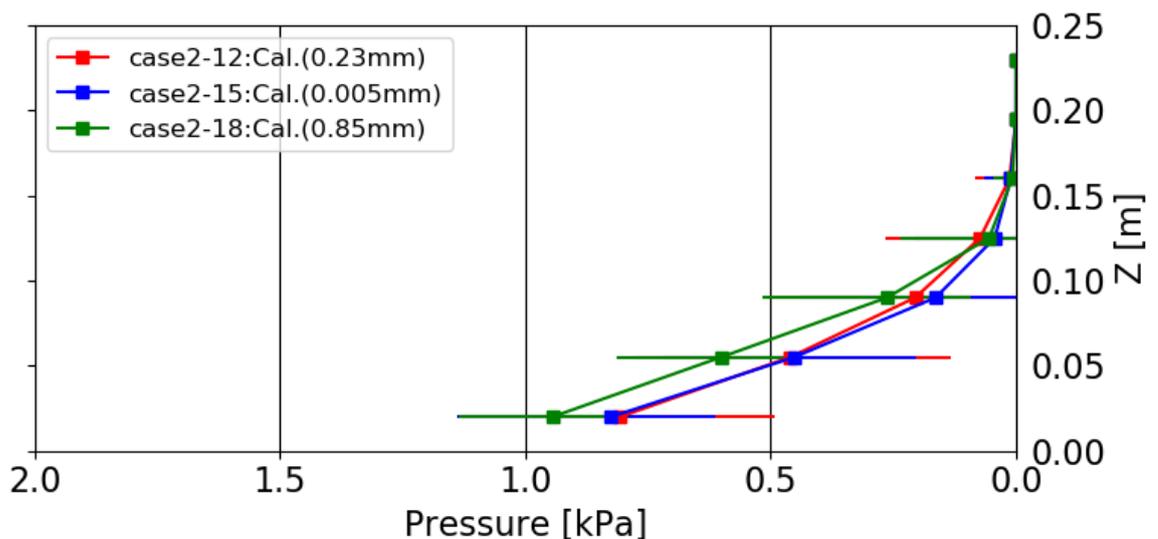


図 2-9-1-12 Case2-12, Case2-15, Case2-18 の防潮堤に作用する持続波圧の平均値【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -137.5cm】

2-9-2 流速場，河床変動高の縦断分布

以下では，砂粒径変化による河床高の差異を調べる目的で，Case2-1～Case2-18における流速場の計算結果，浮遊砂濃度分布の計算結果及び防潮堤前面における河床変動高の縦断分布の計算結果を，入力波高及び防潮堤位置が同条件の下，比較して示す（図 2-9-2-1～図 2-9-2-42 参照）．なお，ここでも全ケースの河床変動高の縦断分布について，解析結果においては防潮堤からの引き波が十分収まる時刻の結果を採用した．

(1) 入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case2-1, Case2-4, Case2-7)
 入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm の同条件の下, 図 2-9-2-1~図
 2-9-2-3 に, Case2-1【砂粒径:0.23mm】, Case2-4【砂粒径:0.005mm】, Case2-7
 【砂粒径:0.85mm】の断面二次元流速スナップショットを順次示す.

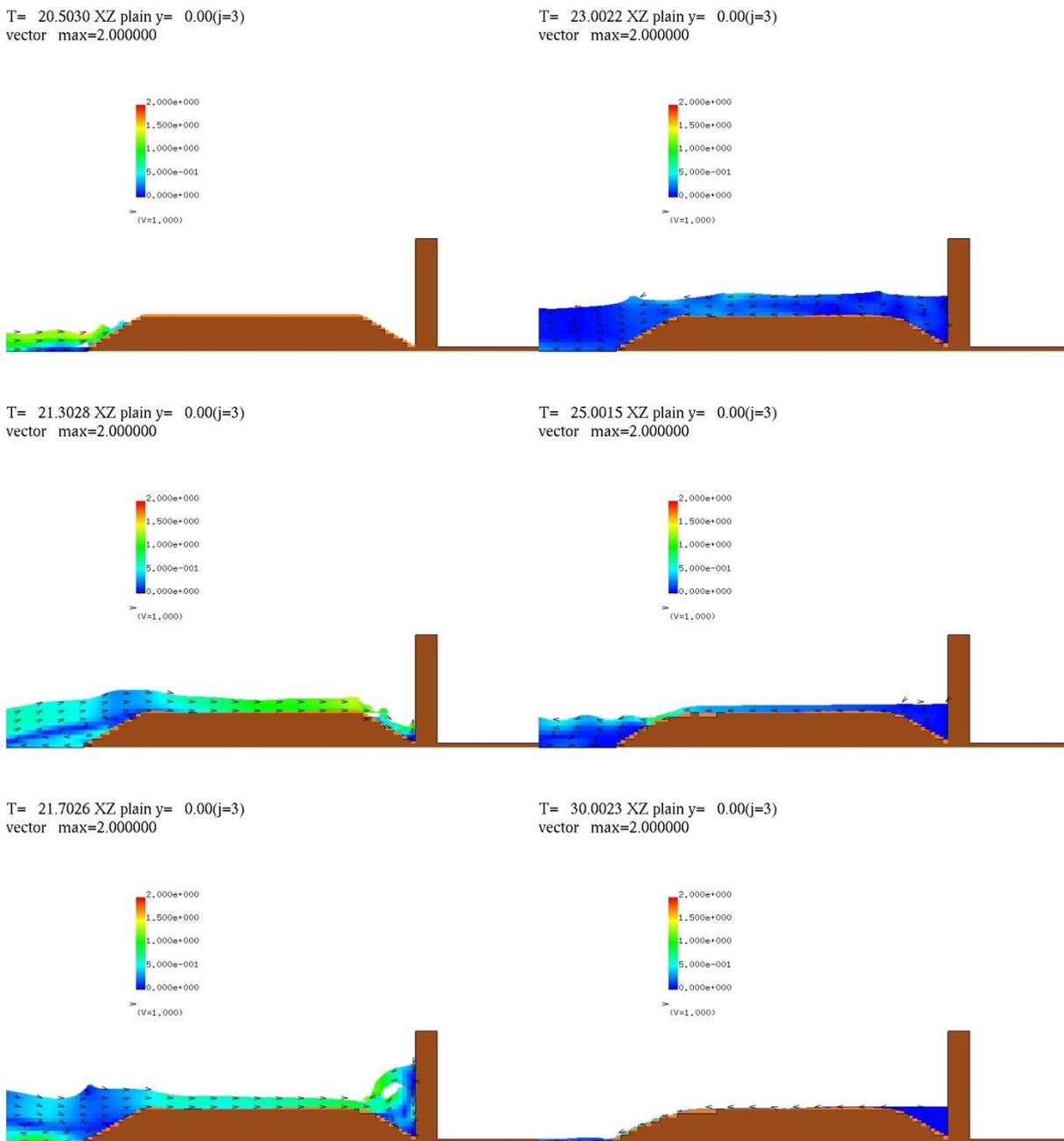
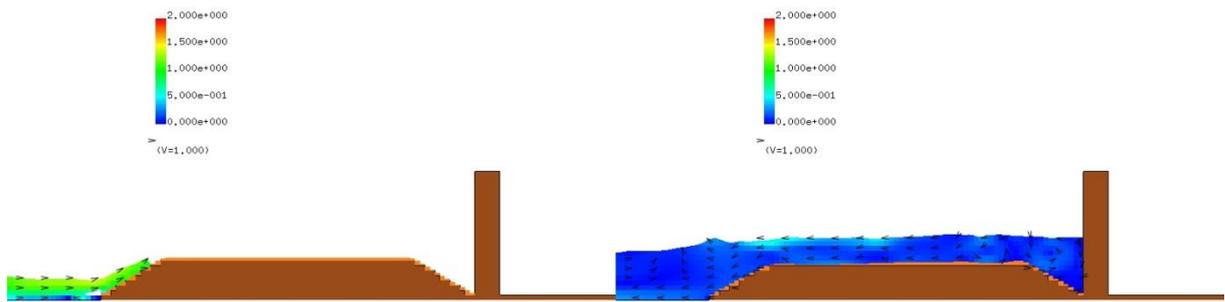


図 2-9-2-1 Case2-1 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 7.5cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂粒径: 0.23mm】

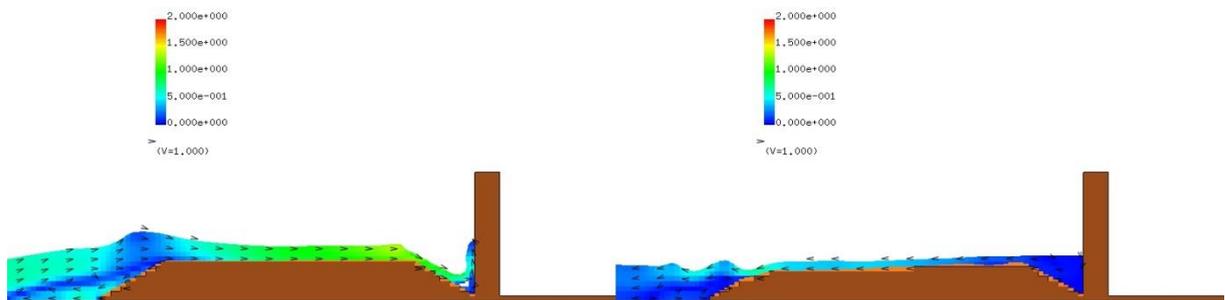
T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 21.3003 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 25.0015 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 21.7001 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

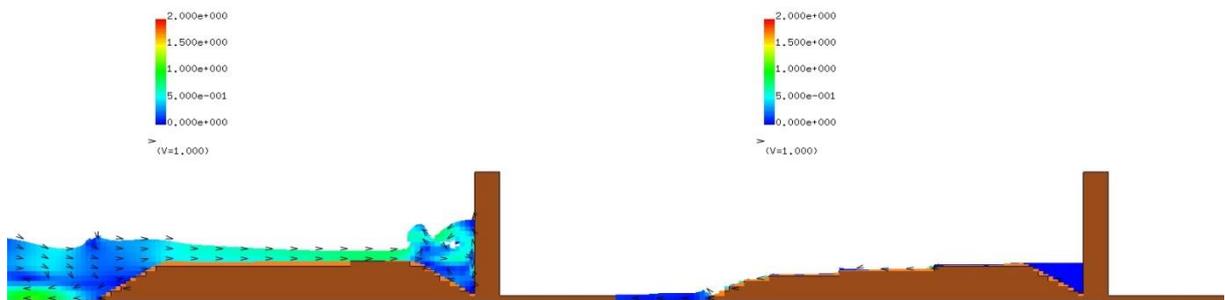
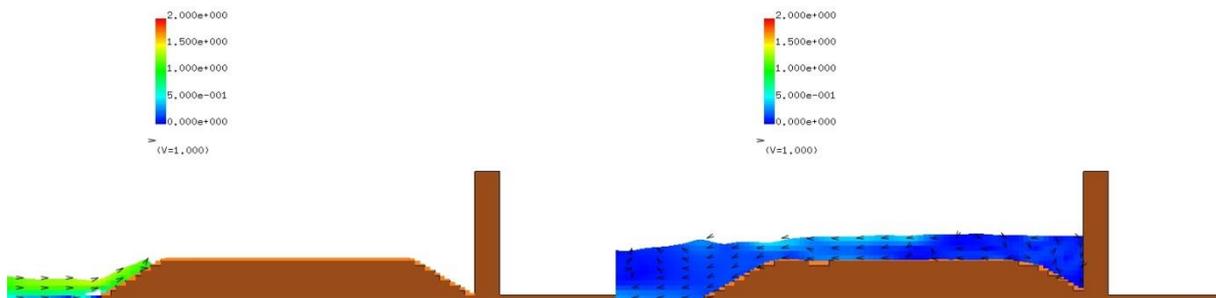


図 2-9-2-2 Case2-4 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配:1/40, 入力波高:7.5cm, 防潮堤位置:-75cm, 砂粒径:0.005mm】

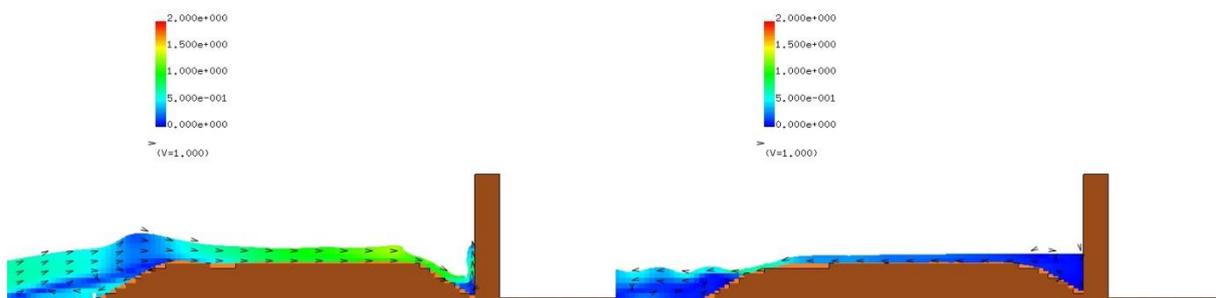
T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 21.3003 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 25.0015 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 21.7001 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



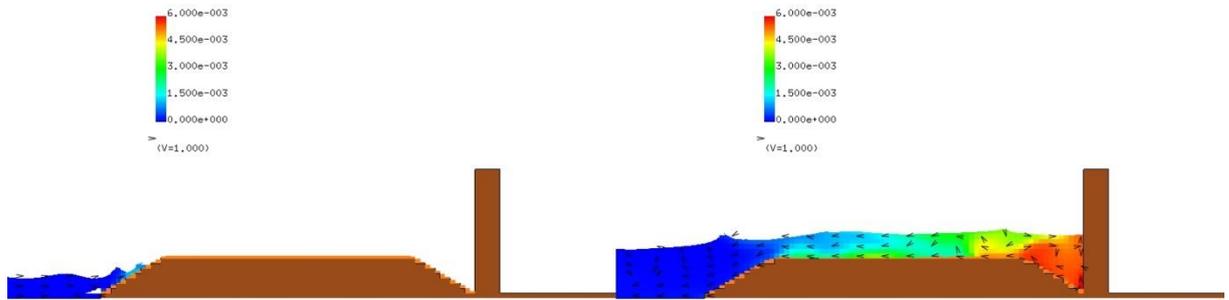
図 2-9-2-3 Case2-7 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-75cm，砂粒径：0.85mm】

入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm の同条件の下, 図 2-9-2-4~図 2-9-2-6 に, Case2-1【砂粒径:0.23mm】, Case2-4【砂粒径:0.005mm】, Case2-7【砂粒径:0.85mm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを順次示す.

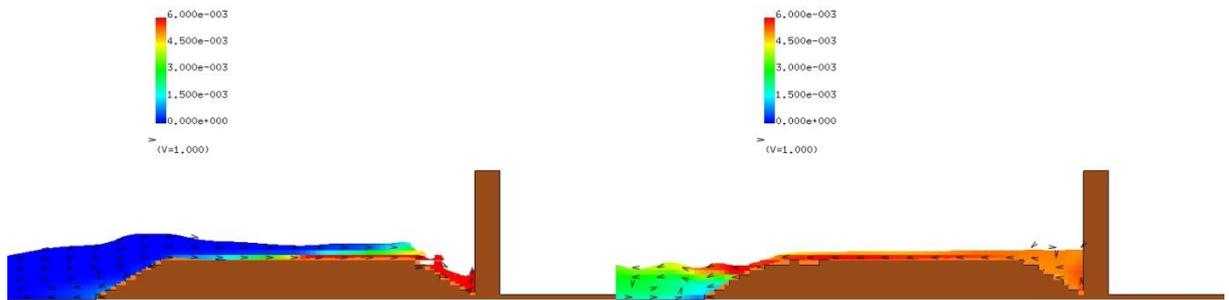
T= 20.50304 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 23.00220 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 21.30277 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 25.00152 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 21.70264 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

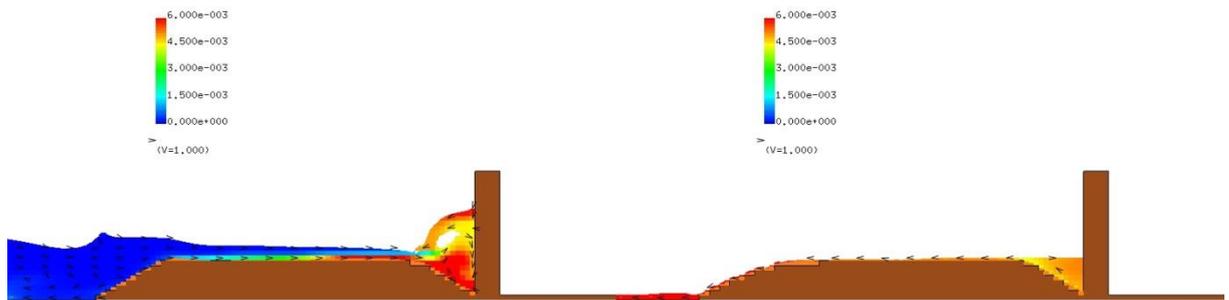
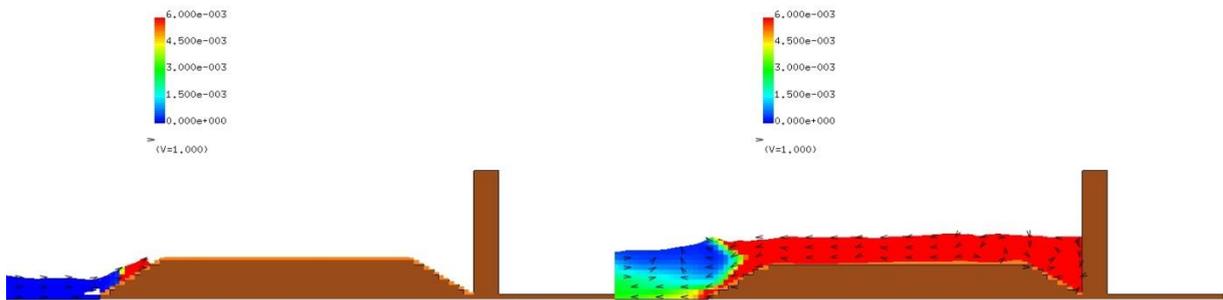


図 2-9-2-4 Case2-1 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配:1/40, 入力波高:7.5cm, 防潮堤位置:-75cm, 砂粒径:0.23mm】

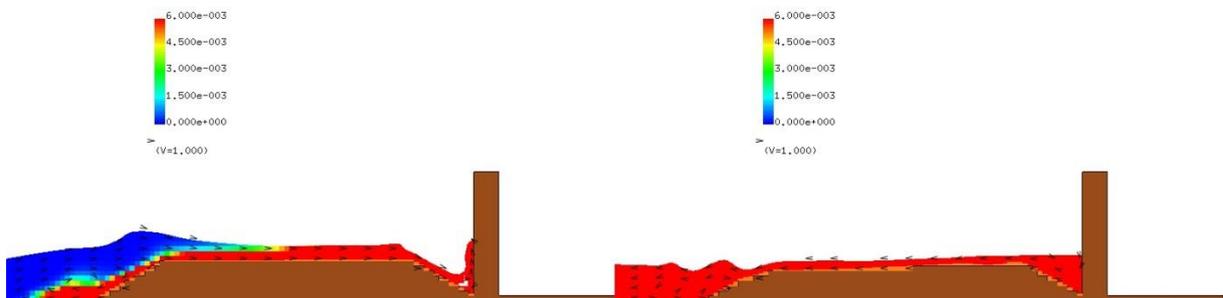
T= 20.50055 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 23.00220 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 21.30027 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 25.00152 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 21.70014 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

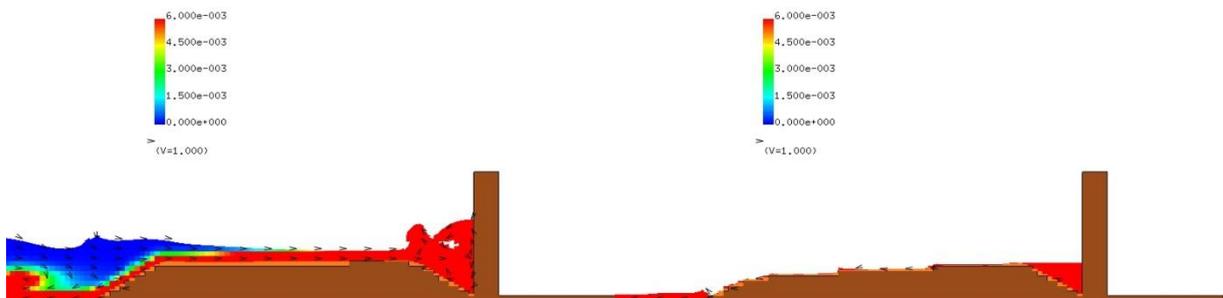
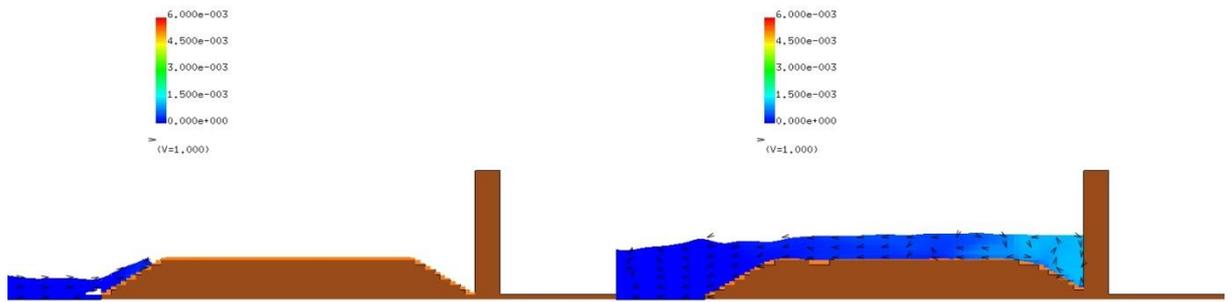


図 2-9-2-5 Case2-4 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配:1/40, 入力波高:7.5cm, 防潮堤位置:-75cm, 砂粒径:0.005mm】

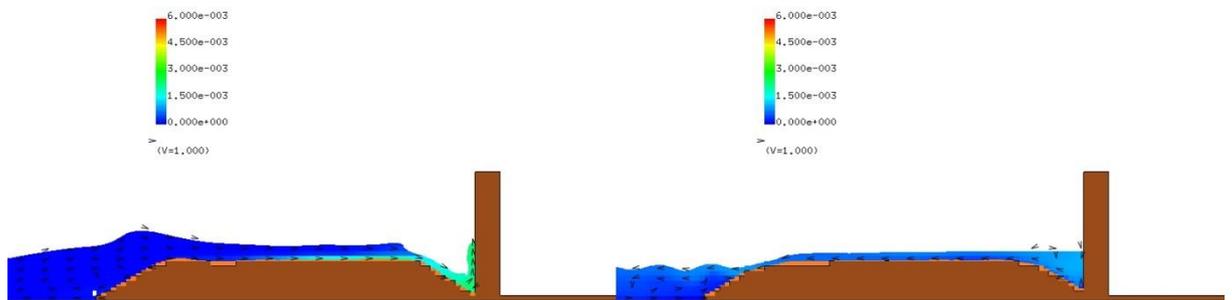
T= 20.50055 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 23.00220 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 21.30027 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 25.00152 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 21.70014 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

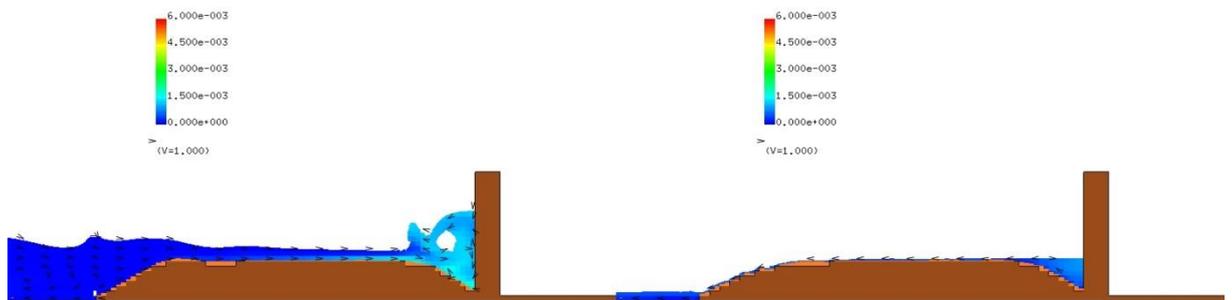


図 2-9-2-6 Case2-7 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-75cm，砂粒径：0.85mm】

Case2-1【砂粒径：0.23mm】，Case2-4【砂粒径：0.005mm】，Case2-7【砂粒径：0.85mm】の河床変動高の縦断分布を比較して，図 2-9-2-7 に示す．

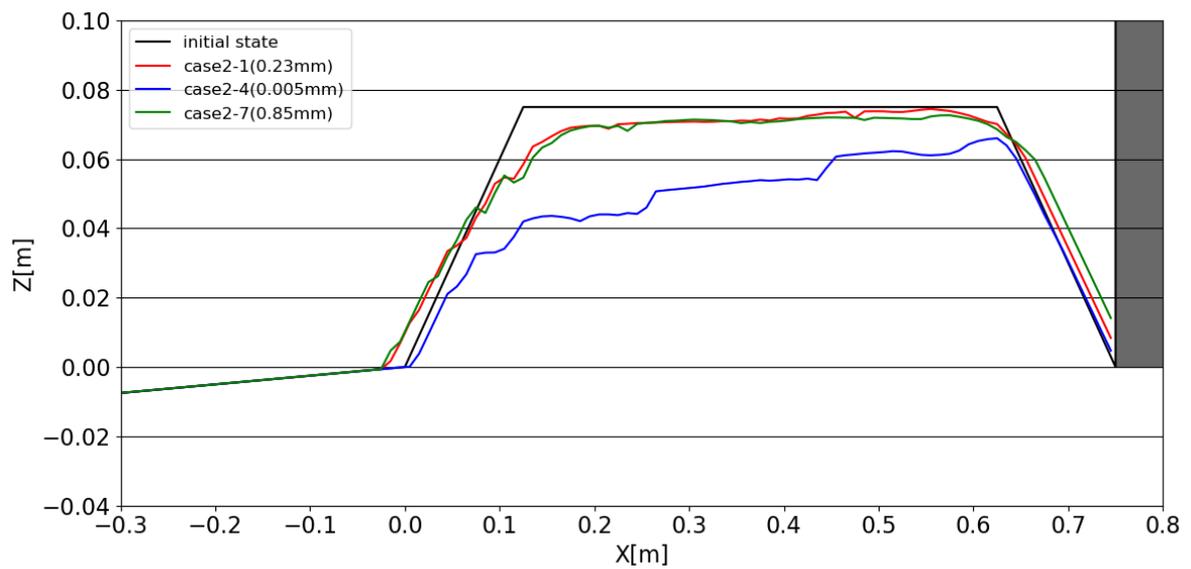


図 2-9-2-7 Case2-1, Case2-4, Case2-7 の河床変動高の縦断分布の比較

【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-75cm】

(2) 入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case2-2, Case2-5, Case2-8)
 入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-75cm の同条件の下, 図 2-9-2-8~図
 2-9-2-10 に, Case2-2【砂粒径:0.23mm】, Case2-5【砂粒径:0.005mm】, Case2-8
 【砂粒径:0.85mm】の断面二次元流速スナップショットを順次示す。

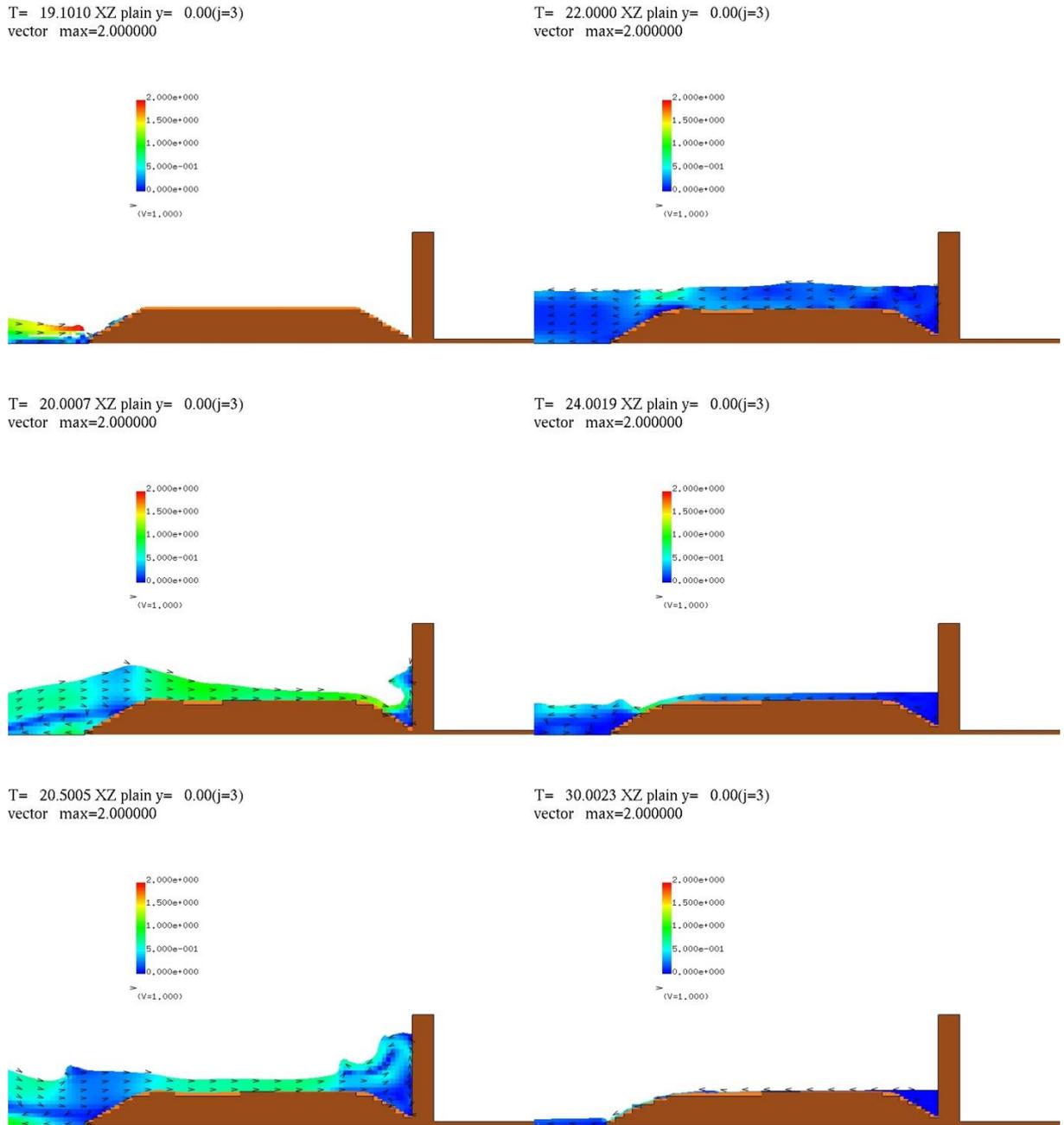
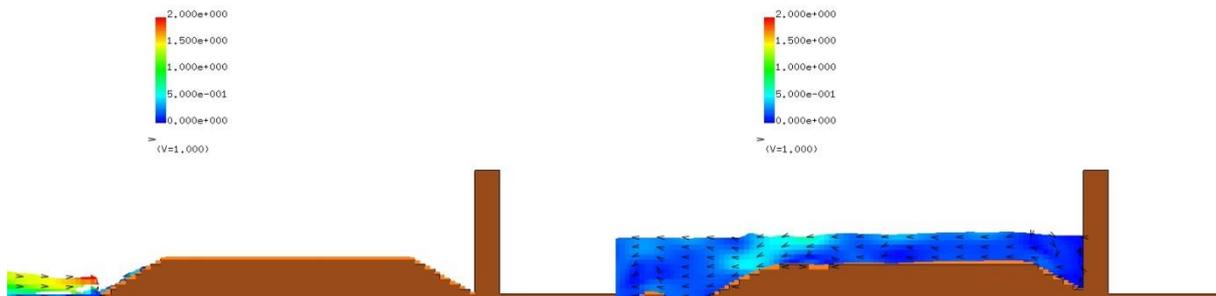


図 2-9-2-8 Case2-2 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配:1/40, 入力波高:10.0cm, 防潮堤位置:-75cm, 砂粒径:0.23mm】

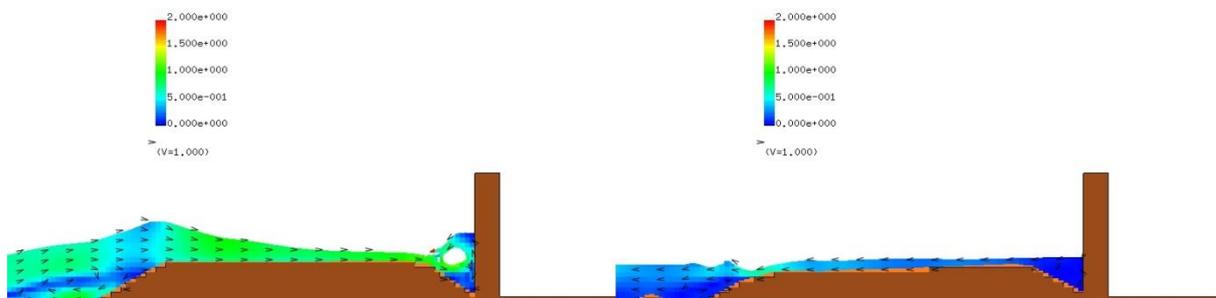
T= 19.1010 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 22.0000 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 20.0007 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 24.0019 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

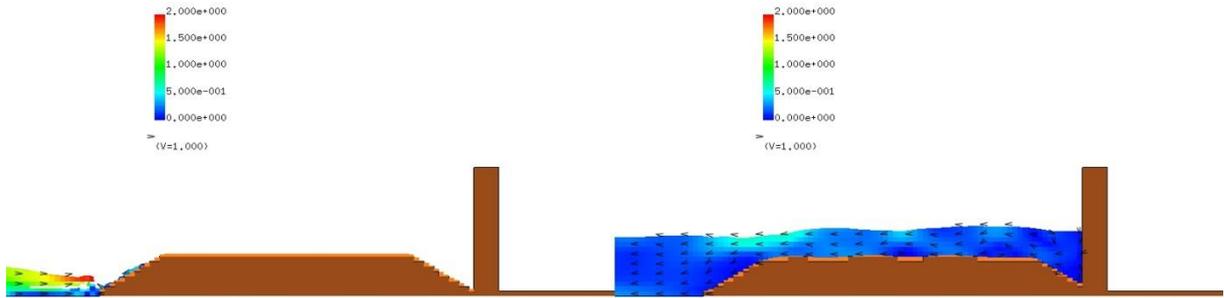


図 2-9-2-91 Case2-5 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂粒径: 0.005mm】

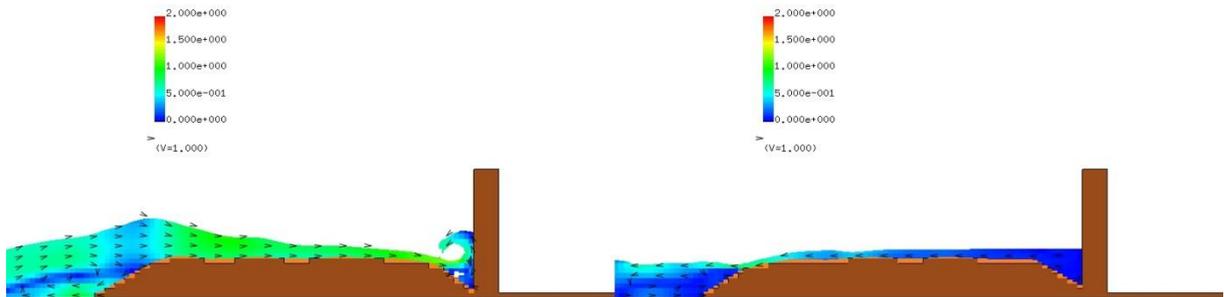
T= 19.1010 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 22.0000 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 20.0007 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 24.0019 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

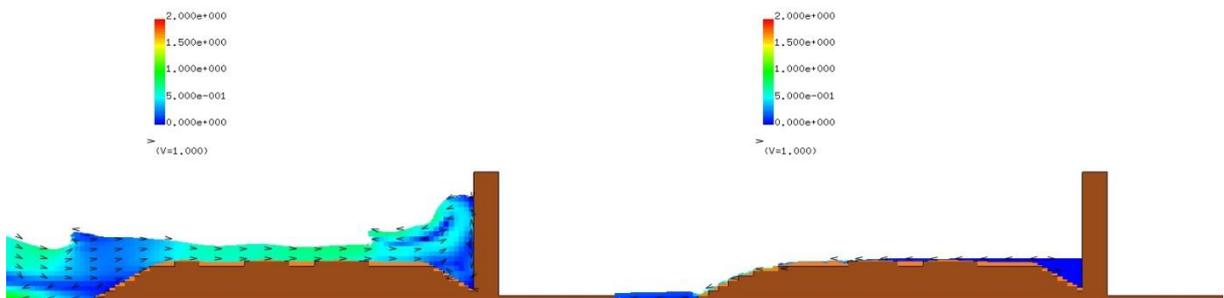


図 2-9-2-10 Case2-8 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-75cm，砂粒径：0.85mm】

入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-75cm の同条件の下, 図 2-9-2-11~図 2-9-2-13 に, Case2-2【砂粒径:0.23mm】, Case2-5【砂粒径:0.005mm】, Case2-8【砂粒径:0.85mm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを順次示す.

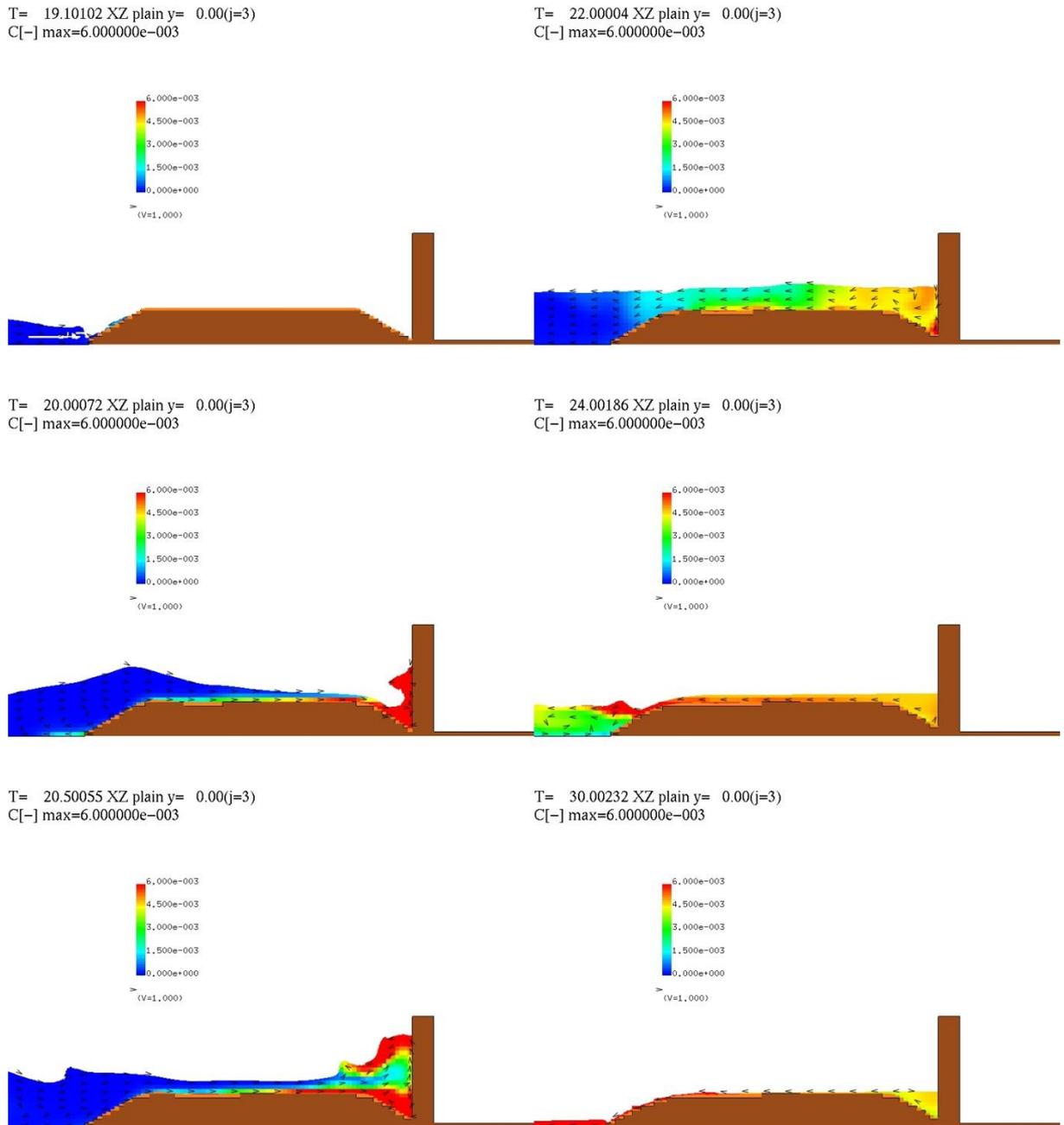
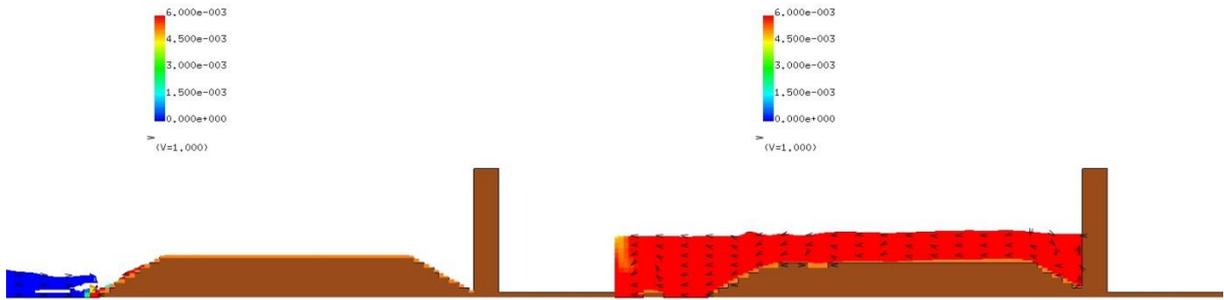


図 2-9-2-11 Case2-2 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配:1/40, 入力波高:10.0cm, 防潮堤位置:-75cm, 砂粒径:0.23mm】

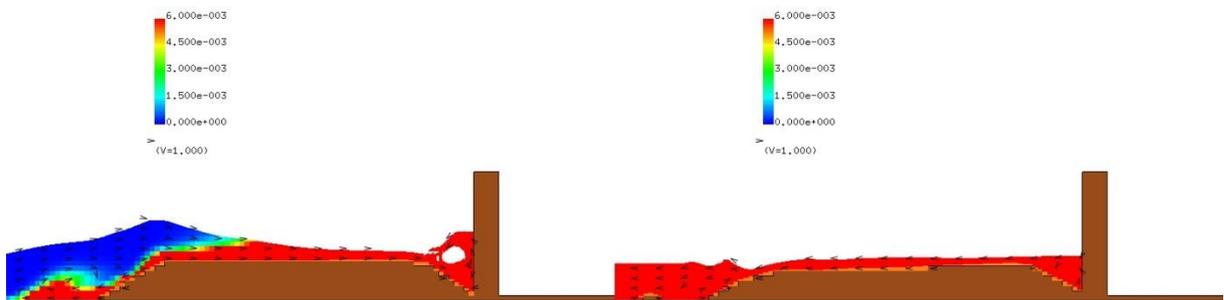
T= 19.10102 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 22.00004 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 20.00072 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 24.00186 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 20.50055 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

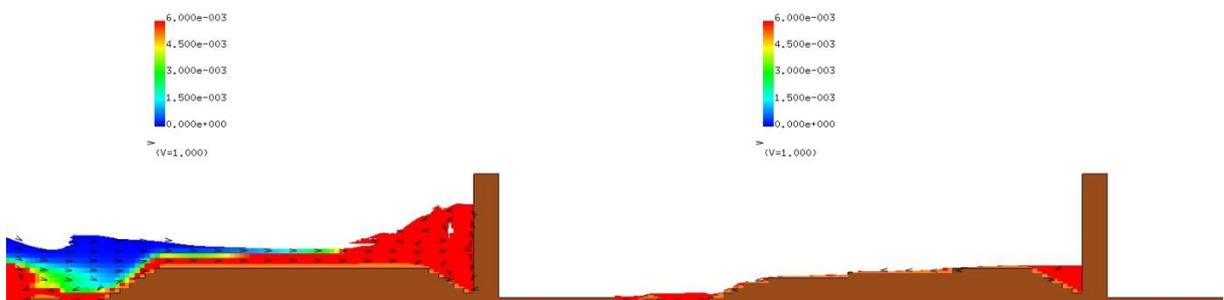
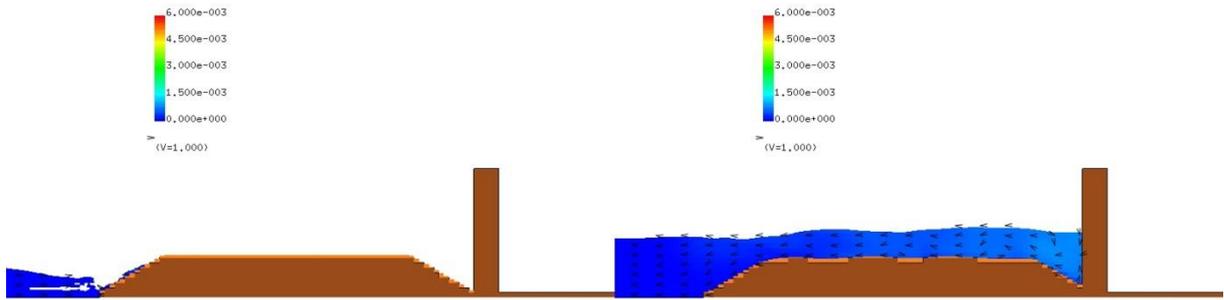


図 2-9-2-122 Case2-5 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配:1/40, 入力波高:10.0cm, 防潮堤位置:-75cm, 砂粒径:0.005mm】

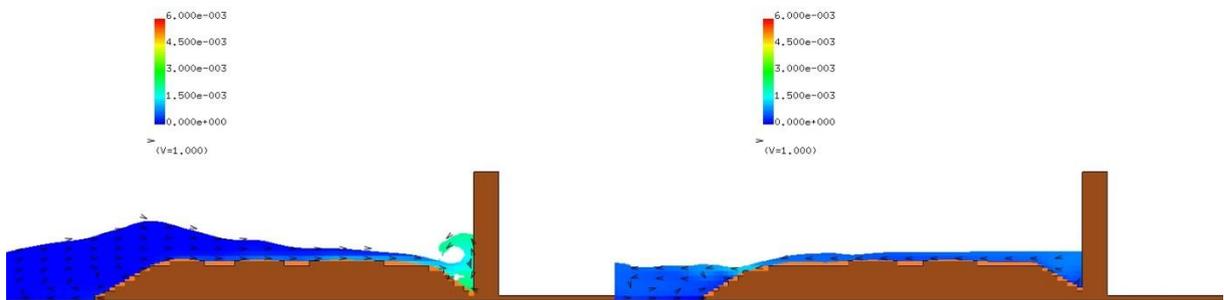
T= 19.10102 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 22.00004 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 20.00072 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 24.00186 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 20.50055 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

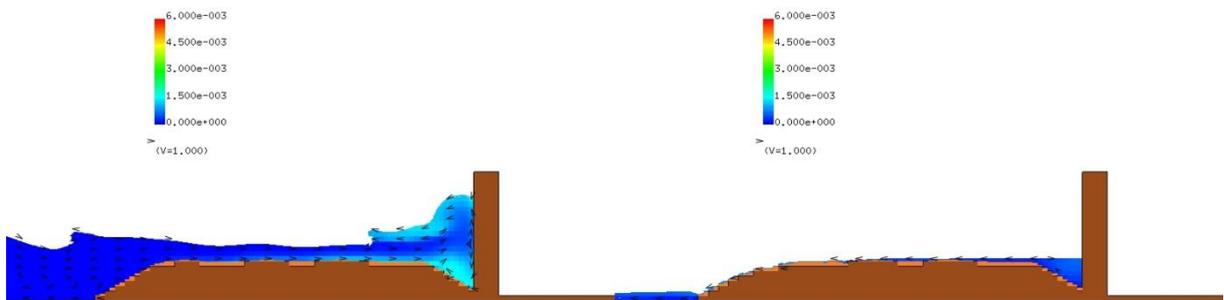


図 2-9-2-13 Case2-8 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
【河床勾配：1/40，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-75cm，砂粒径：0.85mm】

Case2-2【砂粒径：0.23mm】，Case2-5【砂粒径：0.005mm】，Case2-8【砂粒径：0.85mm】の河床変動高の縦断分布を比較して，図 2-9-2-14 に示す。

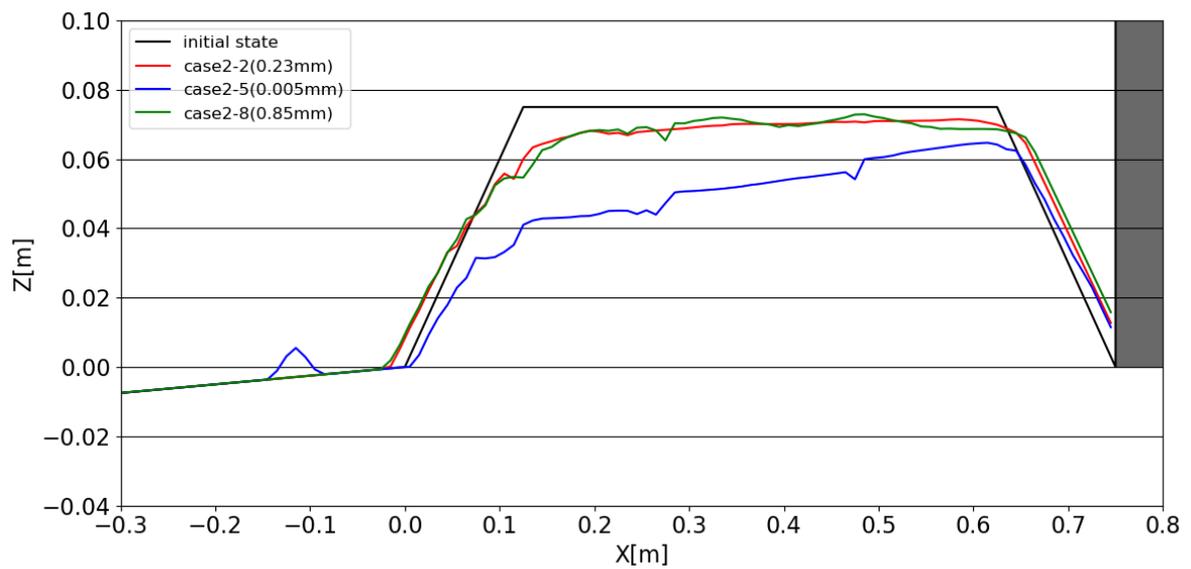


図 2-9-2-14 Case2-2，Case2-5，Case2-8 の河床変動高の縦断分布の比較

【河床勾配：1/40，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-75cm】

(3) 入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case2-3, Case2-6, Case2-9)
 入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm の同条件の下, 図 2-9-2-15~図
 2-9-2-17 に, Case2-3【砂粒径:0.23mm】, Case2-6【砂粒径:0.005mm】, Case2-9
 【砂粒径:0.85mm】の断面二次元流速スナップショットを順次示す.

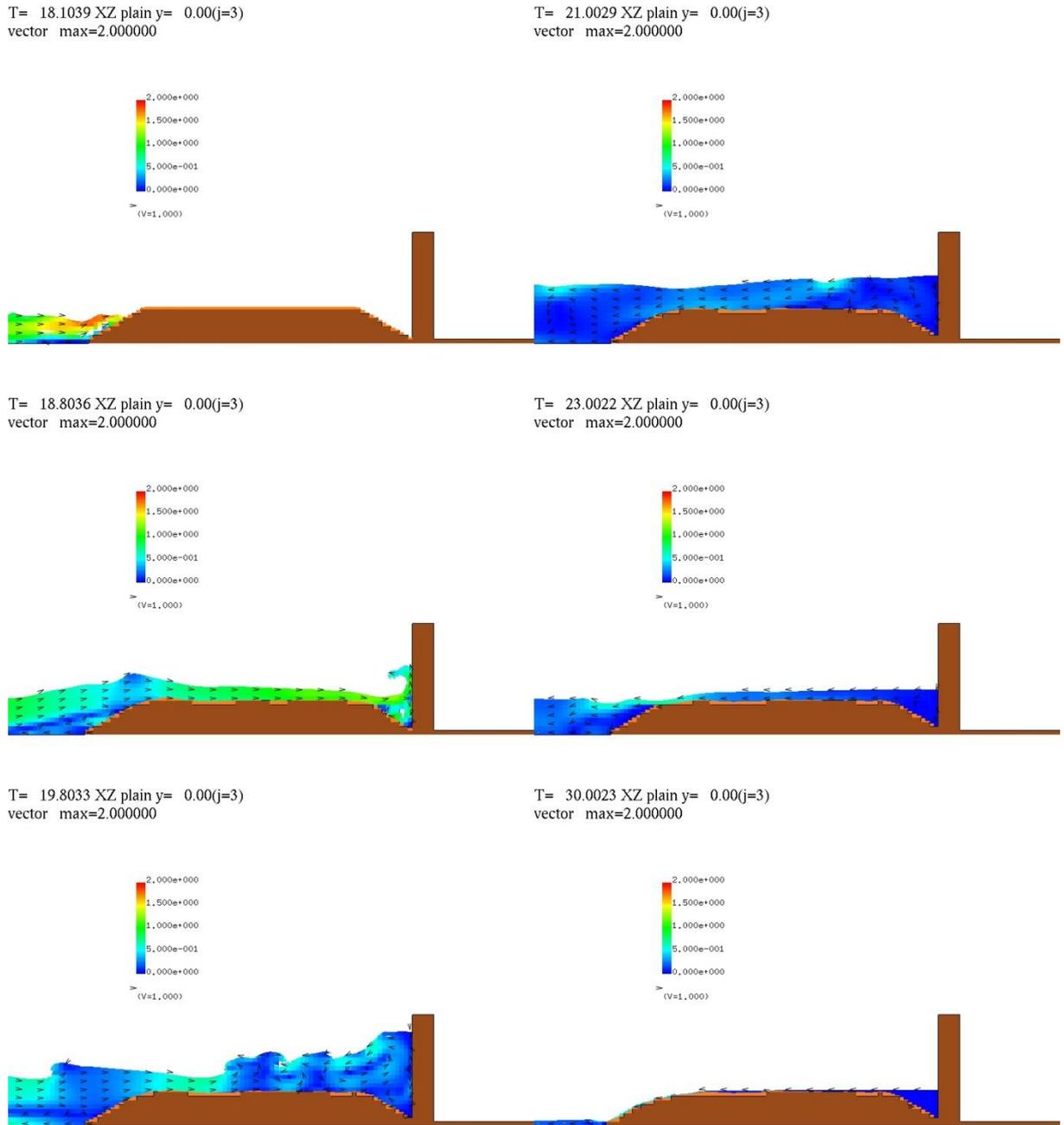
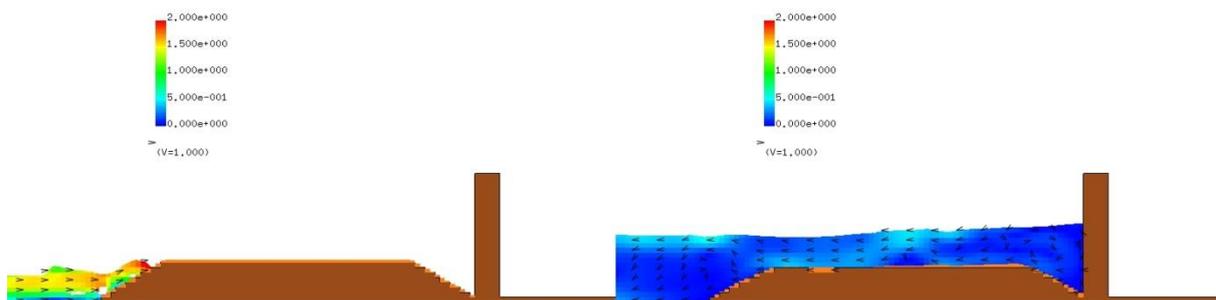


図 2-9-2-15 Case2-3 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配:1/40, 入力波高:12.5cm, 防潮堤位置:-75cm, 砂粒径:0.23mm】

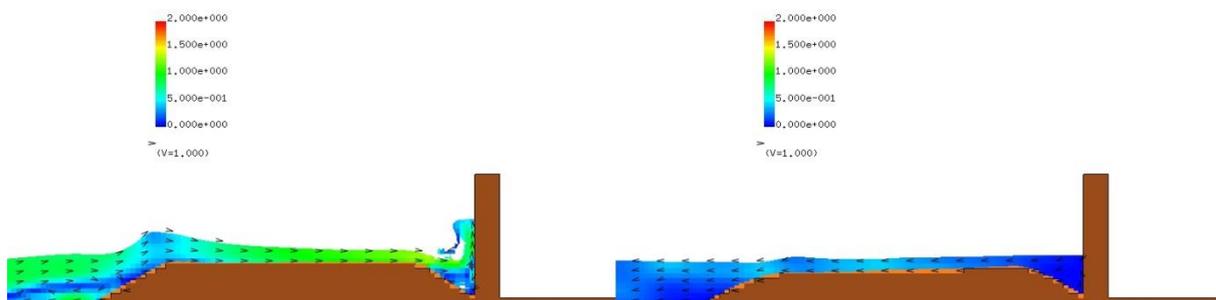
T= 18.1014 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 21.0004 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 18.8011 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 19.8008 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

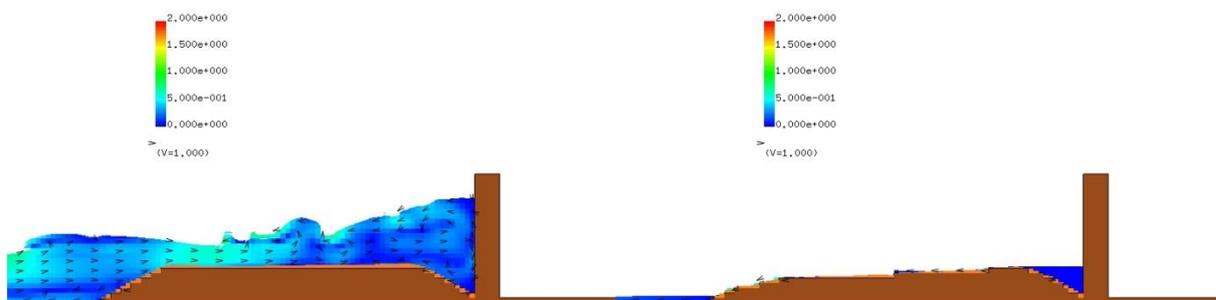
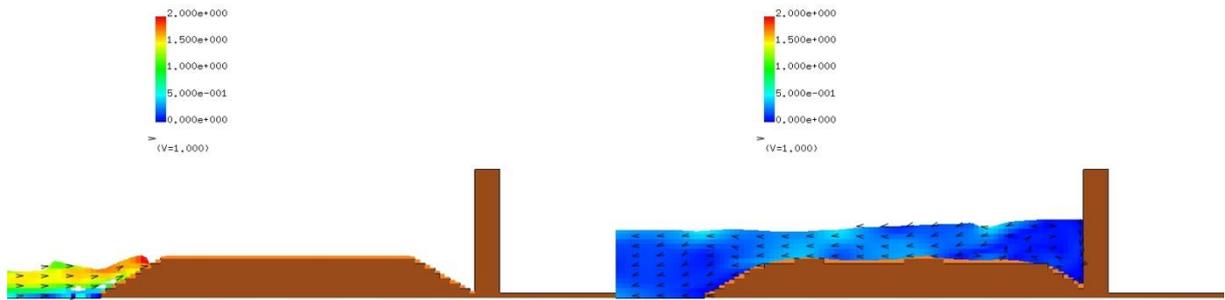


図 2-9-2-16 Case2-6 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配:1/40, 入力波高:12.5cm, 防潮堤位置:-75cm, 砂粒径:0.005mm】

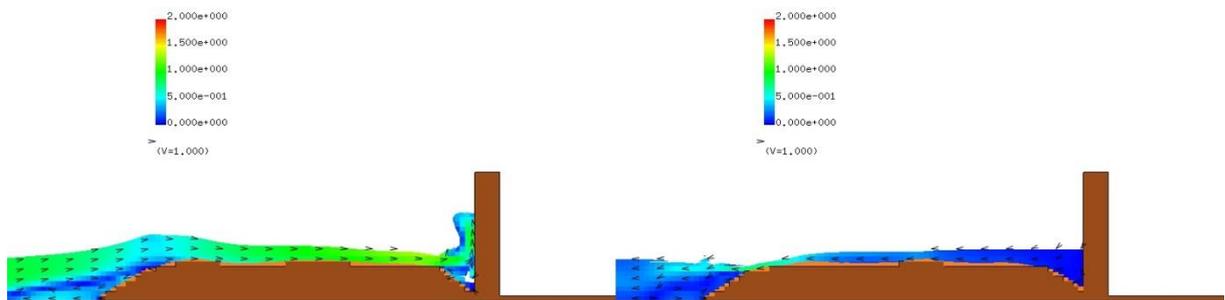
T= 18.1014 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 21.0004 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 18.8011 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 19.8008 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

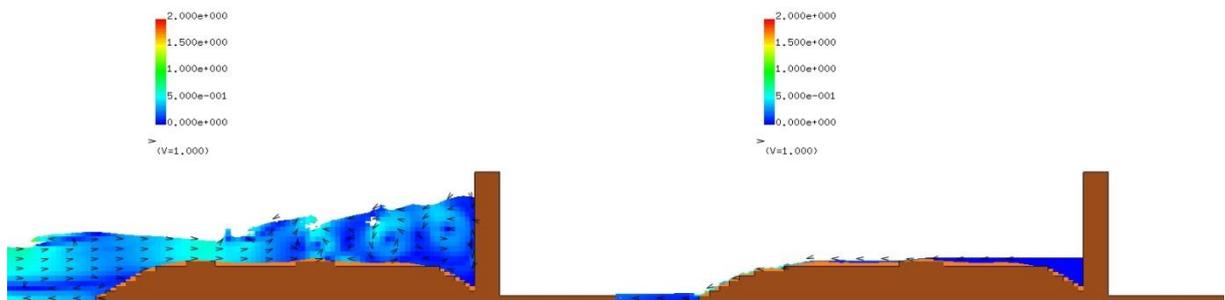


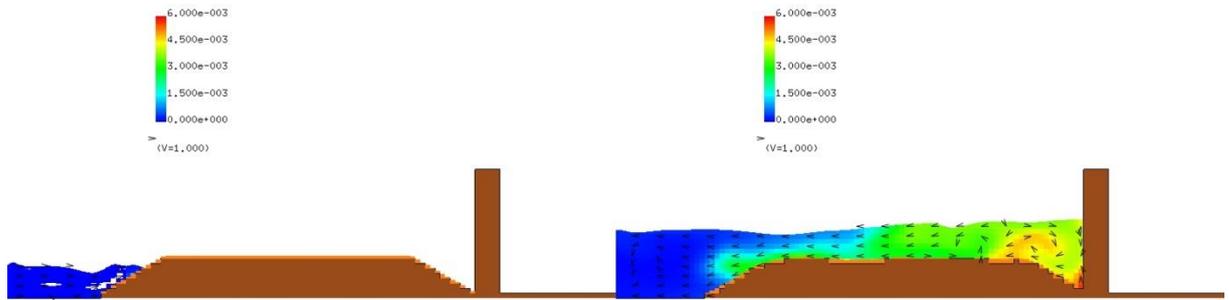
図 2-9-2-17 Case2-9 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-75cm，砂粒径：0.85mm】

入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm の同条件の下, 図 2-9-2-18~図 2-9-2-20 に, Case2-3【砂粒径:0.23mm】, Case2-6【砂粒径:0.005mm】, Case2-9【砂粒径:0.85mm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを順次示す.

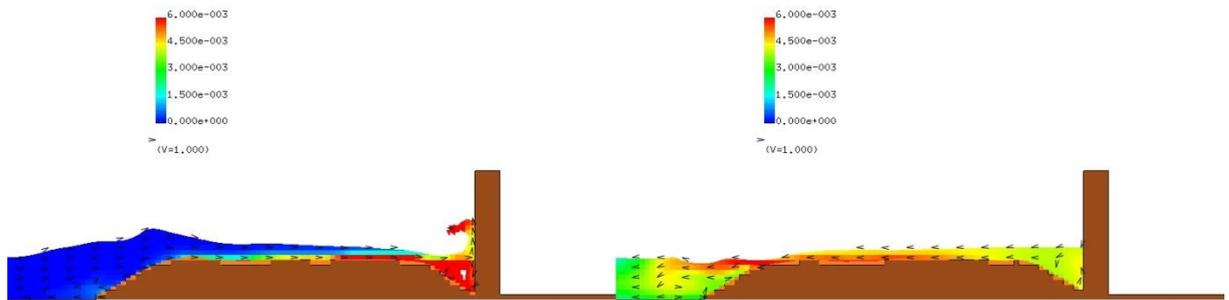
T= 18.10386 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 21.00288 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 18.80362 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 23.00220 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 19.80328 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

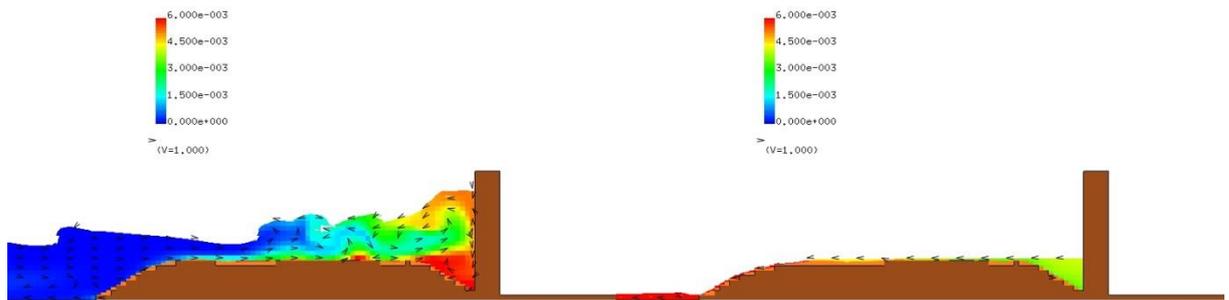
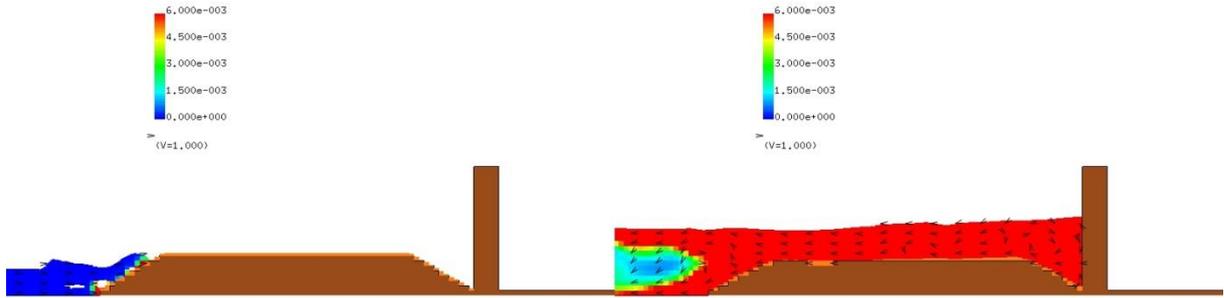


図 2-9-2-18 Case2-3 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配:1/40, 入力波高:12.5cm, 防潮堤位置:-75cm, 砂粒径:0.23mm】

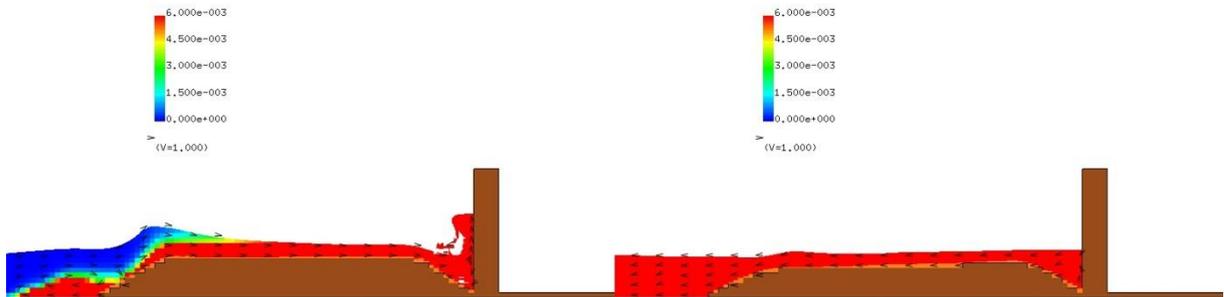
T= 18.10136 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 21.00038 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 18.80112 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 23.00220 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 19.80078 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

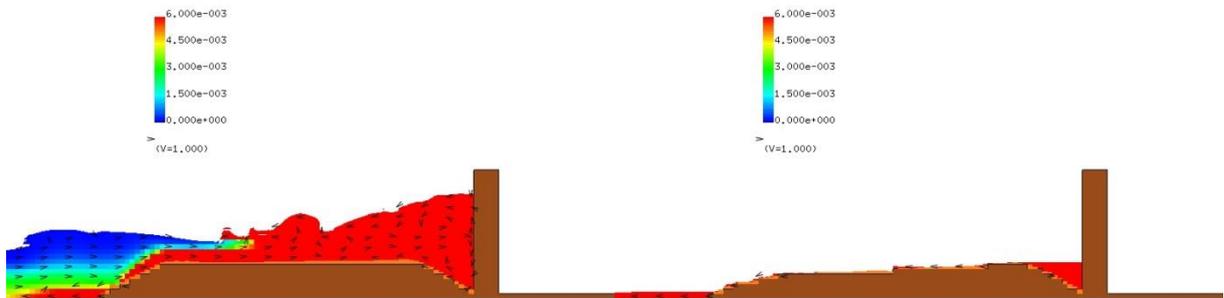
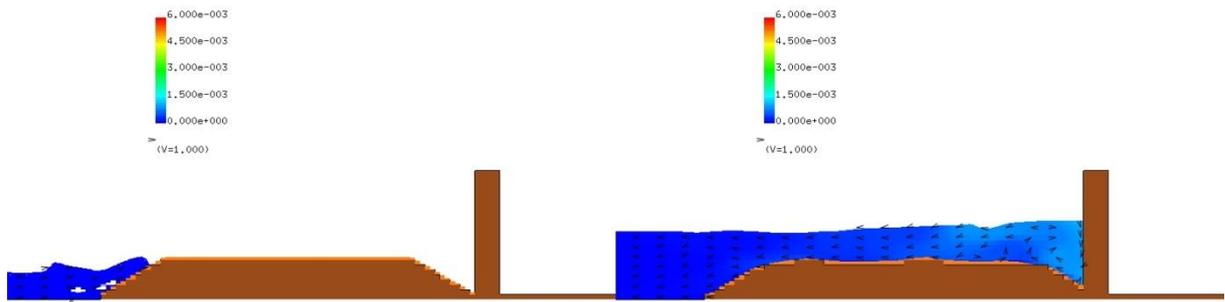


図 2-9-2-19 Case2-6 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂粒径: 0.005mm】

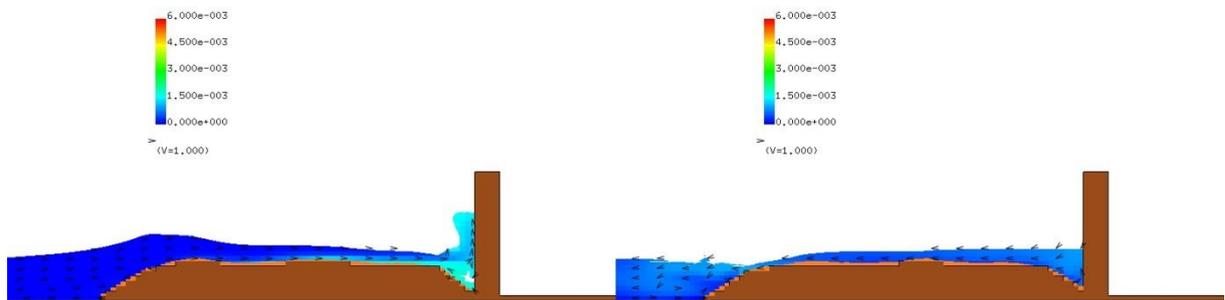
T= 18.10136 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 21.00038 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 18.80112 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 23.00220 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 19.80078 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

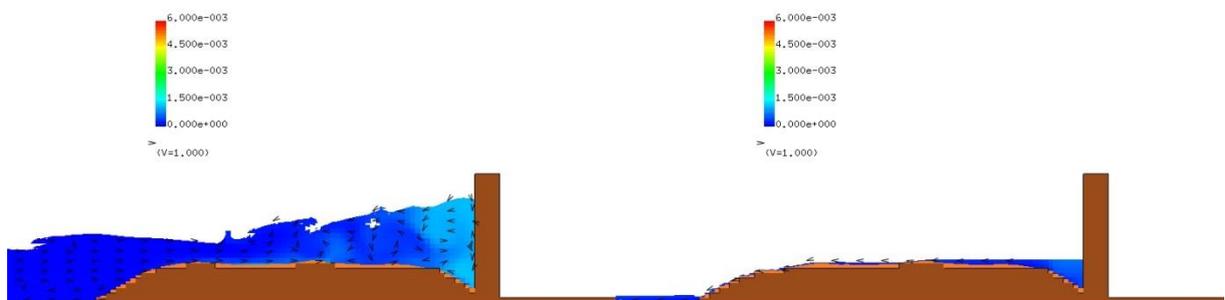


図 2-9-2-20 Case2-9 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂粒径: 0.85mm】

Case2-3【砂粒径：0.23mm】，Case2-6【砂粒径：0.005mm】，Case2-9【砂粒径：0.85mm】の河床変動高の縦断分布を比較して，図 2-9-2-21 に示す．

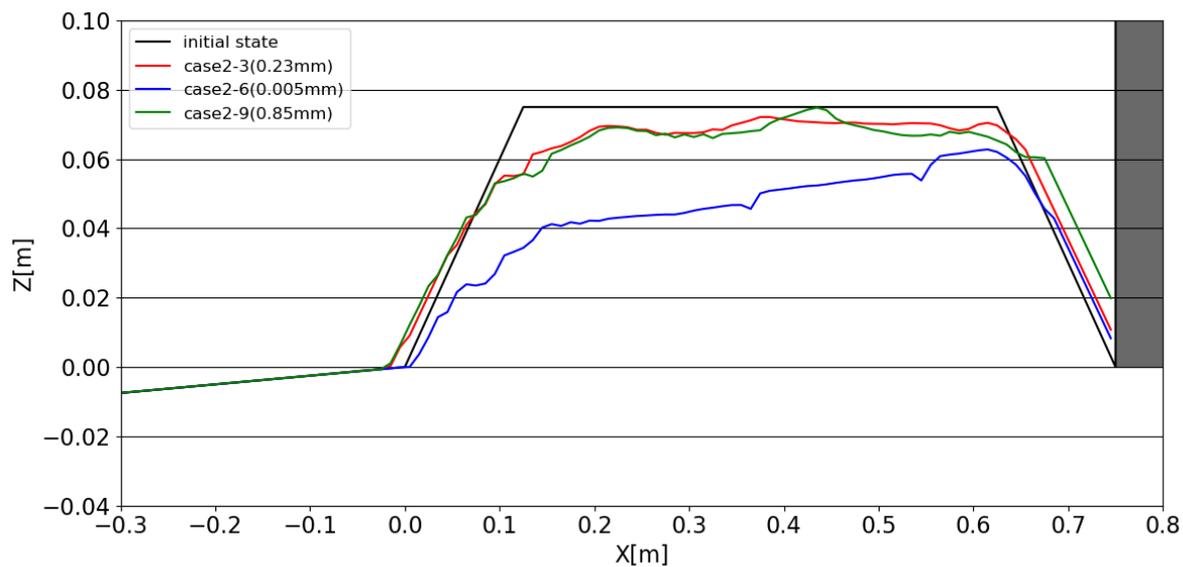


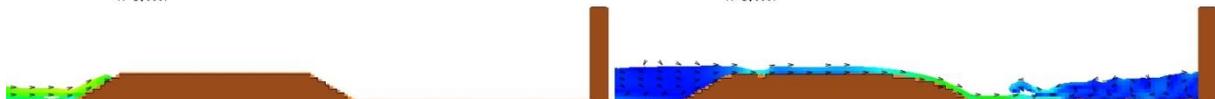
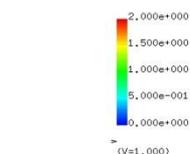
図 2-9-2-21 Case2-3，Case2-6，Case2-9 の河床変動高の縦断分布の比較

【河床勾配：1/40，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-75cm】

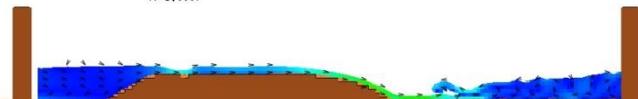
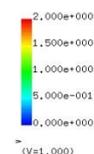
(4) 入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm (Case2-10, Case2-13, Case2-16)

入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm の同条件の下, 図 2-9-2-22 ~ 図 2-9-2-24 に, Case2-10【砂粒径:0.23mm】, Case2-13【砂粒径:0.005mm】, Case2-16【砂粒径:0.85mm】の断面二次元流速スナップショットを順次示す.

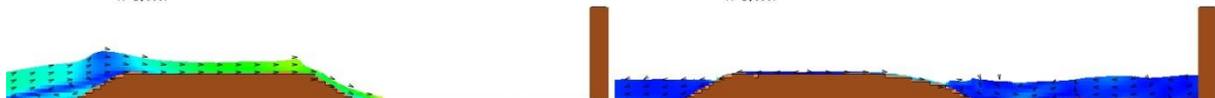
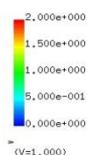
T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



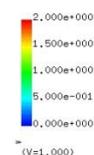
T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



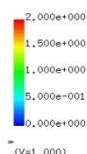
T= 21.3003 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 25.0015 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 21.7001 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

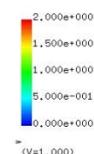
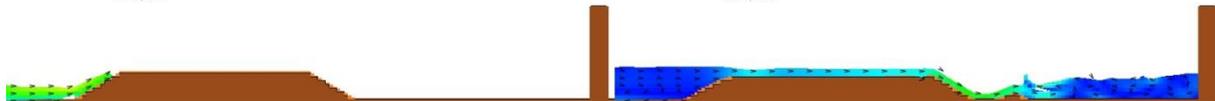
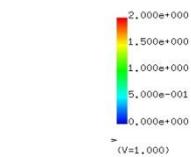


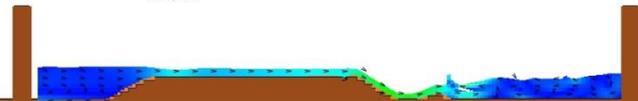
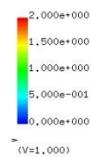
図 2-9-2-22 Case2-10 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配:1/40, 入力波高:7.5cm, 防潮堤位置:-137.5cm, 砂粒径:0.23mm】

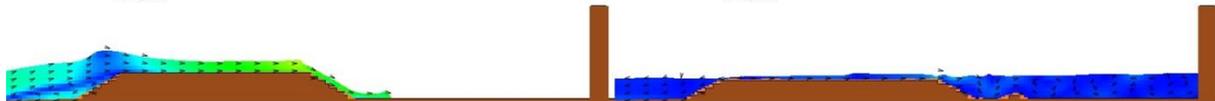
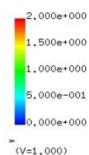
T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



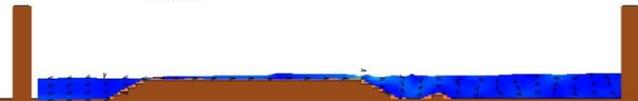
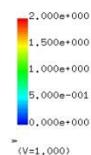
T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



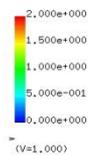
T= 21.3003 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 25.0015 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 21.7001 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

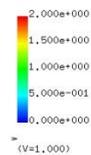
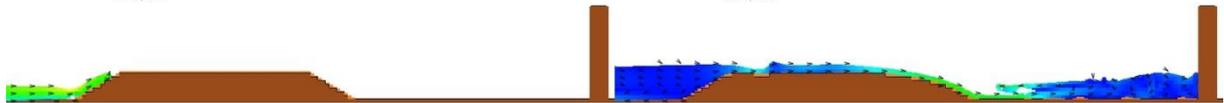
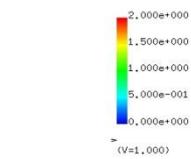


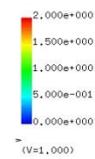
図 2-9-2-23 Case2-13 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-137.5cm，砂粒径：
0.005mm】

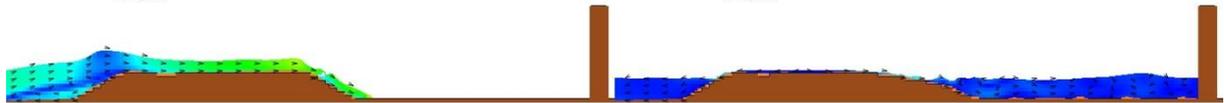
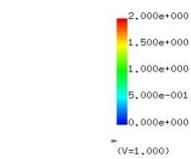
T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



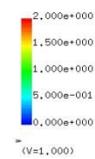
T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



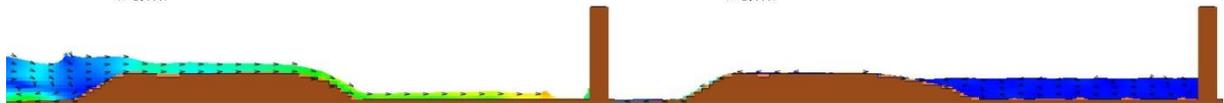
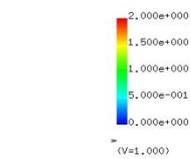
T= 21.3003 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 25.0015 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 21.7001 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

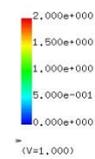


図 2-9-2-24 Case2-16 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-137.5cm，砂粒径：
0.85mm】

入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm の同条件の下, 図 2-9-2-25 ~ 図 2-9-2-27 に, Case2-10【砂粒径:0.23mm】, Case2-13【砂粒径:0.005mm】, Case2-16【砂粒径:0.85mm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを順次示す.

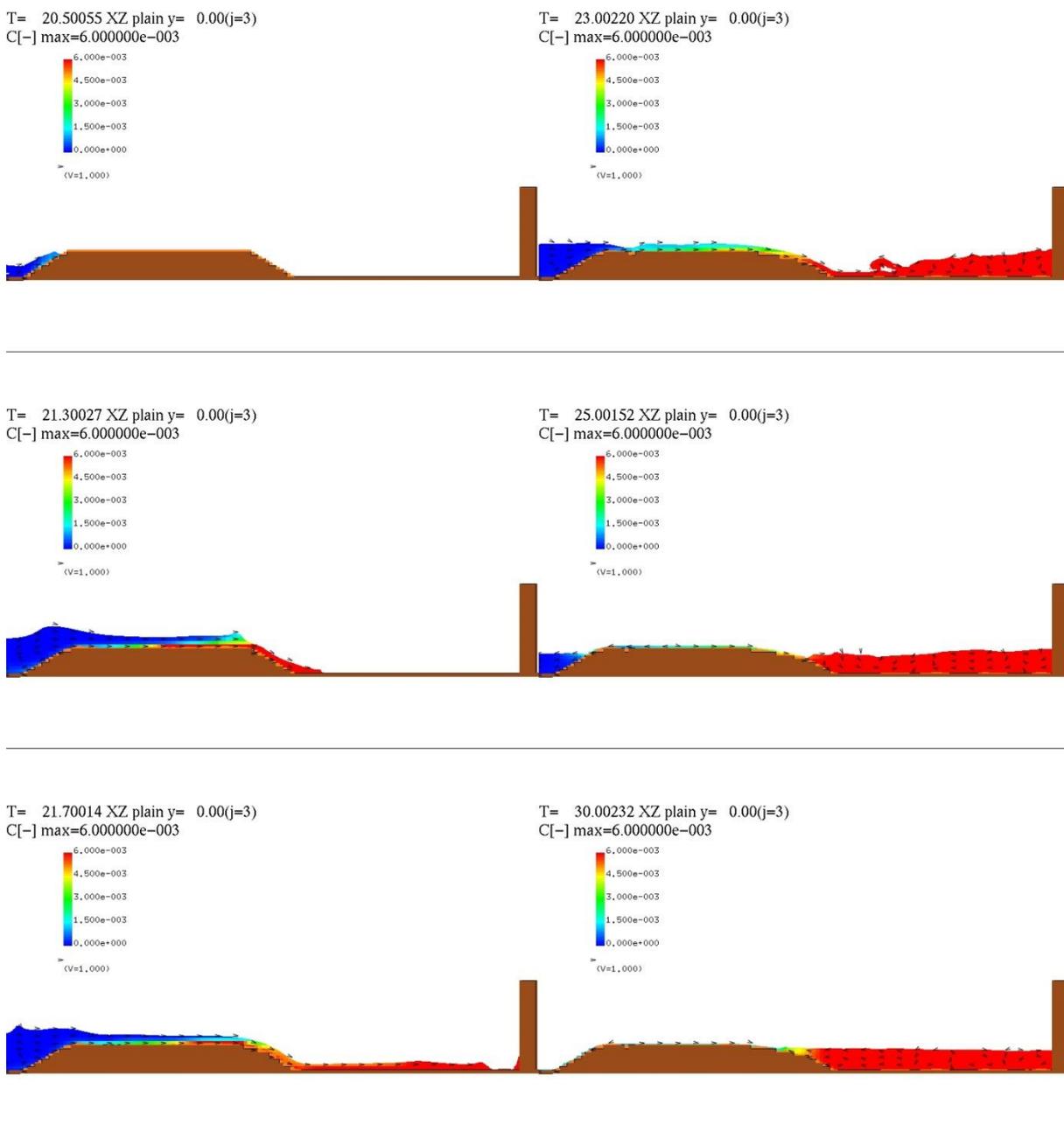


図 2-9-2-25 Case2-10 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 7.5cm, 防潮堤位置: -137.5cm, 砂粒径: 0.23mm】

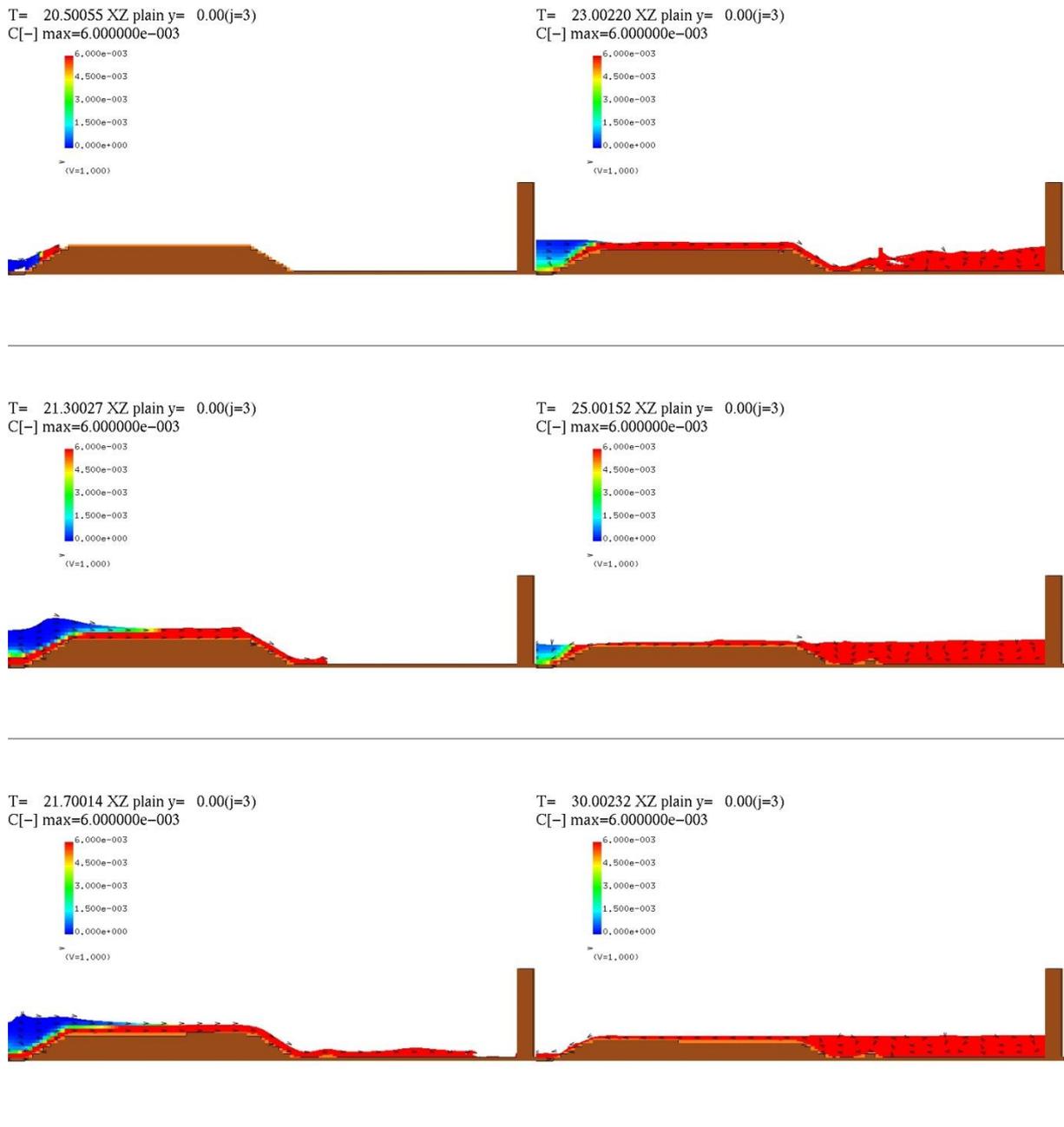


図 2-9-2-26 Case2-13 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-137.5cm，砂粒径：0.005mm】

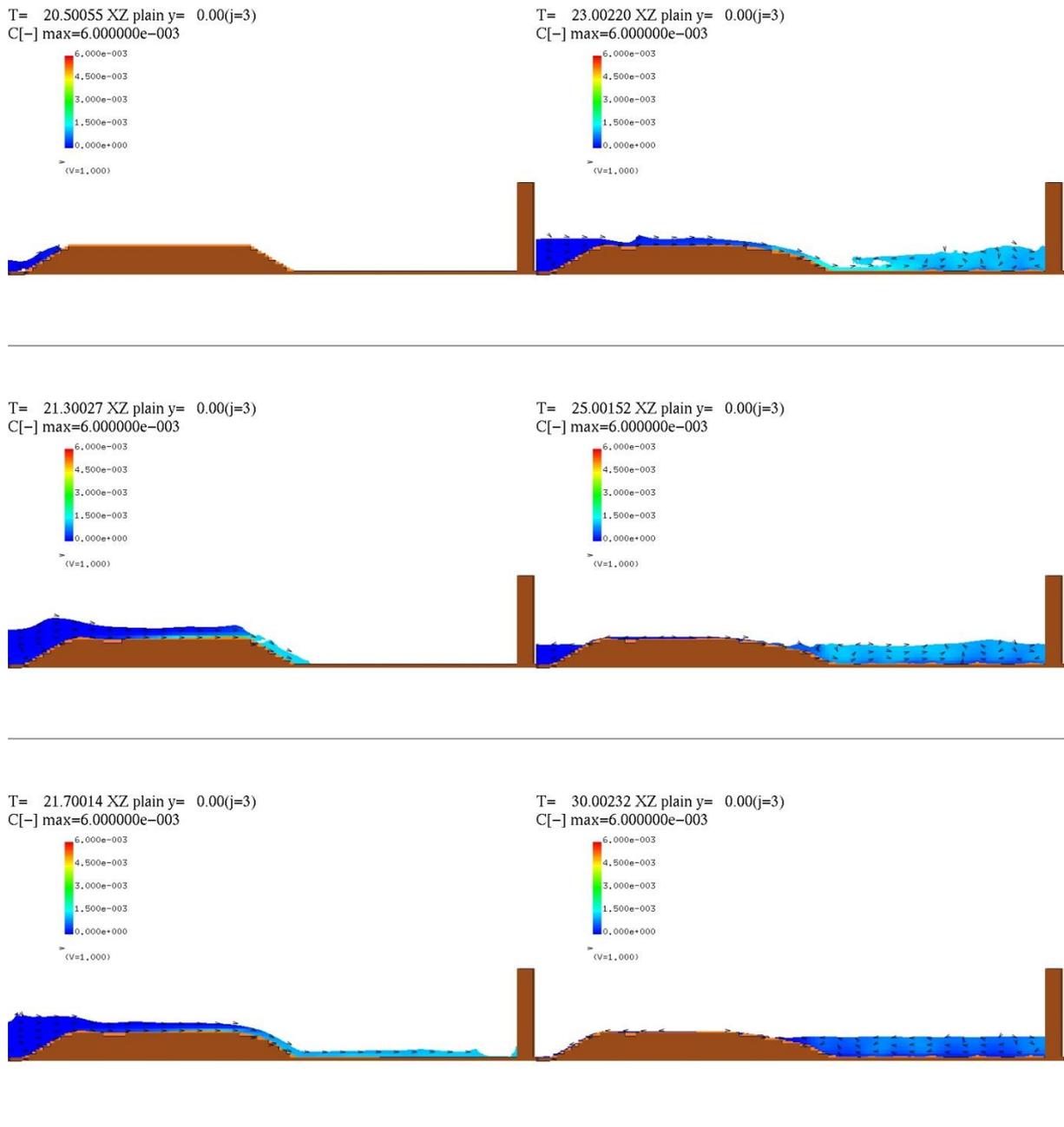


図 2-9-2-27 Case2-16 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-137.5cm，砂粒径：0.85mm】

Case2-10【砂粒径：0.23mm】，Case2-13【砂粒径：0.005mm】，Case2-16【砂粒径：0.85mm】の河床変動高の縦断分布を比較して，図 2-9-2-28 に示す．

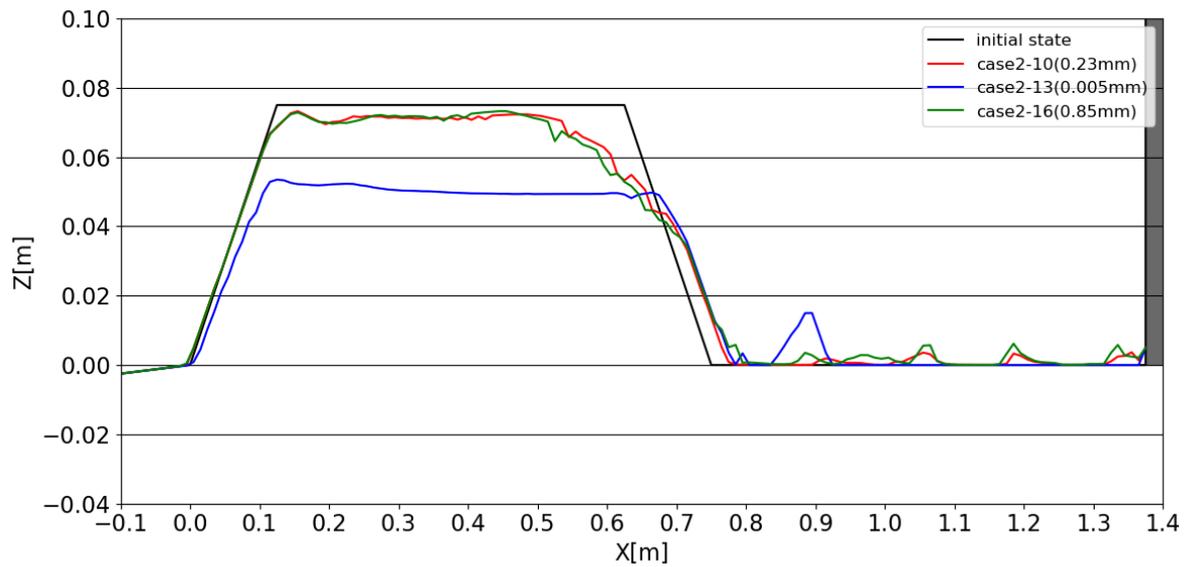


図 2-9-2-28 Case2-10, Case2-13, Case2-16 の河床変動高の縦断分布の比較

【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-137.5cm】

(5) 入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm (Case2-11, Case2-14, Case2-17)

入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm の同条件の下, 図 2-9-2-29~ 図 2-9-2-31 に, Case2-11【砂粒径:0.23mm】, Case2-14【砂粒径:0.005mm】, Case2-17【砂粒径:0.85mm】の断面二次元流速スナップショットを順次示す.

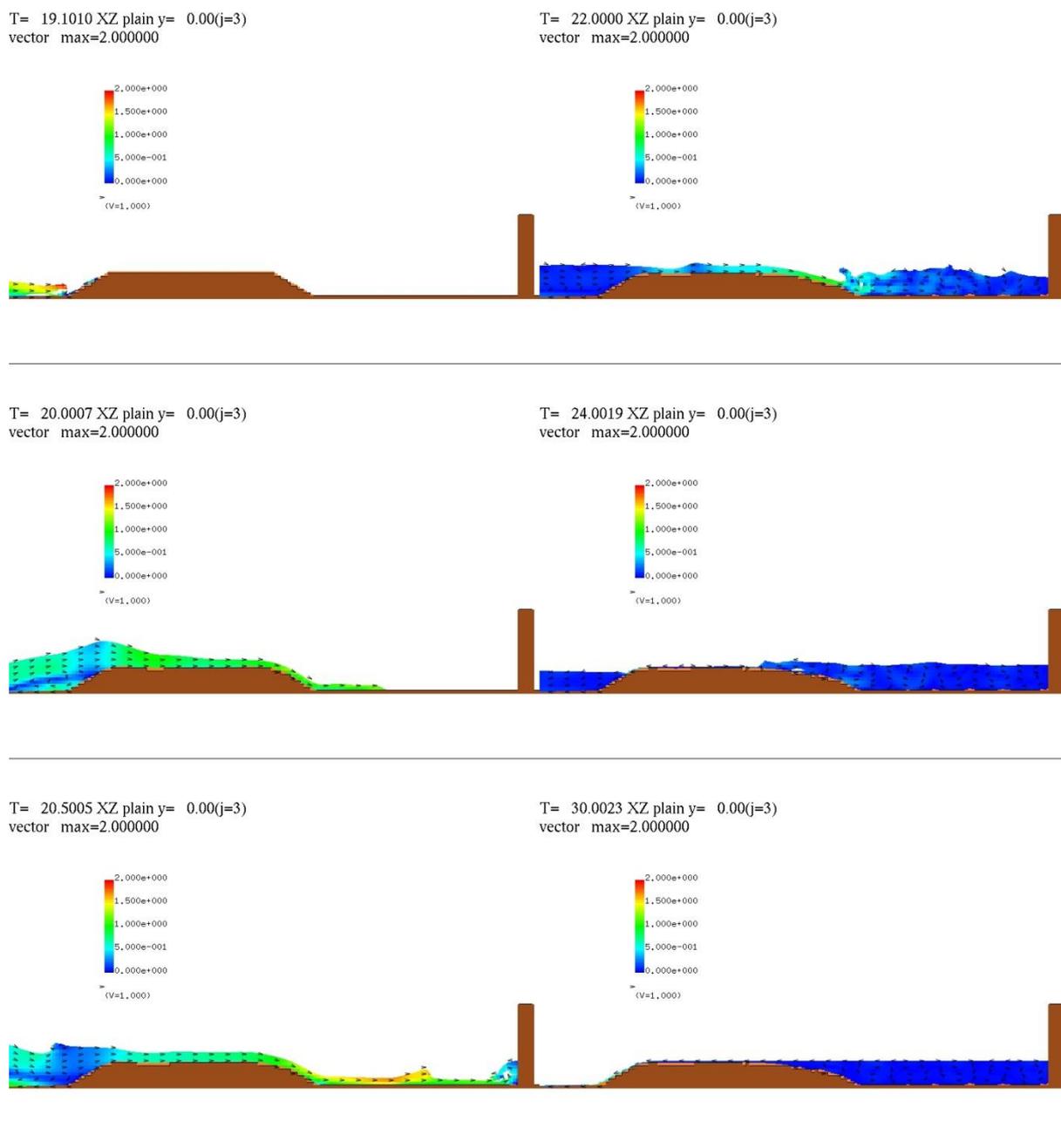
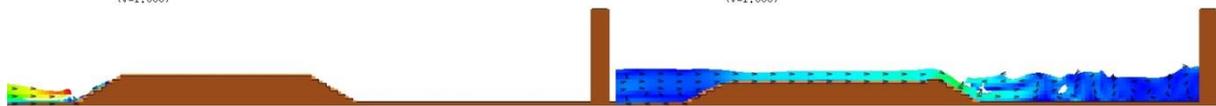
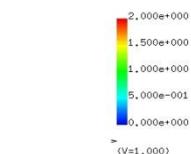


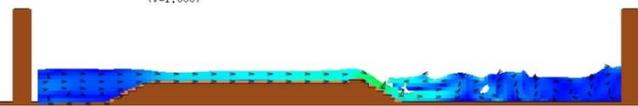
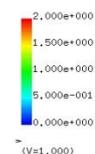
図 2-9-2-29 Case2-11 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -137.5cm, 砂粒径: 0.23mm】

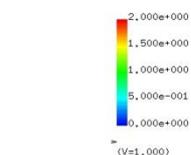
T= 19.1010 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



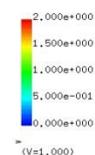
T= 22.0000 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



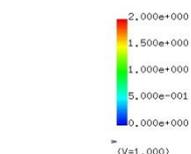
T= 20.0007 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 24.0019 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

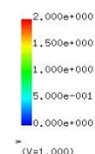
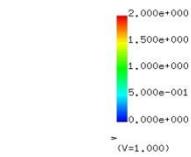


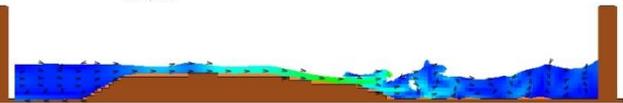
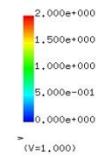
図 2-9-2-30 Case2-14 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-137.5cm，砂粒径：
0.005mm】

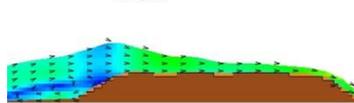
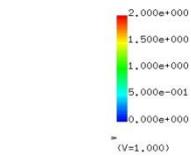
T= 19.1010 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



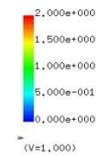
T= 22.0000 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



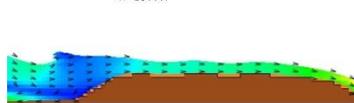
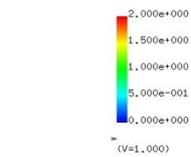
T= 20.0007 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 24.0019 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

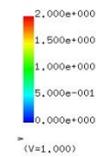


図 2-9-2-31 Case2-17 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -137.5cm, 砂粒径: 0.85mm】

入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm の同条件の下, 図 2-9-2-32~
 図 2-9-2-34 に, Case2-11【砂粒径:0.23mm】, Case2-14【砂粒径:0.005mm】,
 Case2-17【砂粒径:0.85mm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
 を順次示す.

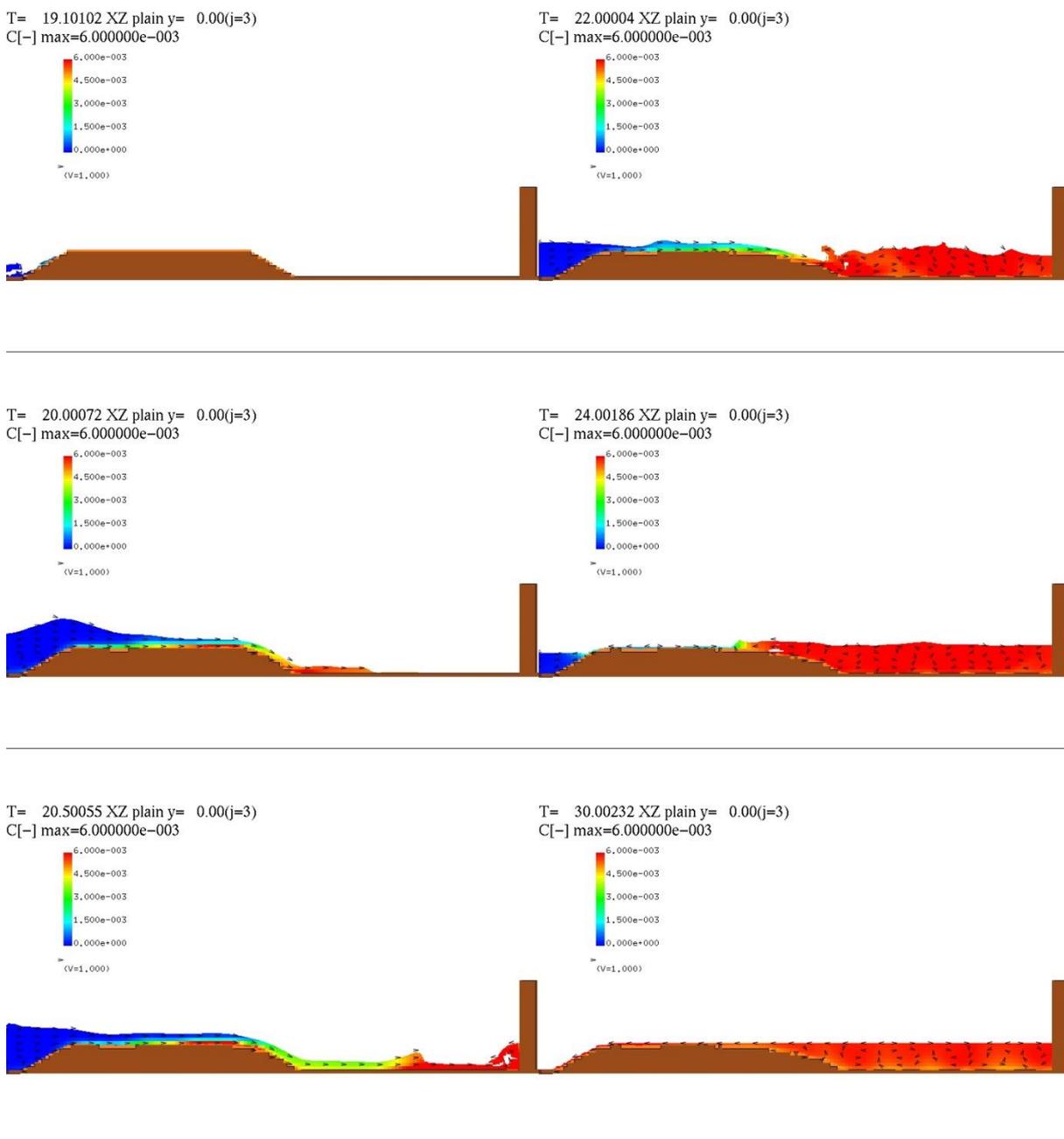
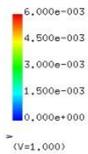


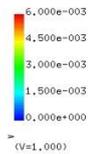
図 2-9-2-32 Case2-11 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -137.5cm, 砂粒径: 0.23mm】

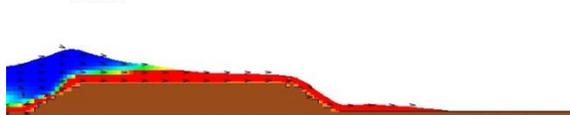
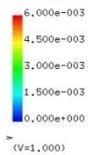
T= 19.10102 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



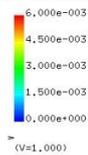
T= 22.00004 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



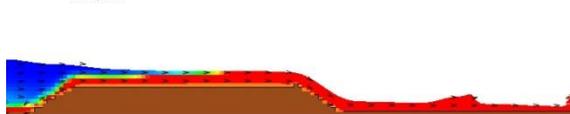
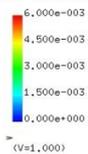
T= 20.00072 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 24.00186 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 20.50055 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

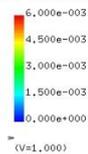
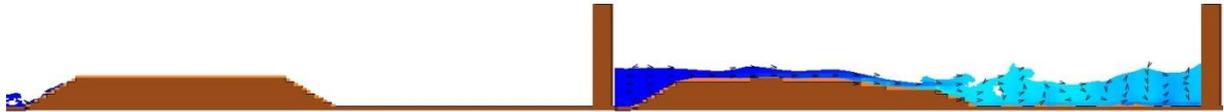
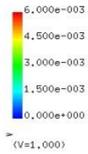


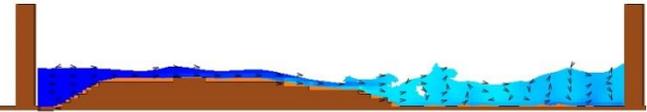
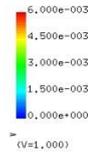
図 2-9-2-33 Case2-14 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-137.5cm，砂粒径：0.005mm】

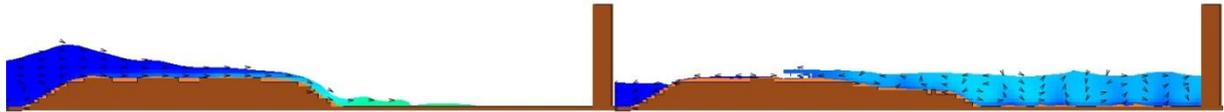
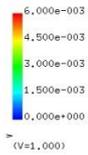
T= 19.10102 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



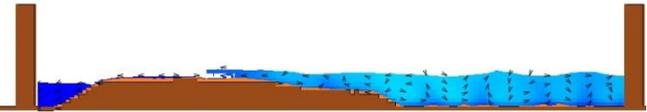
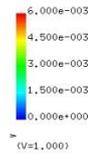
T= 22.00004 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



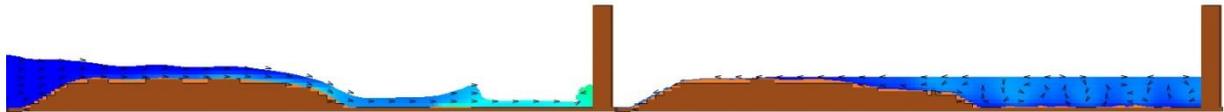
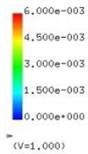
T= 20.00072 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 24.00186 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 20.50055 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

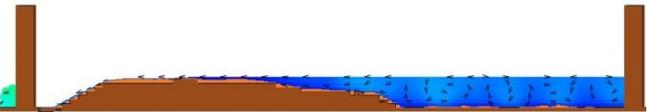
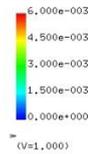


図 2-9-2-34 Case2-17 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -137.5cm, 砂粒径: 0.85mm】

Case2-11【砂粒径：0.23mm】，Case2-14【砂粒径：0.005mm】，Case2-17【砂粒径：0.85mm】の河床変動高の縦断分布を比較して，図 2-9-2-35 に示す．

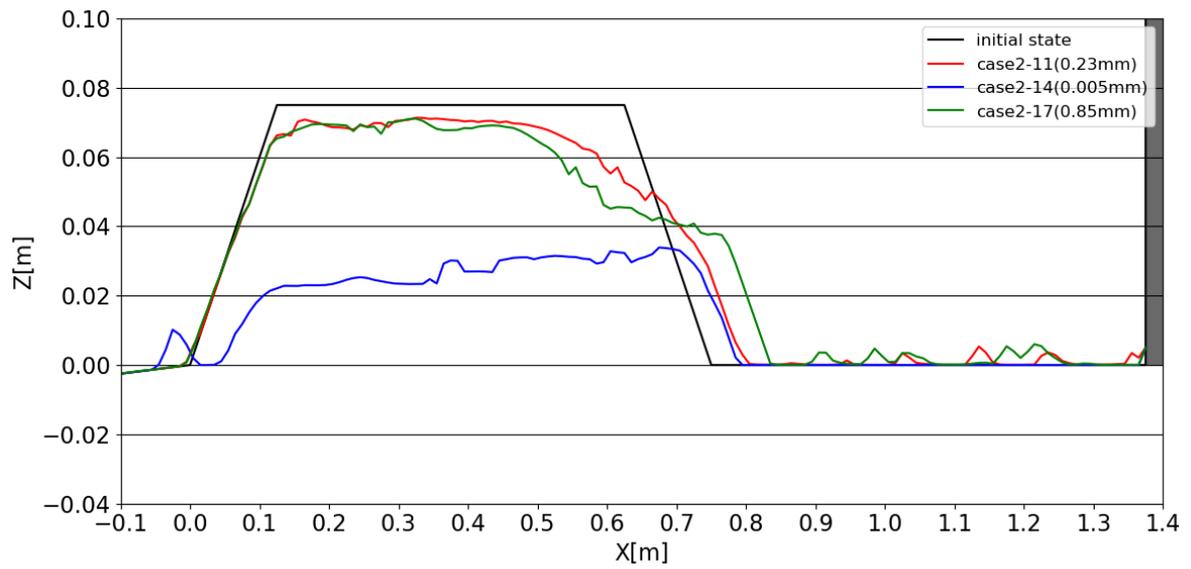


図 2-9-2-35 Case2-11, Case2-14, Case2-17 の河床変動高の縦断分布の比較

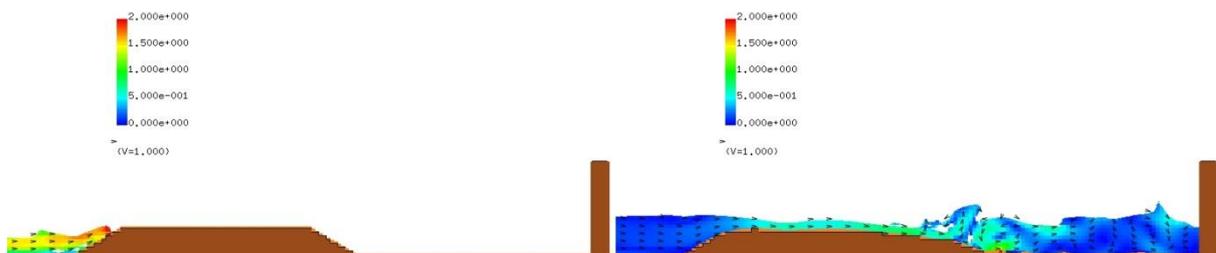
【河床勾配：1/40，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-137.5cm】

(6) 入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm (Case2-12, Case2-15, Case2-18)

入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm の同条件の下, 図 2-9-2-36~ 図 2-9-2-38 に, Case2-12【砂粒径:0.23mm】, Case2-15【砂粒径:0.005mm】, Case2-18【砂粒径:0.85mm】の断面二次元流速スナップショットを順次示す.

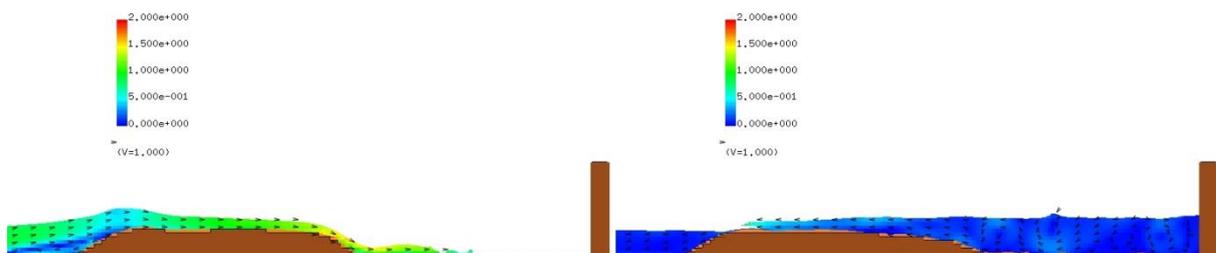
T= 18.1014 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 21.0004 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 18.8011 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 19.8008 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

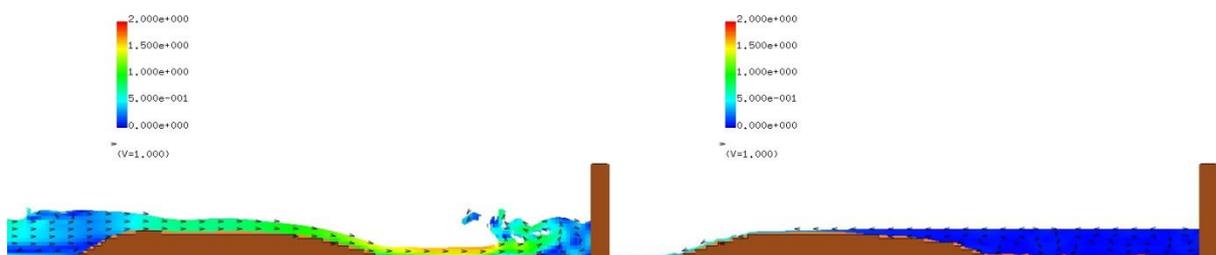
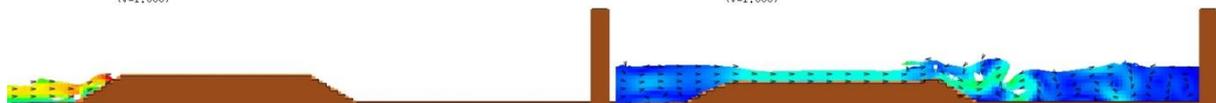
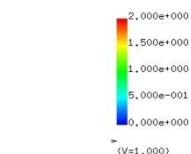


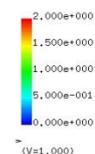
図 2-9-2-36 Case2-12 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -137.5cm, 砂粒径: 0.23mm】

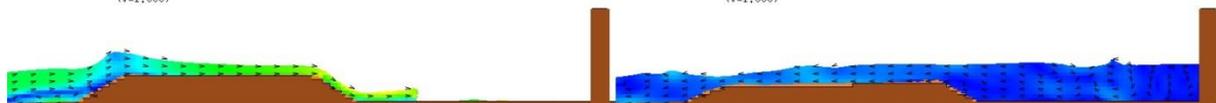
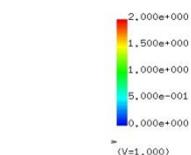
T= 18.1014 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



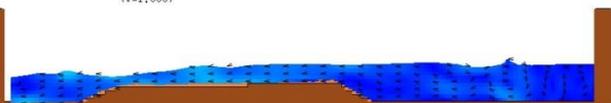
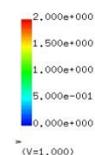
T= 21.0004 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



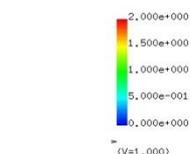
T= 18.8011 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 19.8008 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

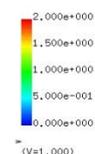
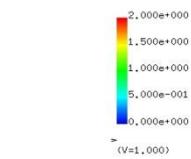


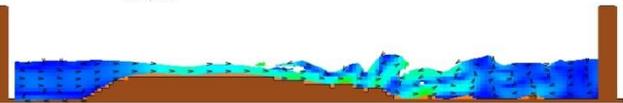
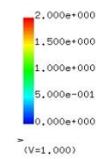
図 2-9-2-37 Case2-15 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-137.5cm，砂粒径：
0.005mm】

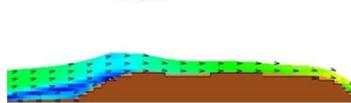
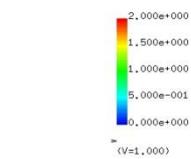
T= 18.1014 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



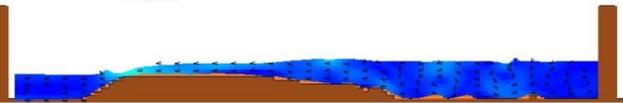
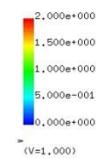
T= 21.0004 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



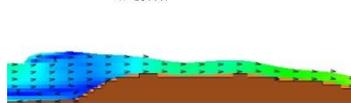
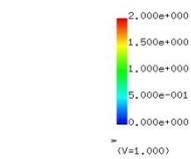
T= 18.8011 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 19.8008 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

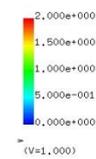


図 2-9-2-38 Case2-18 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -137.5cm, 砂粒径: 0.85mm】

入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-137.5cm の同条件の下, 図 2-9-2-39~
 図 2-9-2-41 に, Case2-12【砂粒径:0.23mm】, Case2-15【砂粒径:0.005mm】,
 Case2-18【砂粒径:0.85mm】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
 を順次示す.

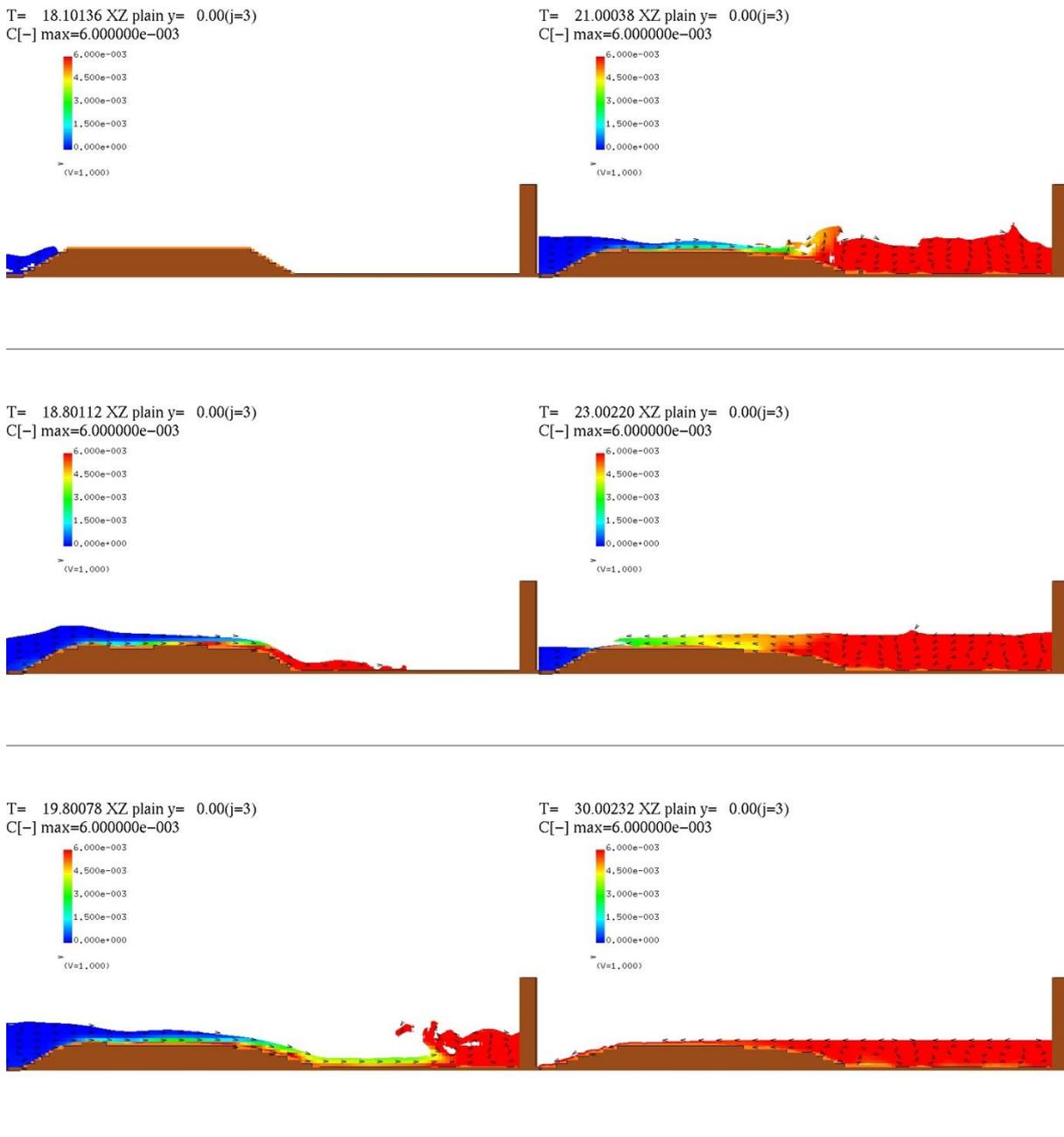
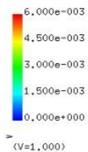


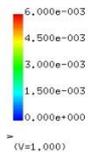
図 2-9-2-39 Case2-12 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -137.5cm, 砂粒径:
 0.23mm】

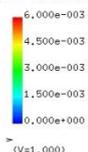
T= 18.10136 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



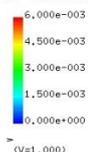
T= 21.00038 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



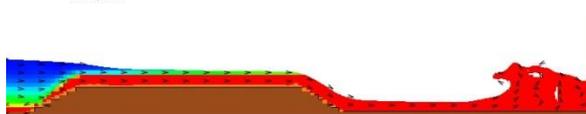
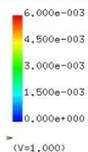
T= 18.80112 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 23.00220 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 19.80078 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

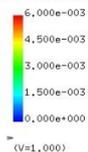
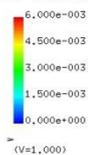


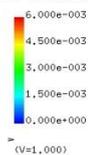
図 2-9-2-40 Case2-15 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-137.5cm，砂粒径：0.005mm】

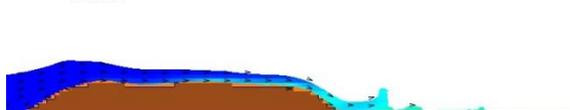
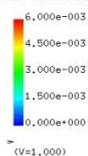
T= 18.10136 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



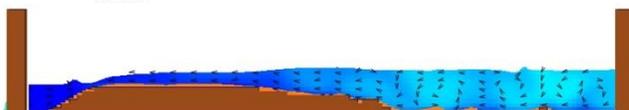
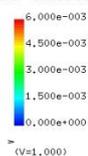
T= 21.00038 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



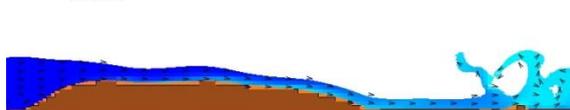
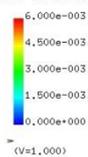
T= 18.80112 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 23.00220 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 19.80078 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

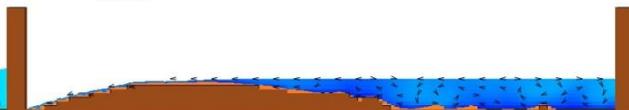
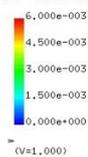


図 2-9-2-41 Case2-18 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -137.5cm, 砂粒径: 0.85mm】

Case2-12【砂粒径：0.23mm】，Case2-15【砂粒径：0.005mm】，Case2-18【砂粒径：0.85mm】の河床変動高の縦断分布を比較して，図 2-9-2-42 に示す．

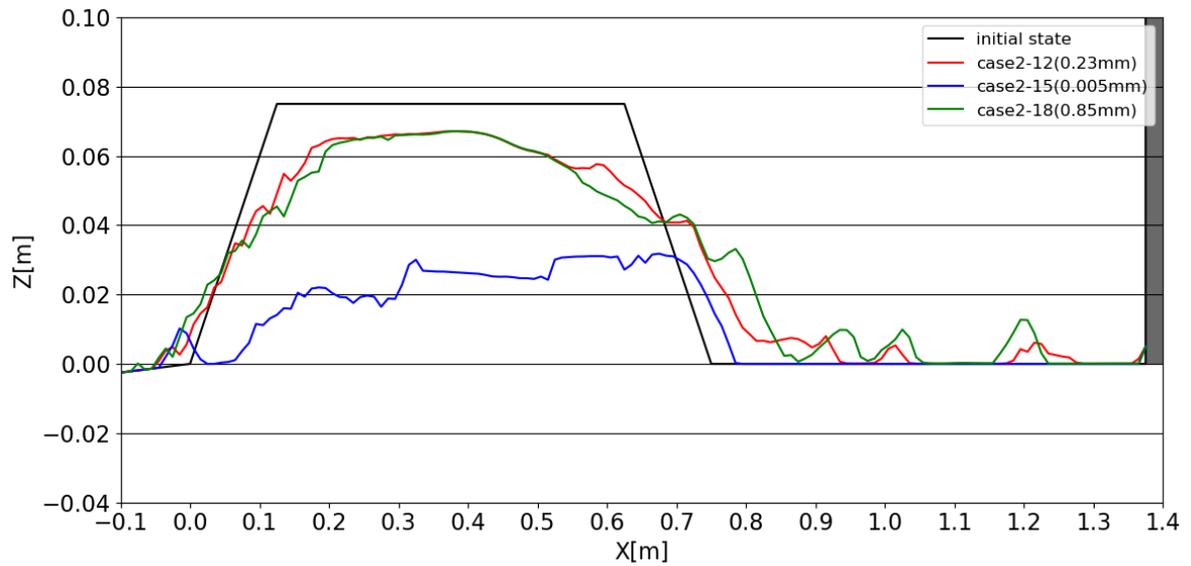


図 2-9-2-42 Case2-12, Case2-15, Case2-18 の河床変動高の縦断分布の比較

【河床勾配：1/40，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-137.5cm】

(7) Case2-1~Case2-18における河床変動高の比較

Case2-1~Case2-18における解析結果の河床変動高の縦断分布の比較を防潮堤位置別に、図 2-9-2-43 (防潮堤位置：-75cm) 及び図 2-9-2-44 (防潮堤位置：-137.5cm) にそれぞれまとめて示す。

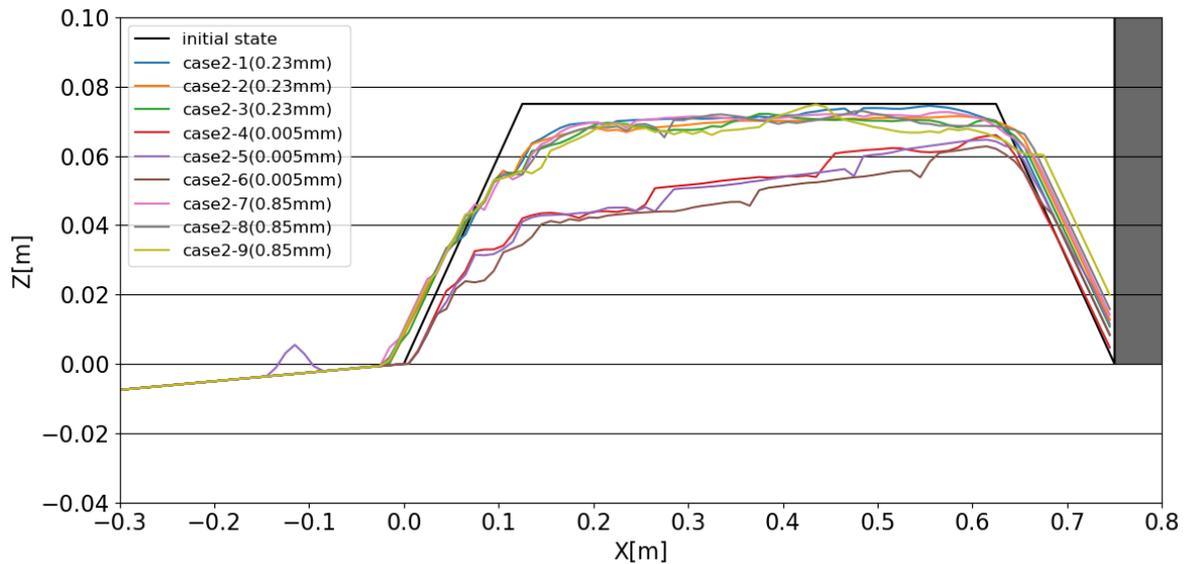


図 2-9-2-43 Case2-1~Case2-9における河床変動高の解析結果の比較

【河床勾配：1/40，防潮堤位置：-75cm】

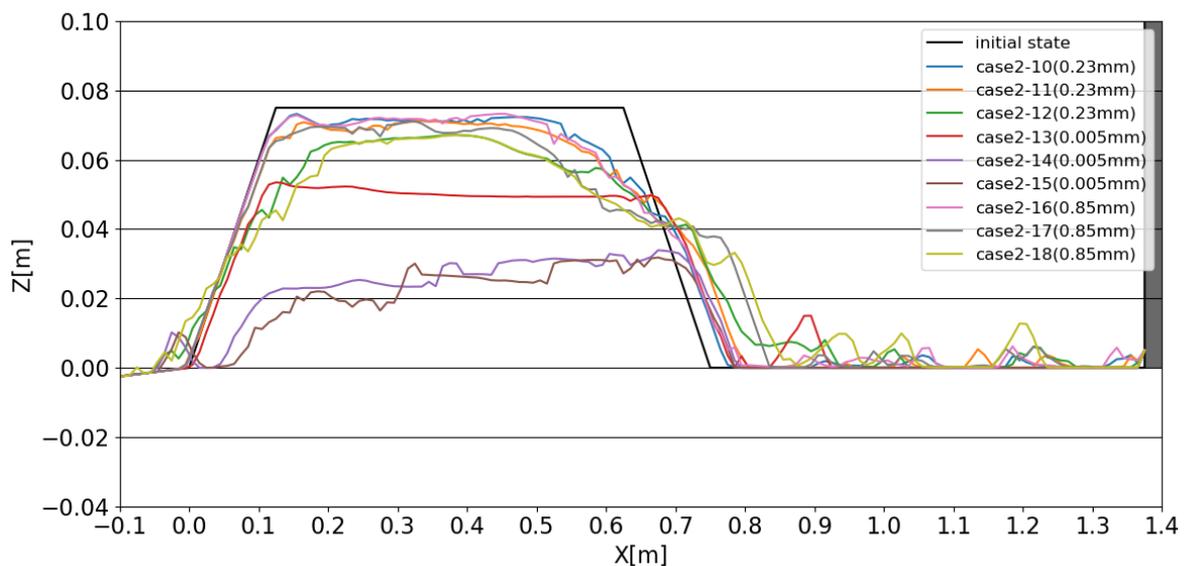


図 2-9-2-44 Case2-10~Case2-18における河床変動高の解析結果の比較

【河床勾配：1/40，防潮堤位置：-137.5cm】

2-10 砂層考慮ケースの解析結果

2-10-1 防潮堤に作用する波圧の比較

以下では，砂層を考慮した（非一様分布にした）ことによる防潮堤に作用する波圧の差異を調べる目的で，Case3-1～Case3-3 における段波波圧の最大値及び持続波圧の平均値を示す（図 2-10-1-2～図 2-10-1-10 参照）．ここでは，波圧の差異を明らかにするために，入力波高及び防潮堤位置が同条件における砂層が一様分布である Case2-1～Case2-3 の解析結果に対して，非一様分布である Case3-1～Case3-3 の解析結果の波圧を比較して示す．

Case 3-1～Case 3-3 の波圧時系列の段波波圧開始，持続波圧開始の各時刻を表 2-10-1-1 に示す．なお，持続波圧の継続時間は全ケース計算終了時刻までとした．

表 2-10-1-1 段波波圧及び持続波圧の開始時刻

ケース名	段波波圧開始時刻	持続波圧開始時刻
Case 3-1	21.2153sec	21.5777sec
Case 3-2	19.7458sec	20.5205sec
Case 3-3	18.5162sec	19.7158sec

(1) 入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case3-1)

Case3-1 の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を図 2-10-1-1 に示し, 持続波圧の平均値を図 2-10-1-2 に示す. Case3-1【砂層考慮: 非一様分布】の解析結果の波圧を赤の実線で示し, 比較対象の Case2-1【砂層考慮なし: 一様分布】の解析結果の波圧を青の破線で示す.

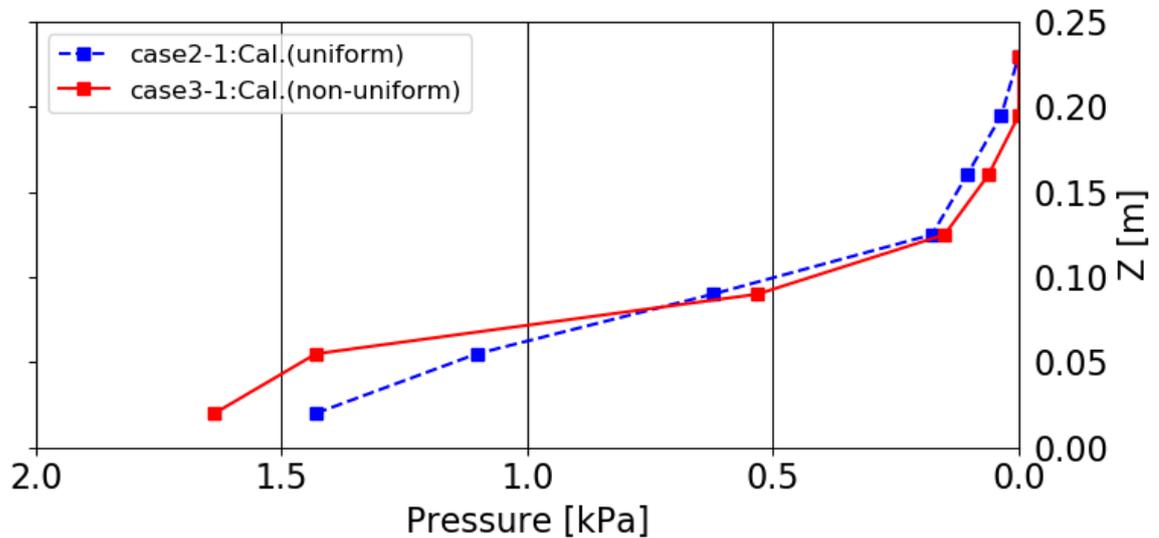


図 2-10-1-1 case3-1 の防潮堤に作用する段波波圧の最大値

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 7.5cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂層考慮】

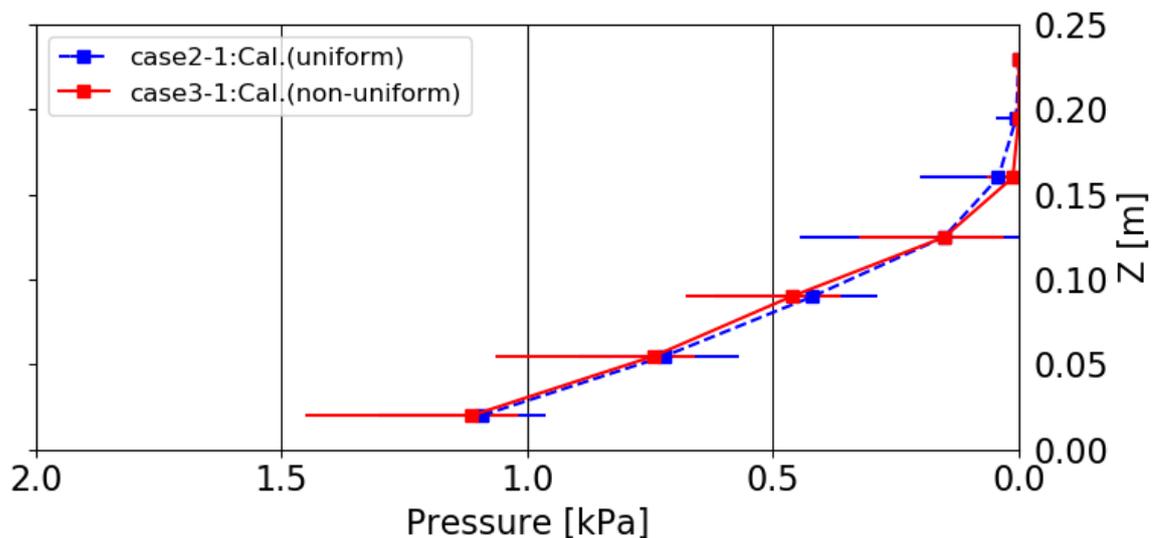


図 2-10-1-2 case3-1 の防潮堤に作用する持続波圧の平均値

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 7.5cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂層考慮】

(2) 入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case3-2)

Case3-2 の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を図 2-10-1-3 に示し, 持続波圧の平均値を図 2-10-1-4 に示す. Case3-2【砂層考慮: 非一様分布】の解析結果の波圧を赤の実線で示し, 比較対象の Case2-2【砂層考慮なし: 一様分布】の解析結果の波圧を青の破線で示す.

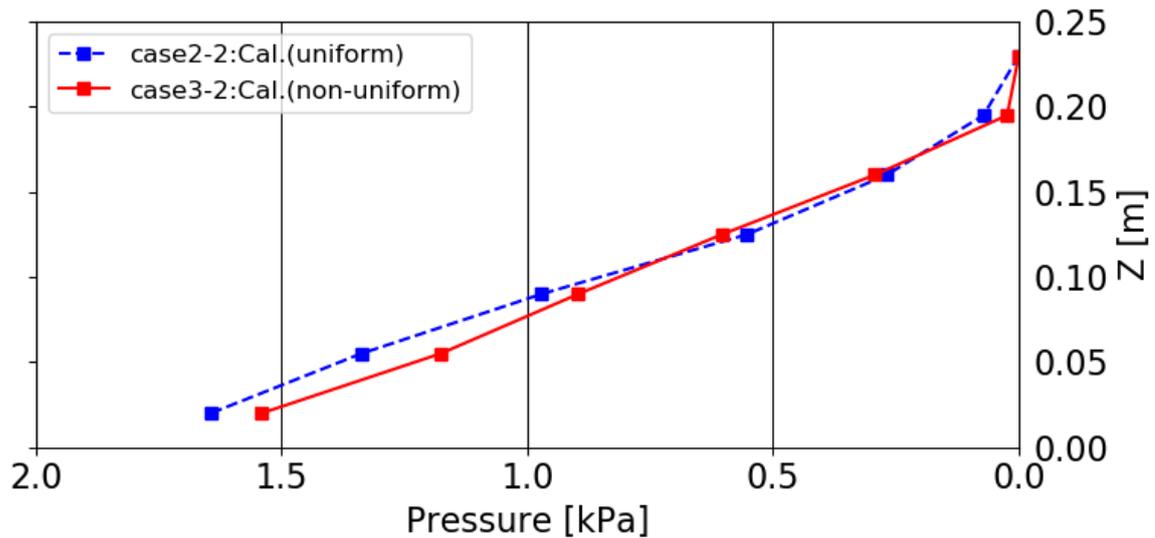


図 2-10-1-3 case3-2 の防潮堤に作用する段波波圧の最大値

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂層考慮】

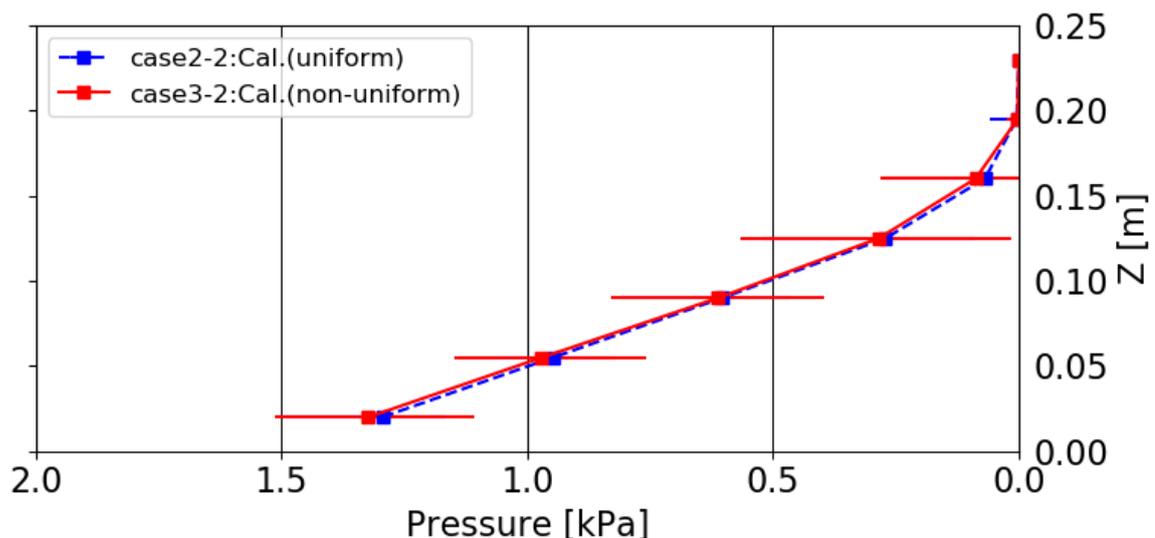


図 2-10-1-4 case3-2 の防潮堤に作用する持続波圧の平均値

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂層考慮】

(3) 入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case3-3)

Case3-3 の移動床における防潮堤に作用する段波波圧の最大値を図 2-10-1-5 に示し, 持続波圧の平均値を図 2-10-1-6 に示す. Case3-3【砂層考慮: 非一様分布】の解析結果の波圧を赤の実線で示し, 比較対象の Case2-3【砂層考慮なし: 一様分布】の解析結果の波圧を青の破線で示す.

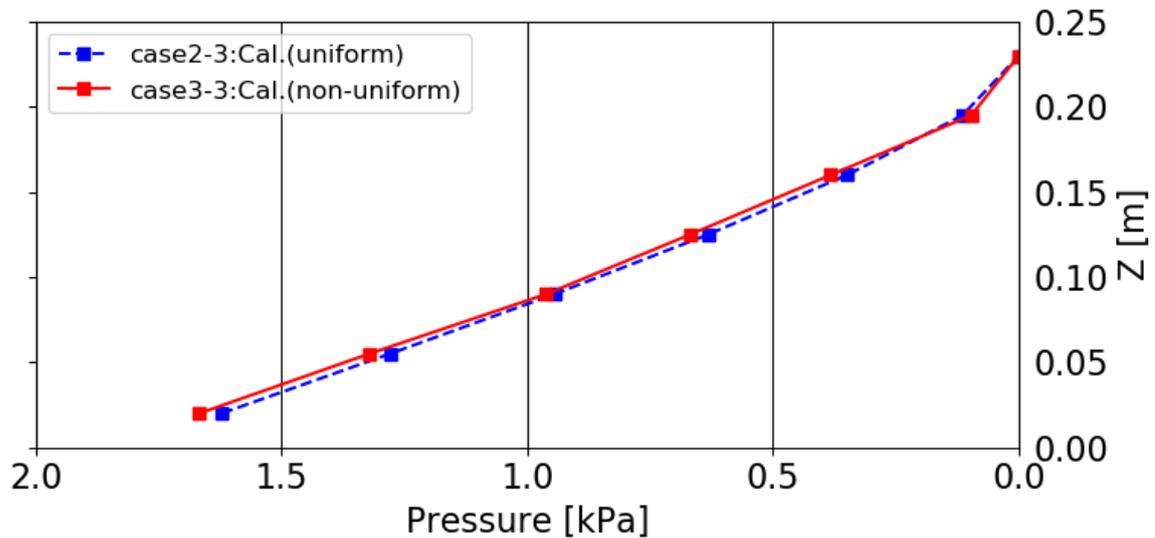


図 2-10-1-5 case3-3 の防潮堤に作用する段波波圧の最大値

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂層考慮】

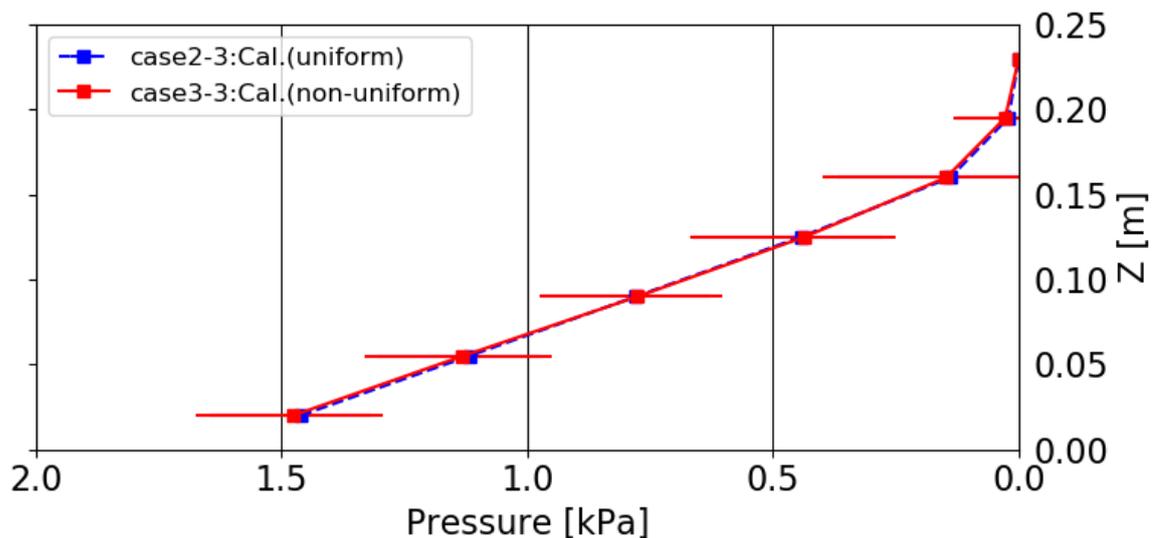


図 2-10-1-6 case3-3 の防潮堤に作用する持続波圧の平均値

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂層考慮】

2-10-2 流速場，河床変動高の縦断分布

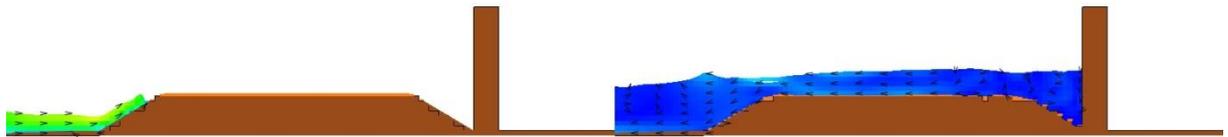
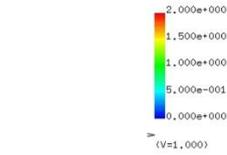
以下では，砂層を考慮した（非一様分布にした）ことによる河床高の差異を調べる目的で，Case3-1～Case3-3 における流速場の計算結果，浮遊砂濃度分布の計算結果及び防潮堤前面における河床変動高の縦断分布の計算結果を示す（図 2-10-2-3～図 2-10-2-10 参照）．ここでは，河床高の差異を明らかにするために，入力波高及び防潮堤位置が同条件における砂層が一様分布である Case2-1～Case2-3 の解析結果に対して，非一様分布である Case3-1～Case3-3 の解析結果の河床高がどのように変化するかを把握する．

なお，ここでも全ケースの河床変動高の縦断分布について，解析結果においては防潮堤からの引き波が十分収まる時刻の結果を採用した．

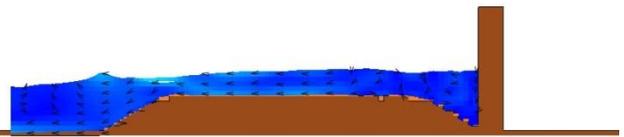
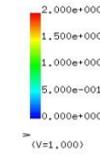
(1) 入力波高 7.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case3-1)

図 2-10-2-1 は, Case3-1【河床勾配 : 1/40, 入力波高 : 7.5cm, 防潮堤位置 : 汀線-75cm, 砂層考慮】の断面二次元流速スナップショットを示す.

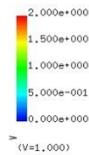
T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



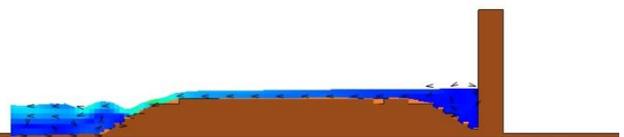
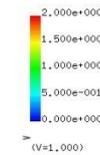
T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



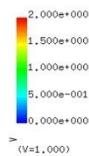
T= 21.3003 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 25.0015 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 21.7001 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

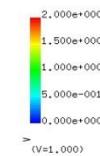


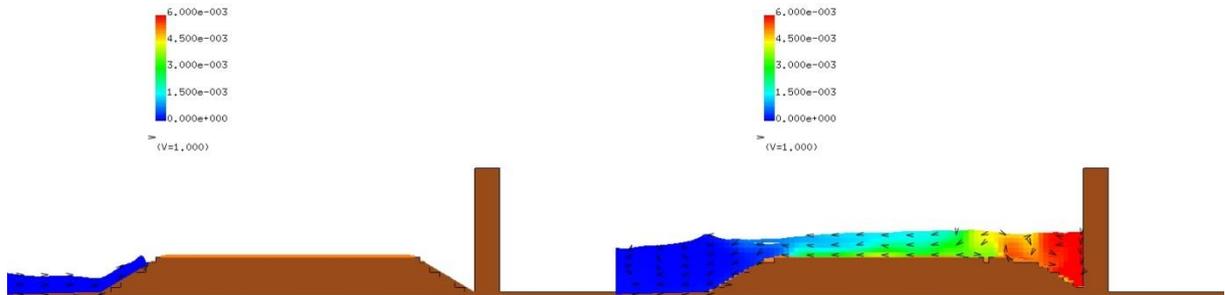
図 2-10-2-1 Case3-1 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配 : 1/40, 入力波高 : 7.5cm, 防潮堤位置 : -75cm, 砂層考慮】

図 2-10-2-2 は、Case3-1【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：汀線-75cm，砂層考慮】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを示す。

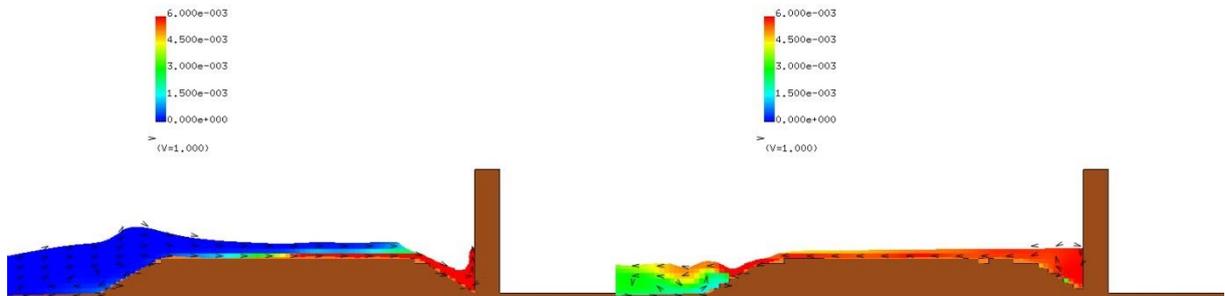
T= 20.50055 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 23.00220 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 21.30027 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 25.00152 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 21.70014 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

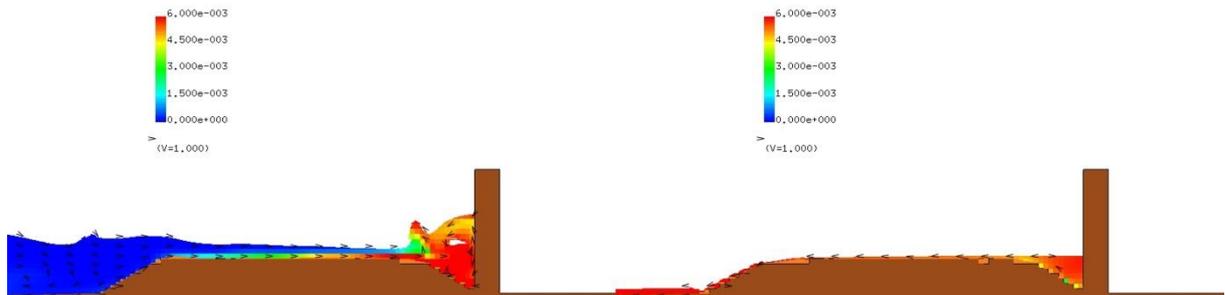


図 2-10-2-2 Case3-1 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-75cm，砂層考慮】

Case3-1【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：汀線-75cm，砂層考慮】の河床変動高の縦断分布を図 2-10-2-3 に示す。砂丘地形の初期状態を黒の実線で示し，Case3-1【砂層考慮：非一様分布】の解析結果の河床高を赤の実線で示し，比較対象の Case2-1【砂層考慮なし：一様分布】の解析結果の河床高を青の破線で示す。

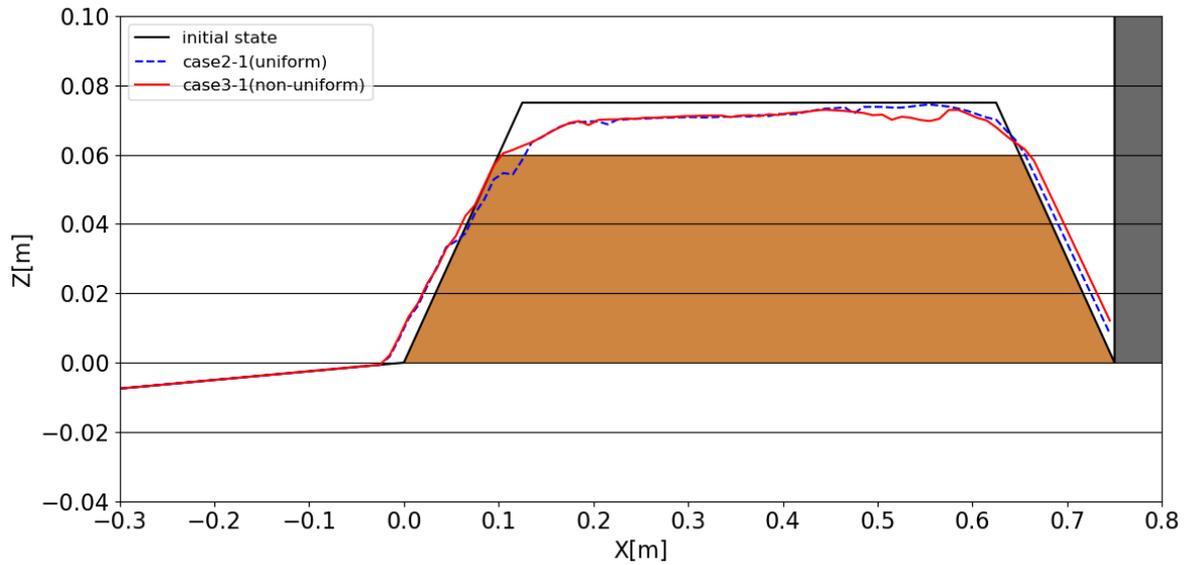


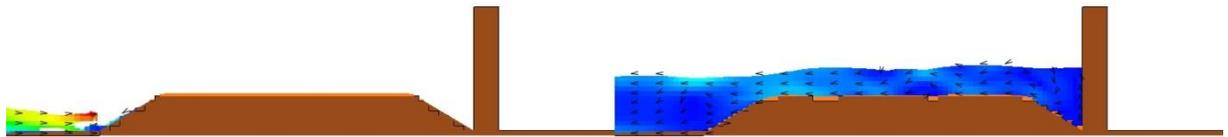
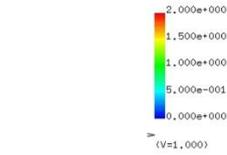
図 2-10-2-3 Case3-1 の河床変動高の縦断分布の比較

【河床勾配：1/40，入力波高：7.5cm，防潮堤位置：-75cm，砂層考慮】

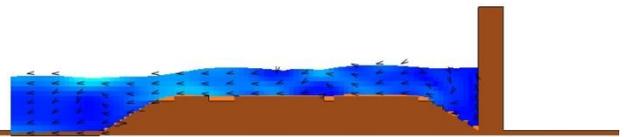
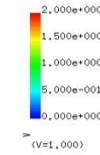
(2) 入力波高 10.0cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case3-2)

図 2-10-2-4 は, Case3-2【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: 汀線-75cm, 砂層考慮】の断面二次元流速スナップショットを示す.

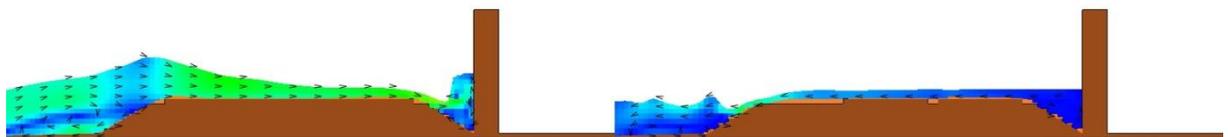
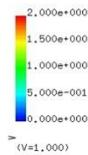
T= 19.1010 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



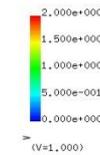
T= 22.0000 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



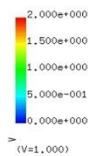
T= 20.0007 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 24.0019 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 20.5005 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

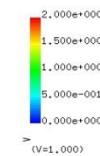


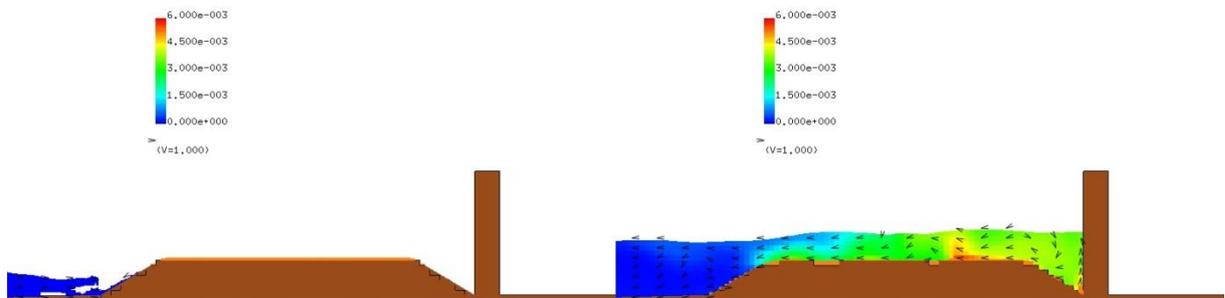
図 2-10-2-4 Case3-2 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 10.0cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂層考慮】

図 2-10-2-5 は、Case3-2【河床勾配：1/40，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：汀線-75cm，砂層考慮】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを示す。

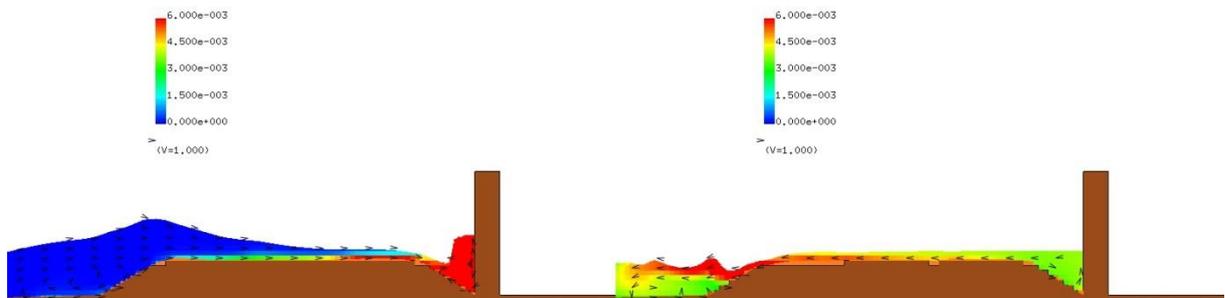
T= 19.10102 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 22.00004 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 20.00072 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 24.00186 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 20.50055 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

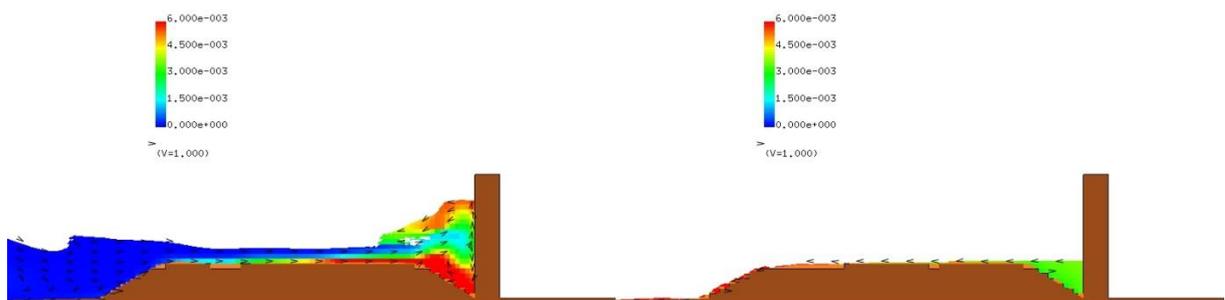


図 2-10-2-5 Case3-2 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット
【河床勾配：1/40，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-75cm，砂層考慮】

Case3-2【河床勾配：1/40，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：汀線-75cm，砂層考慮】の河床変動高の縦断分布を図 2-10-2-6 に示す。砂丘地形の初期状態を黒の実線で示し，Case3-2【砂層考慮：非一様分布】の解析結果の河床高を赤の実線で示し，比較対象の Case2-2【砂層考慮なし：一様分布】の解析結果の河床高を青の破線で示す。

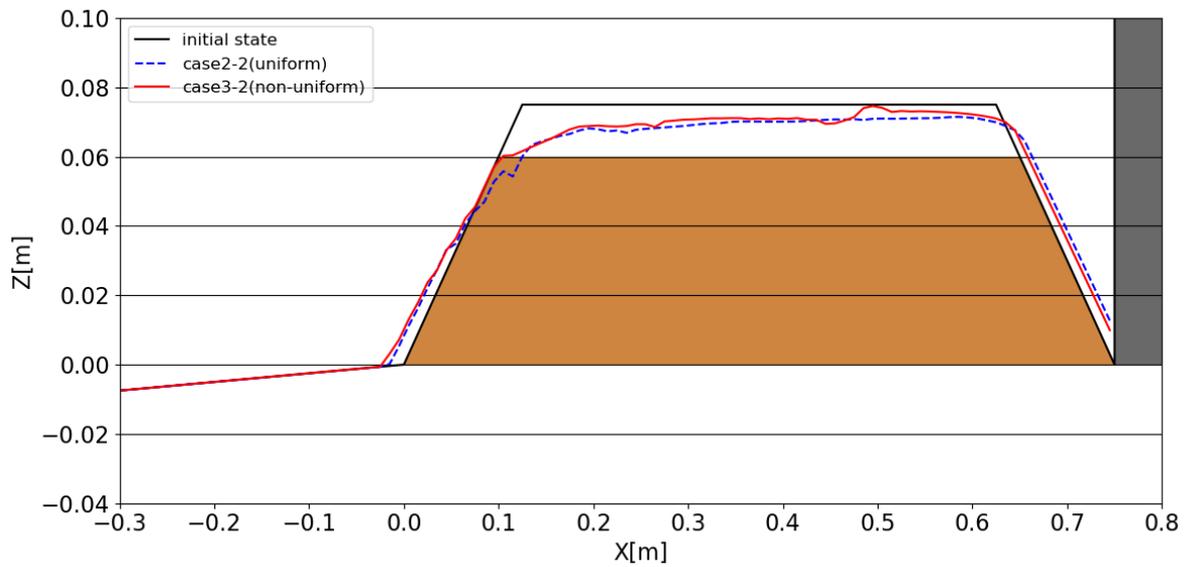


図 2-10-2-6 Case3-2 の河床変動高の縦断分布の比較

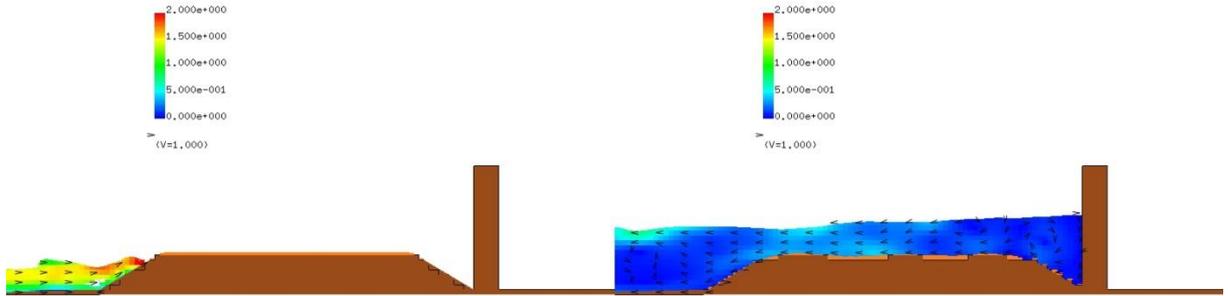
【河床勾配：1/40，入力波高：10.0cm，防潮堤位置：-75cm，砂層考慮】

(3) 入力波高 12.5cm, 防潮堤位置が汀線-75cm (Case3-3)

図 2-10-2-7 は, Case3-3【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: 汀線-75cm, 砂層考慮】の断面二次元流速スナップショットを示す.

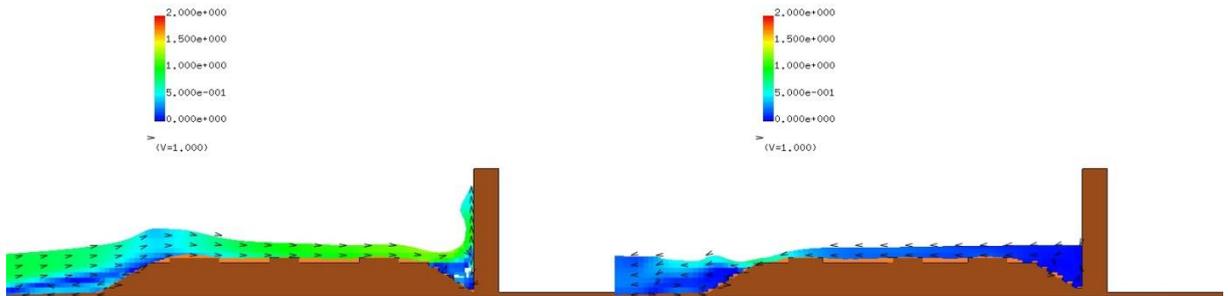
T= 18.1014 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 21.0004 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 18.8011 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 23.0022 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000



T= 19.8008 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

T= 30.0023 XZ plain y= 0.00(j=3)
vector max=2.000000

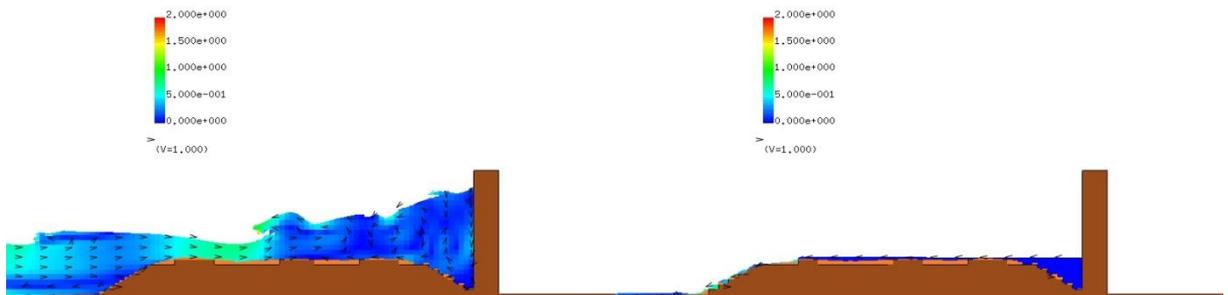


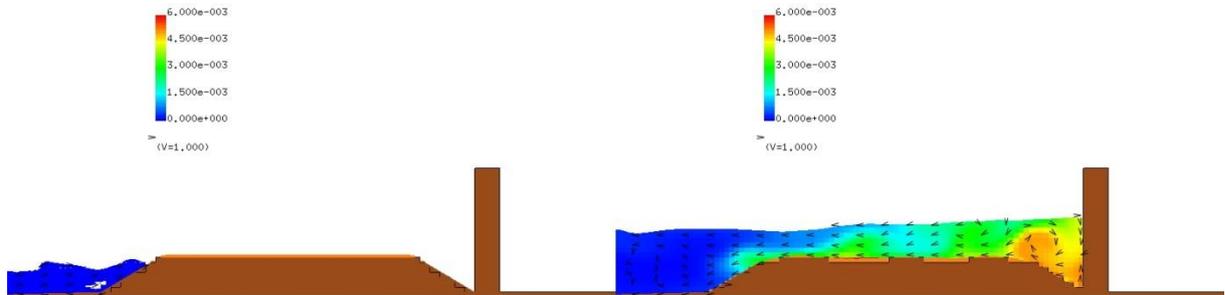
図 2-10-2-7 Case3-3 の断面二次元流速スナップショット

【河床勾配: 1/40, 入力波高: 12.5cm, 防潮堤位置: -75cm, 砂層考慮】

図 2-10-2-8 は、Case3-3【河床勾配：1/40，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：汀線-75cm，砂層考慮】の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショットを示す。

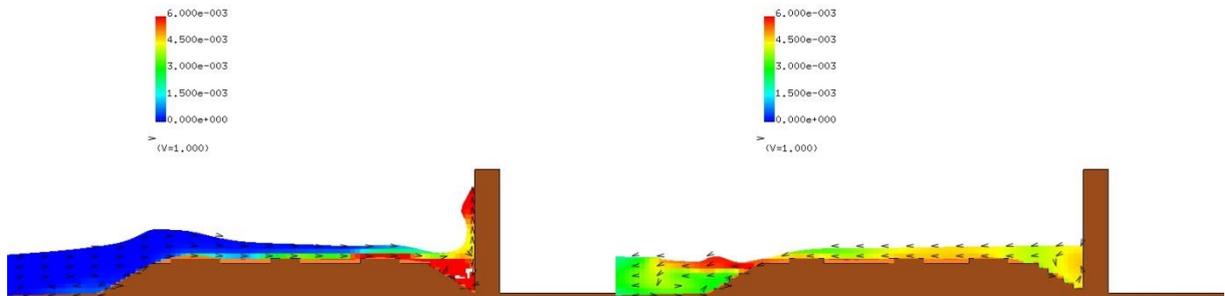
T= 18.10136 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 21.00038 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 18.80112 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 23.00220 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003



T= 19.80078 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

T= 30.00232 XZ plain y= 0.00(j=3)
C[-] max=6.000000e-003

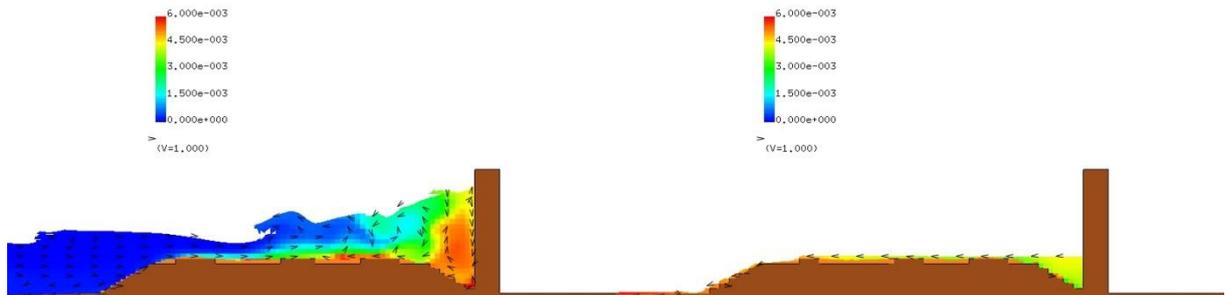


図 2-10-2-8 Case3-3 の断面二次元浮遊砂濃度分布スナップショット

【河床勾配：1/40，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-75cm，砂層考慮】

Case3-3【河床勾配：1/40，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：汀線-75cm，砂層考慮】の河床変動高の縦断分布を図 2-10-2-9 に示す。砂丘地形の初期状態を黒の実線で示し，Case3-3【砂層考慮：非一様分布】の解析結果の河床高を赤の実線で示し，比較対象の Case2-3【砂層考慮なし：一様分布】の解析結果の河床高を青の破線で示す。

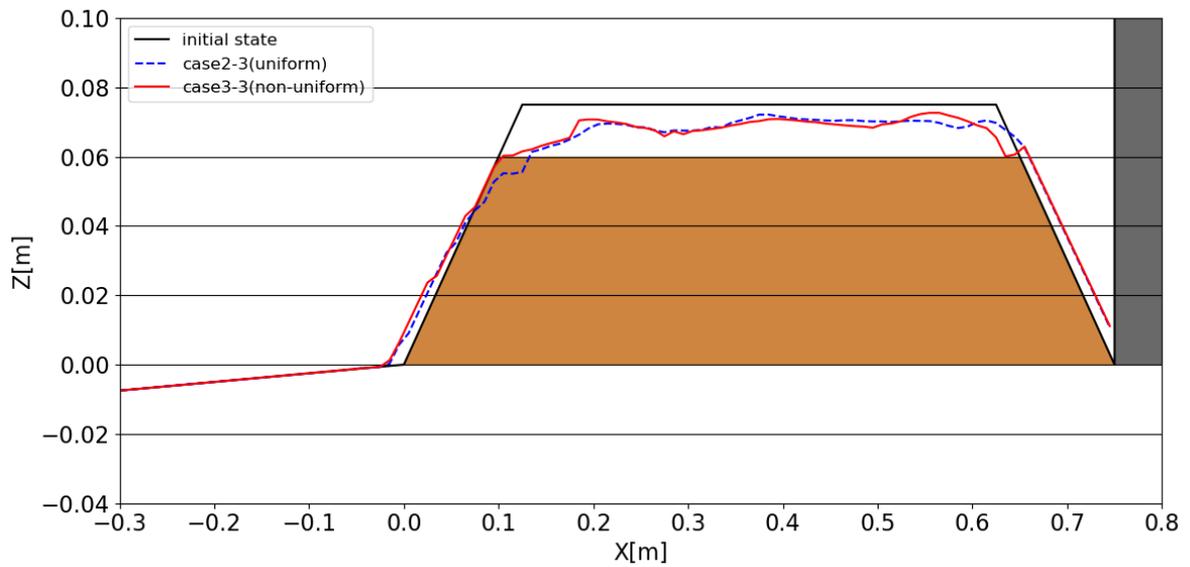


図 2-10-2-9 Case3-3 の河床変動高の縦断分布の比較

【河床勾配：1/40，入力波高：12.5cm，防潮堤位置：-75cm，砂層考慮】

(4) Case3-1~Case3-3 における河床変動高の比較

Case3-1~Case3-3【砂層考慮：非一様分布】における解析結果の河床変動高の縦断分布を、Case2-1~Case2-3【砂層考慮なし：一様分布】における解析結果の河床変動高の縦断分布と比較して図 2-10-2-10 にまとめて示す。

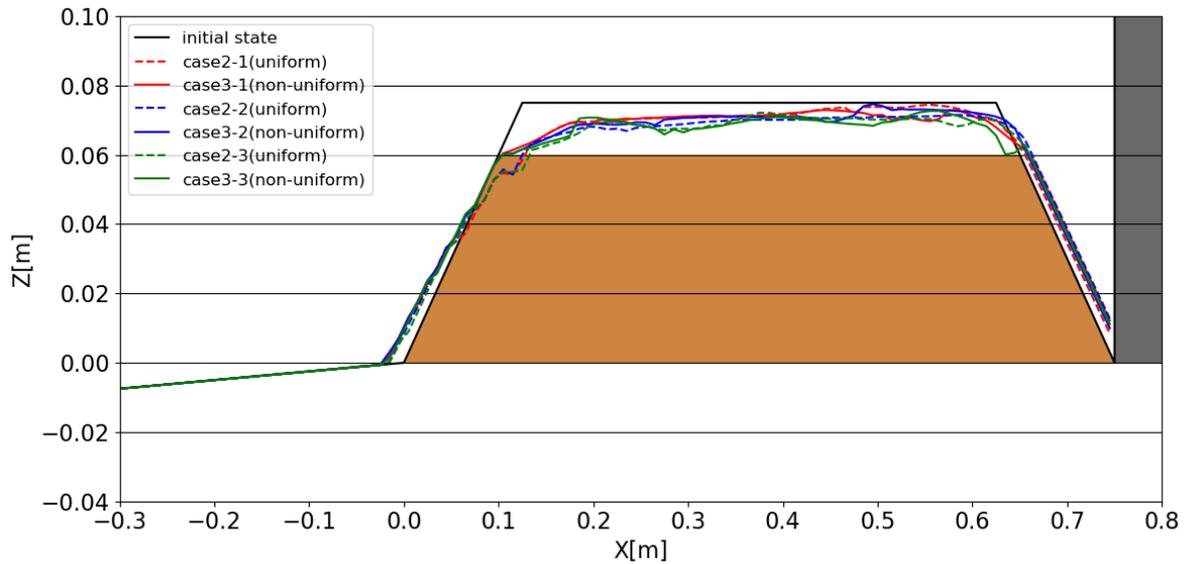


図 2-10-2-10 各ケースにおける河床変動高の解析結果の比較

【河床勾配：1/40，防潮堤位置：-75cm】

2-11 解析結果のまとめ

2-8~2-10 に示した防潮堤前面に砂丘地形がある場合について、砂丘地形が移動床の場合での影響を下記 3 つのケース別に示す。

(1) 実験比較ケース

防潮堤に作用する波圧の鉛直分布の試験結果との比較については、波圧のオーダーは試験結果と概ね一致しており、再現性は高いことが確認された。

防潮堤に作用する波圧分布の傾向は、固定床と移動床で顕著な違いは見られない。これは、砂丘材料が固定床から移動床に変わったことによって、津波波形の状況に顕著な変化は見られなかったものと考えられる。

砂丘地形の河床変動高の縦断分布については、防潮堤位置が汀線-75cm 及び汀線-137.5cm の両ケースとも波高が大きいほど砂丘地形の沖側先端（法肩）の侵食が進む傾向にあり、これは試験結果と調和的である。

一方で、砂丘地形の防潮堤側先端（法肩）の侵食については、解析結果では防潮堤位置が汀線-75cm より汀線-137.5cm のケースで侵食が進む傾向が捉えられ、試験結果と逆の傾向を示した。この理由としては、試験結果では、気泡混入により砂丘を飛び越えるような流れ場となっているが、計算結果では、単相流モデルのため、砂丘に沿った流れとなっており、計算結果と試験結果で砂丘の地形変化に違いが発生したと考えられる。加えて、断面二次元流速スナップショットから判断すると、砂丘地形の防潮堤側先端（法肩）の侵食（変形）は引き波時の戻り流れにおいても発生し、解析では、汀線-75cm より汀線-137.5cm のケースの方がその影響が強く及んだものと示唆される。

また、浮遊砂濃度分布については、砂丘表層付近で最も高くなる傾向にある。総じて、押し波時は砂丘中央から防潮堤前面までの表層で浮遊砂濃度が相対的に高くなり、引き波時には防潮堤前面から沖側に向かって時々刻々と高くなっていく傾向にある。ここで、引き波時における砂丘地形の防潮堤側先端（法肩）の浮遊砂濃度が、防潮堤位置が汀線-75cm より汀線-137.5cm の方が相対的に高くなっており、侵食が進んだことを裏付けている。

(2) 砂粒径変化ケース

防潮堤に作用する波圧分布の傾向は、砂粒径変化で顕著な違いは見られない。これは、砂粒径が変わったことによって、津波波形の状況に顕著な変化は見られなかったものと考えられる。

砂粒径変化による河床変動高の縦断分布については、防潮堤位置が汀線-75cm 及び汀線-137.5cm の両ケースとも、砂粒径が最も小さい 0.005mm のケースに砂丘地形の侵食が最も進む傾向が捉えられ、0.23mm 及び 0.85mm の砂粒径ケース間の差異は殆ど見られなかった。これは、浮遊砂濃度分布が、砂粒径が 0.85mm, 0.23mm, 0.005mm の順に浮遊砂濃度が高くなることと関連している。すなわち、砂粒径が小さいほど砂の巻き上がりが強まり、結果として、砂丘地形の侵食が進んだものと示唆される。

(3)砂層考慮ケース

防潮堤に作用する波圧分布の傾向は、砂層を考慮したことにより顕著な違いは見られない。これは、砂層を考慮した（非一様分布にした）ことによって、津波波形の状況に顕著な変化は見られなかったものと考えられる。

砂層を考慮した（非一様分布にした）ことによる河床変動高の縦断分布については、何れの波高においても砂丘上端部における侵食（変形）に差異は殆ど見られなかった。これは、浮遊砂濃度分布が砂層を考慮した（非一様分布にした）ことによる差異が見られなかったものと関連しており、砂の巻き上がりに違いは見られなかったものと考えられる。

ただし、本解析で使用した砂粒径は試験材料の 0.23mm を採用したため差異が殆ど見られなかったが、例えば、砂粒径が上記の 0.005mm のケースにおいて同条件下で解析を実施すると、侵食後の砂丘地形に大きな違いが生じるものと考えられる。

第3章 解析結果のまとめと今後の課題

(1) 解析結果のまとめ

実施した各解析について、以下に整理する。

[1] 固定床砂丘シミュレーション解析

固定床砂丘シミュレーション解析においては、防潮堤なしの4ケースと防潮堤ありの8ケースとの「合計12ケース」の解析を実施した。

水位時系列波形の試験結果との比較について、沖合から砕波帯前面にかけての計算水位は試験における計測波形を高い精度で再現しており、入力波の精度としては十分であると考えられる。なお、砕波後の計算水位と計測水位には若干差異があるものの、砕波後の流体運動においても良好に再現しているといえる。

防潮堤に作用する波圧の鉛直分布として、段波波圧については、波高が大きくなるとともに波圧も大きくなる傾向にあり、とりわけ、防潮堤下部地点においてはその傾向が強く現れる。また、防潮堤位置が沖側にある場合の方が、同じ波高において、段波波圧及び持続波圧ともに波圧が大きくなる傾向にある。

防潮堤に作用する波圧の鉛直分布の試験結果との比較については、波圧のオーダーは試験結果と概ね一致しており、再現性は高いことが確認された。一方、孤立波15cm、防潮堤位置汀線-137.5cmのケース（Case8）の防潮堤下部の計測地点においては、解析結果と試験結果との間に乖離が見られた。防潮堤位置汀線-137.5cmのケースでは、砂丘を乗り越えた津波が砂丘と防潮堤の間の水平部を高速に流れ、防潮堤下部に衝突して大きな圧力を生じさせる。孤立波15cmのケースが特に乖離が大きかったのは、水平部の流れの速度が実験よりも大きかったためと考えられる。水平部鉛直方向のメッシュ間隔や底面摩擦等を工夫することで、水平部の流れを減速してこの乖離を小さくすることが可能である。

[2] 移動床砂丘シミュレーション解析

移動床砂丘シミュレーション解析においては、実験比較ケースを6ケース、砂粒径変化ケースを18ケース、砂層考慮ケースを3ケースの「合計27ケース」の解析を実施した。上述の固定床の12ケースと併せて、本検討では「合計39ケース」の解析を実施したことになる。

防潮堤に作用する波圧の鉛直分布の試験結果との比較については、図2-8-1-1及び図2-8-1-2の結果より、波圧のオーダーは試験結果と概ね一致しており、再現性は高いことが確認された。防潮堤の上部では、計算結果と試験結果で水塊の跳ね上がる挙動に違いがみられ、圧力に差が認められるものの、全体的な圧力分布については、計算結果は試験結果を良好に再現しているといえる。また、図2-8-1-4～図2-8-1-6の結果より、固定床、移動床においても、防潮堤に作用する波圧分布に大きな違いがないことがわかった。これは、砂丘材料が固定床から移動床に変わったことによって、津波波形の状況に顕著な変化は見られなかったものと考えられる。

砂丘地形の河床変動高の縦断分布については、防潮堤位置に関わらず、波高が大きいほど砂丘地形の沖側先端（法肩）の侵食が進む傾向が試験結果と同様に捉えられた。一方で、砂丘地形の防潮堤側先端（法肩）の侵食については、防潮堤位置により、解析結果と試験結果とにおいて逆の傾向を示した。これは、試験結果では、気泡混入により砂丘を飛び越えるような流れ場となっているが、計算結果では、単相流モデルのため、砂丘に沿った流れとなっており、計算結果と試験結果で砂丘の地形変化に違いが発生したと考えられる。加えて、砂丘地形の防潮堤側先端（法肩）の侵食（変形）は防潮堤からの引き波時の戻り流れにおいても発生し、解析では、防潮堤位置が砂丘から離れたケースの方がその影響が強く受けたものと示唆される。それを裏付ける証拠として、引き波時における砂丘地形の防潮堤側先端（法肩）の浮遊砂濃度が、防潮堤位置が離れたケースの方が相対的に高くなる結果が得られており、砂の巻き上がりが強まったものと考えられる。

砂粒径変化による砂移動の影響については、防潮堤位置に関わらず、防潮堤に作用する波圧分布の傾向は、砂粒径変化で顕著な違いは見られない。これは、砂粒径が変わったことによって、津波波形の状況に顕著な変化は見られなかったものと考えられる。一方、砂粒径が小さくなるほど砂丘地形の侵食が進む傾向が捉えられた。この理由としては、浮遊砂濃度分布が、砂粒径が小さいほど浮遊砂濃度が高くなる結果がことと関連している。すなわち、砂粒径が小さいほど砂の巻き上がりが強まり、結果として、砂丘地形の侵食が進んだものと示唆される。

砂層を非一様分布としたことによる砂移動の影響については、防潮堤に作用する波圧分布の傾向は、砂層を考慮したことにより顕著な違いは見られない。これは、砂層を考慮した（非一様分布にした）ことによって、津波波形の状況に顕著な変化は見られなかったものと考えられる。また、本解析では砂粒径は試験材料と同様の値を採用したため、砂丘侵食（変形）においても差異は殆ど見られなかった。これは、浮遊砂濃度分布が砂層を考慮したことによる差異が見られなかったものと関連しており、砂の巻き上がりに違いは見られなかったと考えられる。しかしながら、例えば、砂粒径を更に小さくした場合等では、侵食後の砂丘地形に大きな違いが生じるものと考えられる。

(2) 解析モデルの適用範囲について

固定床の解析については、沖からの津波の伝搬と津波が防潮堤に衝突するまでの水位変化や流速については試験結果を概ね再現できていることから、適用可能と考えられる。

移動床の解析については、津波の砂丘への衝突と越流過程での洗掘現象についてはある程度現象を再現できており、防潮堤に衝突した後の津波が引き波となり沖側へ流出する際の砂丘の沖側法肩での洗掘現象についても再現性が確認できる。しかしながら、防潮堤が砂丘より岸側に離れて存在する場合には、砂丘岸側法肩での流れが気泡を含むことにより気液二相流になった結果、単相を前提としていた解析モデルによる流れが試験結果と一致せず、洗掘が試験結果に比べて過大となっている。

以上から、本解析モデルは、津波流動が単相流として扱える場合の砂移動は適用範囲内、流れが気泡を巻き込むなどにより気液二相流化する場合は適用範囲外といえる。

(3) 今後の課題

[1] 洗掘解析の精度向上

解析結果と試験結果の比較により、河床変動解析では、砂丘への津波の越流時における砂丘の沖側の法肩および天端での侵食現象と、波が防潮堤へ衝突し、反射して引き波となった際の沖側の法肩での侵食現象を定性的に再現できていることが確認できる。また、防潮堤前面への土砂の移動・堆積量は少ないことから、おそらく河床変動・土砂輸送の影響による防潮堤での作用波圧の上昇等の影響は軽微であると考えられる。

しかしながら、砂丘の沖側の法尻での堆積や、防潮堤が汀線-137.5cm の場合には、砂丘の岸側の法肩の侵食が過大となり、試験結果との違いが生じている。

試験結果との差異が生じる要因としては以下のことが考えられる。

- ・ 砂丘の天端から法尻にかけて津波が通過する際の流れの違い
(おもに流れの気液二相化の影響)
- ・ 砂丘の移動床部分の不均質性
(同一材料であっても、締固めの度合いや含水率等によって侵食傾向が一定にならない)
- ・ 掃流砂の移動に関するパラメータの影響 (摩擦速度)
- ・ 浮遊砂の巻き上げ・沈降に関するパラメータの影響 (沈降速度)

上記を勘案すると、より現実に近い解析を行うにあたって、砂の移動に直接影響を与える流砂のモデルとそのパラメータについて、試験結果の再現性の観点からモデルの選択とパラメータの調整を行うことが有効と考えられる。

また、流れの精度をより向上させるために、気液二相流モデルを適用して流動・河床変動を解析することにより、再現性が向上する可能性があると考えられる。

付録 洗掘影響の把握解析

本検討で用いた河床変動モデルの概要を以下に示す。河川・海岸への適用を考え、土砂の分級過程および河床の粗粒化や、細粒化現象を表現できるように、混合砂礫モデルを導入し、粒径毎に流砂量を計算する。

流砂の移動については、掃流砂、浮遊砂、Wash load を考慮する。浮遊砂・Wash load については、浮上・沈降および非定常の 3 次元移流拡散方程式を解く非平衡モデルとする。

掃流砂量については式(1)に示す芦田・道上式⁹⁾により評価する。

$$\frac{q_{bk}}{\sqrt{sgd_k^3}} = 17P_{bk} \times \tau_{*ek}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}}\right) \dots (1)$$

ここに、 s : 河床材料の水中比重 (=1.65) , g : 重力加速度,

添字 k : 粒径階, d_m : 河床材料の平均粒径, P_{bk} : 河床表層の粒径階 d_k の含有率, $\tau_{*k}, \tau_{*ek}, \tau_{*ck}$: 粒径階 d_k に対する無次元掃流力と無次元有効掃流力, 無次元限界掃流力 である。

τ_{*ek} を算定する為の有効摩擦速度 u_{*e} は次の式(2)で与えられる。

$$u_{*e} = \frac{u}{6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{D_m (1 + 2\tau_{*m})}} \dots (2)$$

浮遊砂については、浮上・沈降過程および非定常の 3 次元移流拡散方程式を解く非平衡モデルとする。浮遊砂の浮上量 E_{sk} は、次の式(3)で与えられる。

$$E_{sk} = W_{sk} C_{ek} \dots (3)$$

ここに、 W_{sk} : 粒径階 d_k に対する沈降速度, C_{ek} : 粒径階 d_k に対する浮遊砂の平衡基準面濃度である。

粒径毎の沈降速度 W_{sk} は次式の Rubey 式によって与えられる。

$$W_{sk} = \sqrt{sgd_k} \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd_k^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd_k^3}} \right) \dots (4)$$

ここに、 ν : 水の動粘性係数である。

また、平衡基準面濃度については、式(5)に示す芦田・道上式¹⁰⁾による平衡基準面濃度式により評価する。

$$C_{ek} = P_{bk} k_0 \left\{ \frac{g(\xi_0)}{\xi_0} - G(\xi_0) \right\} \dots (5)$$

ただし、 $g(\xi_0)$ 、 $G(\xi_0)$ は次のように与えられる。

$$g(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi_0^2\right)$$

$$G(\xi_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\xi_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\xi^2\right) d\xi$$

ここに、 k_0 : 比例定数 (=0.025) , ξ_0 : W_{sk}/σ_P , ξ : W_P/σ_P , W_P : 砂礫の鉛直方向の変動速度, σ_P : W_P の標準偏差 (=0.75 u_*)

河床高の変化については、各粒径毎、流砂形態毎に求められた流砂量を用いて式(6)に示す流砂の連続式により計算する。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{-1}{(1-\lambda)} \sum_k \left\{ \frac{\partial q_{bzk}}{\partial x} + \frac{\partial q_{byk}}{\partial y} + (E_{sk} - D_{sk}) \right\} \dots (6)$$

ここに、 z_b : 河床高,

q_{bzk} : x 方向の粒径階 k の単位幅掃流砂量,

q_{byk} : y 方向の粒径階 k の単位幅掃流砂量,

E_{sk}, D_{sk} : 粒径階 の浮遊砂の浮上量と沈降量

である.

河床材料変化については, 侵食と堆積が繰り返される場合には, 河床材料は複雑な多層構造となる. このような場合に, 河床表面に限らず河床の深さ方向における粒度分布の時間変化を計算する必要がある. そこで本研究では, 混合層の概念に遷移層と堆積層の概念を導入し, 粒度分布の鉛直方向の変化を考慮した芦田・江頭・劉らの多層モデル¹¹⁾を用いる.

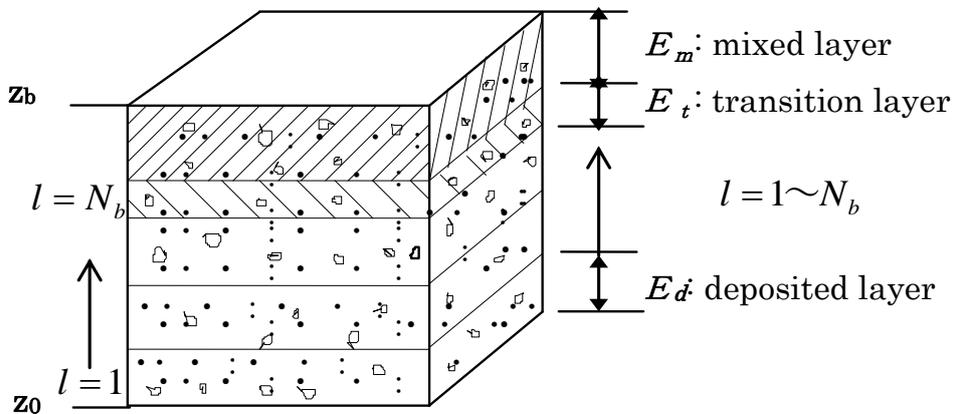


図 I- 1 河床材料の粒度分布変化モデル模式図

図 I- 1 に示すように, 河床をある基準面 z_0 から河床面 z_b まで鉛直に多数の層に区分する. 最上層は交換層(mixed layer)で, その厚さは E_m である. そのすぐ下の層は遷移層 (transition layer) で, 厚さは E_t である. その他の下層領域は堆積層 (deposited layer) と呼ばれ, 厚さは全て E_d である. 上記の変数を用いて, 河床の構成は次式で表される.

$$z_b = E_m + E_t + N_b \times E_d + z_0$$

ここに, N_b は堆積層の総数である. E_d は常に一定値とするが, E_t は河床変動に伴い変化し, 次式に示すような制限を受ける.

$$0 < E_t \leq E_d$$

河床表層における河床材料の各粒径階の含有率の変化は次の式(7)により評価する。

$$\frac{\partial P_{bk}}{\partial t} - \frac{1}{E_m} \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{E_m} \frac{\partial z_b}{\partial t} (\eta P_{bk} + (1-\eta) P_{bko}) = 0 \quad \dots (7)$$

ここに、 λ : 河床材料の空隙率、 P_{bk} : 交換層の粒径階 D_k の含有率、 P_{bko} : 交換層の下層における粒径階 D_k の含有率、 E_m は交換層の厚さである。また、 η は係数で、侵食のとき $\eta = 0$ 、堆積のとき $\eta = 1$ である。

河床に土砂が堆積していく場合、堆積高が設定している河床材料層厚を上回った時点で遷移層の粒度分布を堆積層第 1 層目に繰り下げる処理を行う。逆に河床が侵食される場合、侵食高が河床材料層厚を上回った時点で堆積層第 1 層の粒度分布を遷移層に繰り上げる処理を行う。このような処理により、河床の深さ方向の粒度分布の変化を計算・記憶していく。図 I-2 に堆積過程、図 I-3 に侵食過程の模式図を示す。