

図 4.7 参 1-21 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [115-120 分]

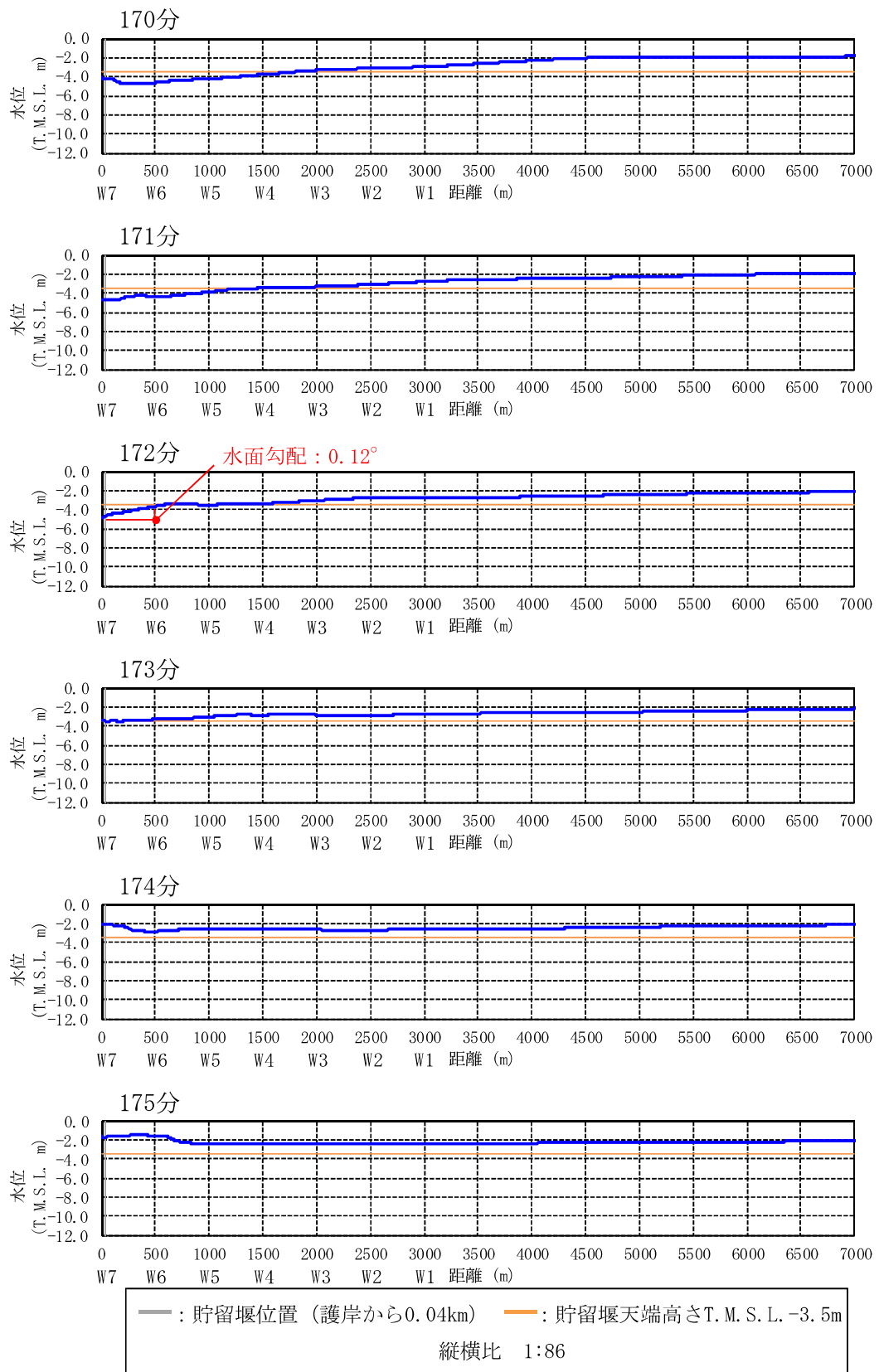


図 4.7 参 1-22 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [170-175 分]

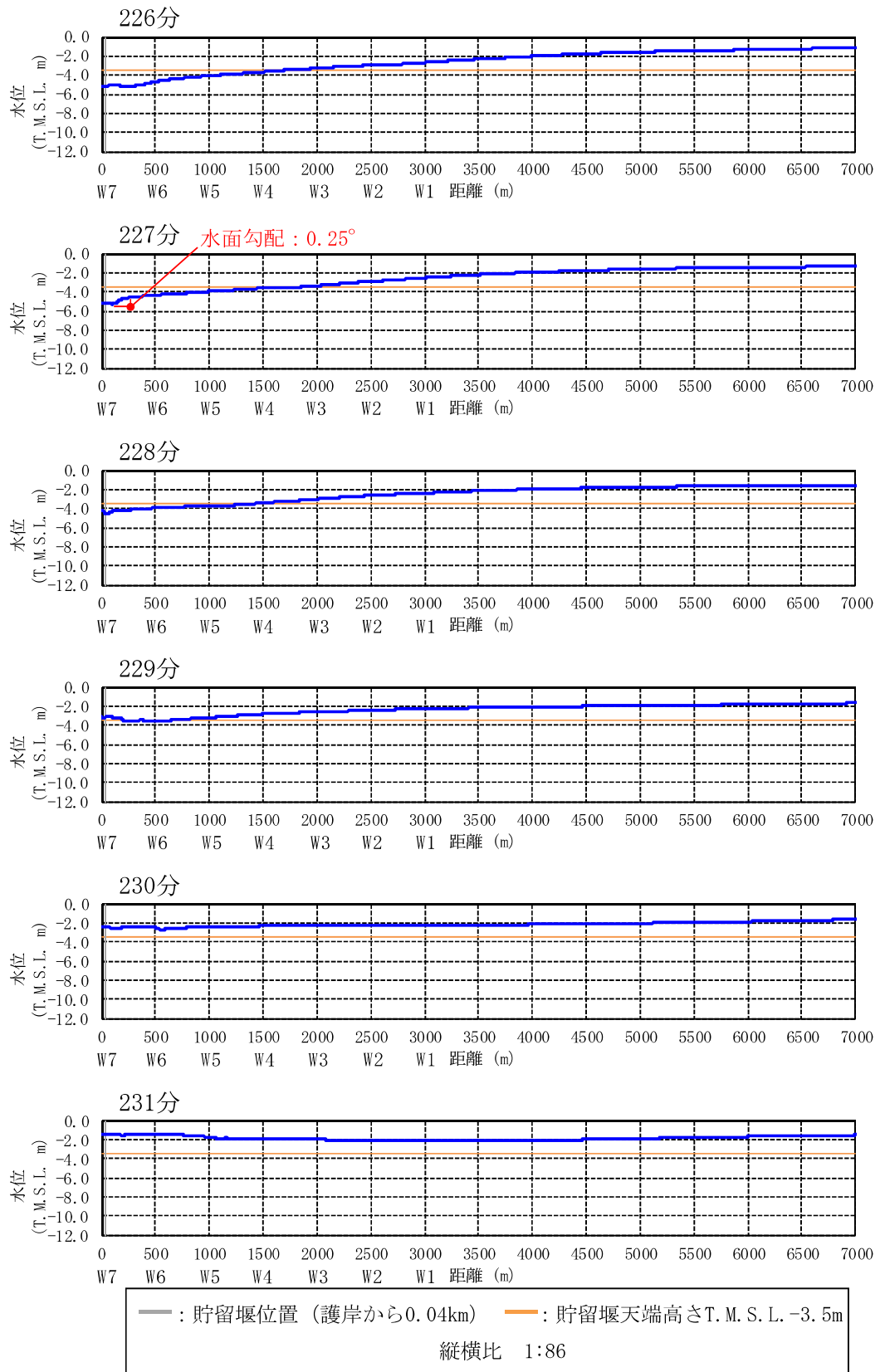


図 4.7 参 1-23 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [226-231 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

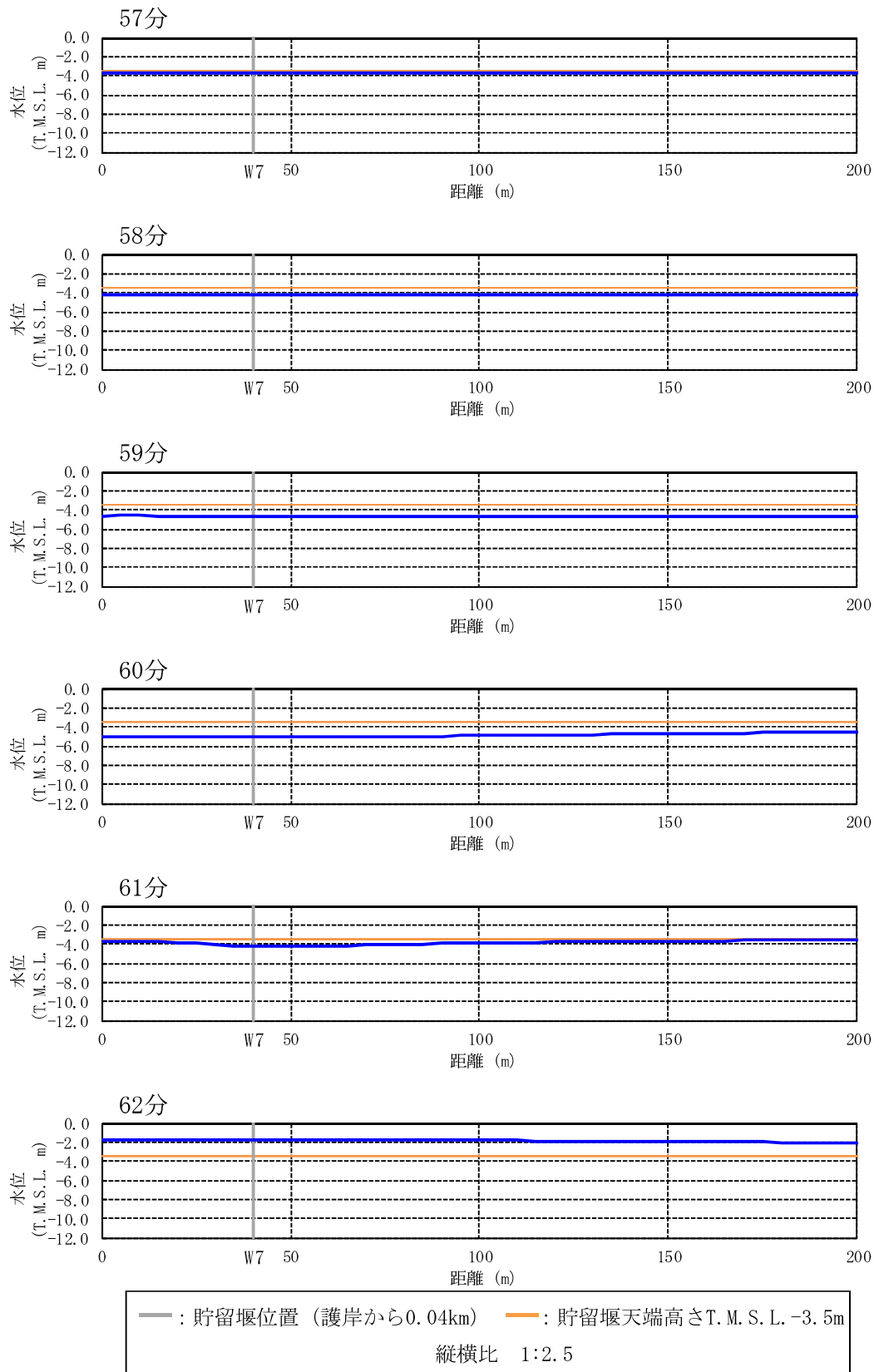


図 4.7 参 1-24 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [57-62 分, 0-200m を拡大]

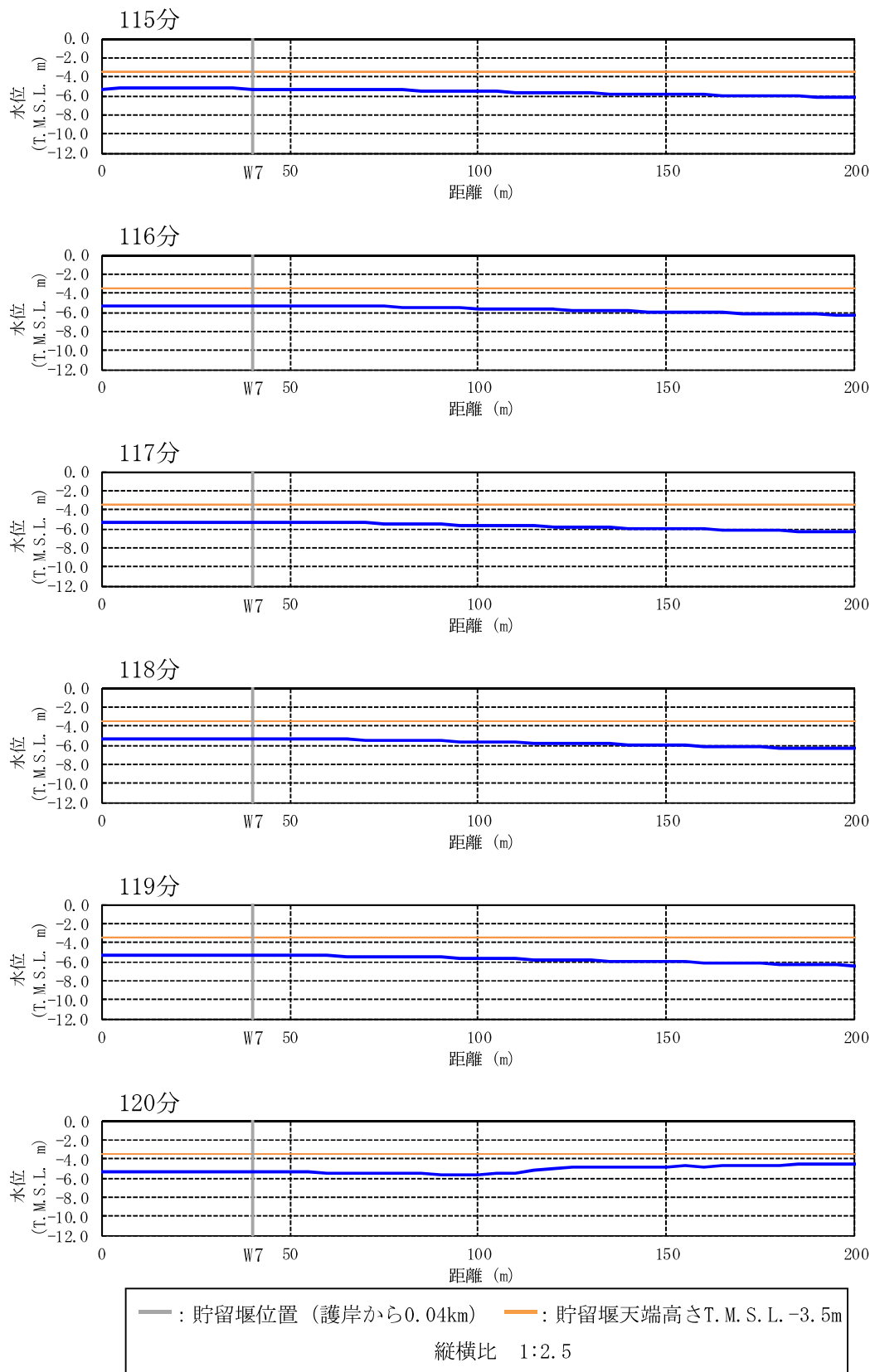


図 4.7 参 1-25 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [115-120 分, 0-200m を拡大]

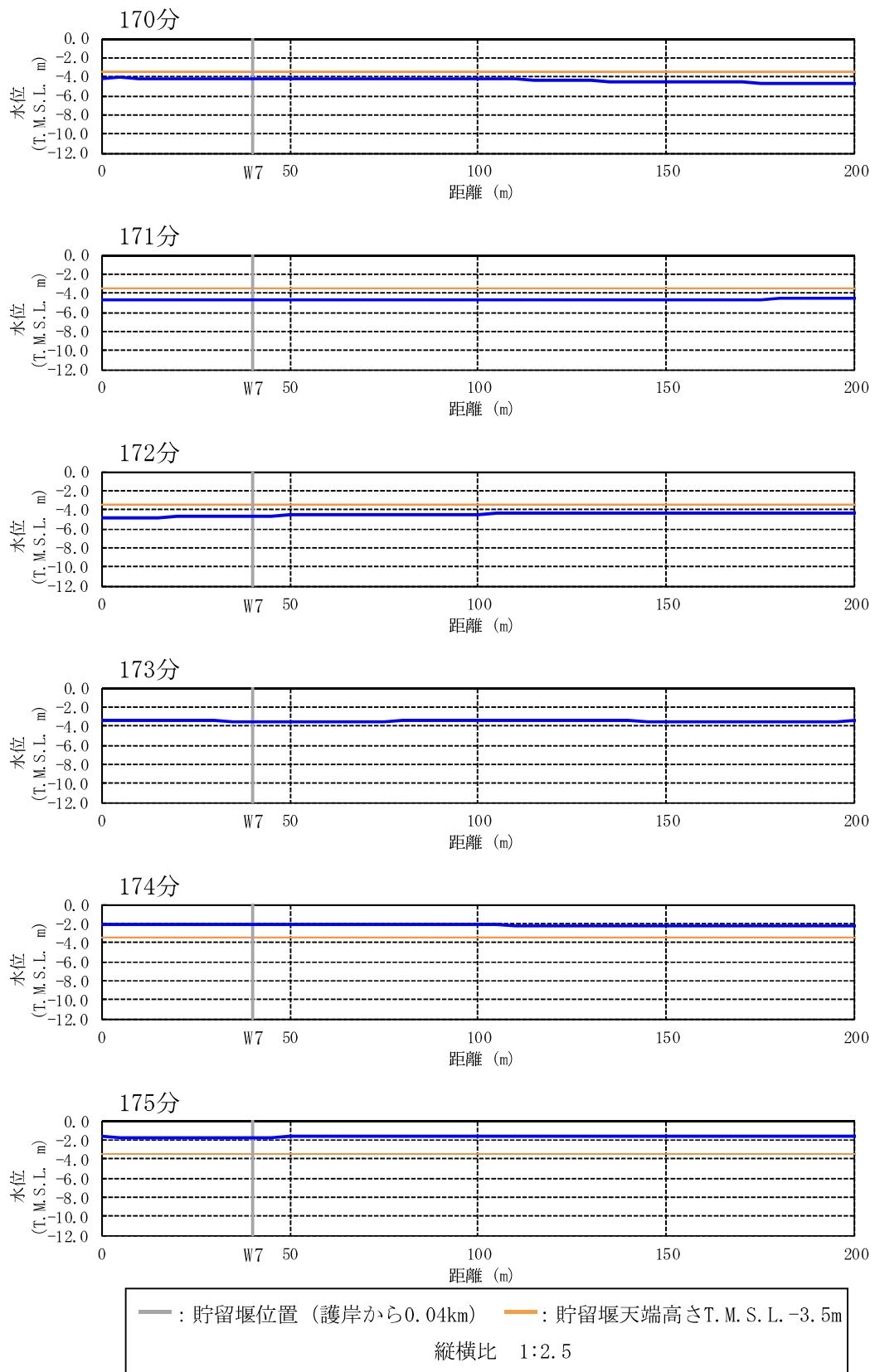


図 4.7 参 1-26 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [170-175 分, 0-200m を拡大]

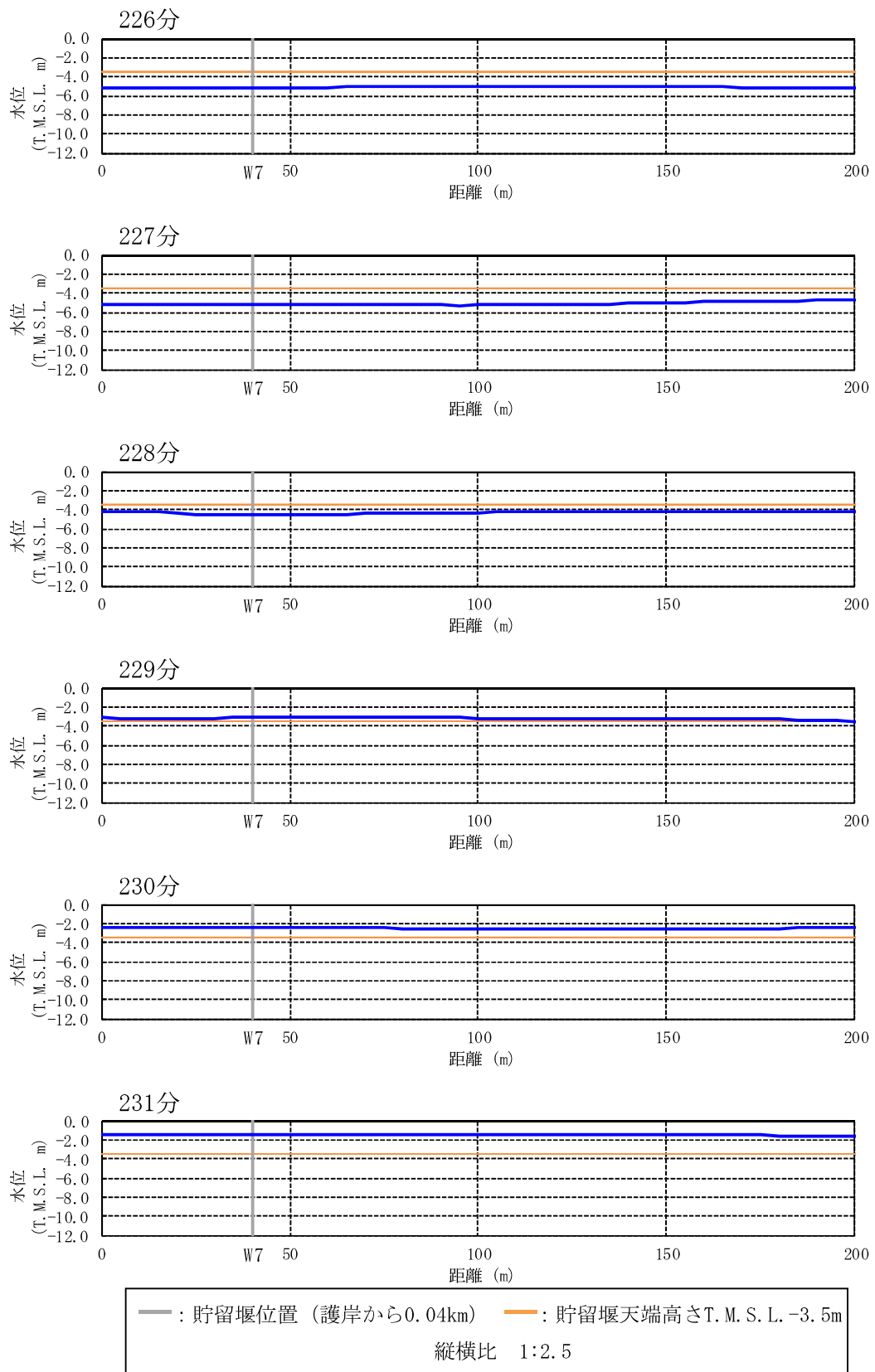


図 4.7 参 1-27 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [226-231 分, 0-200m を拡大]

### 1.3 基準津波 3

基準津波 3 の出力点ごとの水位時刻歴波形を図 4.7 参 1-28 に示す。基準津波 1 および 2 と同様に、波形の中で波が切り立っている時間帯にソリトン分裂や砕波が発生しやすいと考えられる。そこで、着目時間の範囲を拡大した出力点ごとの水位時刻歴波形を図 4.7 参 1-29 から図 4.7 参 1-33 に示す。また、水位の空間分布（全景）の時間変化を図 4.7 参 1-34 から図 4.7 参 1-38 に示し、水面勾配が最大となるものについてその水面勾配を示す。さらに、護岸で反射し沖合に向かって進行する波で水面勾配が大きく見えるものについても念のため水面勾配を示す。また、水位の空間分布（貯留堰設置位置近景）の時間変化を図 4.7 参 1-39 から図 4.7 参 1-43 に示す。

水位時刻歴波形では、ソリトン分裂と考えられる元の周期の波形に短周期の波形が重なるような傾向は見られず、沖合から護岸方向へ進行する波形の空間分布の時間変化からも、ソリトン分裂は発生しないと判断した。また、水位時刻歴波形や空間分布の時間変化からは砕波が発生するような段波形状も見られず、護岸方向へ進行する波の水面勾配も最大で  $2.55^\circ$  と小さいことから、砕波も発生しないと判断した。さらに、護岸で反射して沖合方向へ進行する波で水面勾配が大きく見えるものについては、水面勾配を念のため確認したところ最大で  $1.91^\circ$  と十分に小さく、反射波でも砕波は発生しないと判断した。

以上より、基準津波 3 のケースでもソリトン分裂および砕波は発生しないことを確認した。



a. 水位時刻歴波形と着目時間

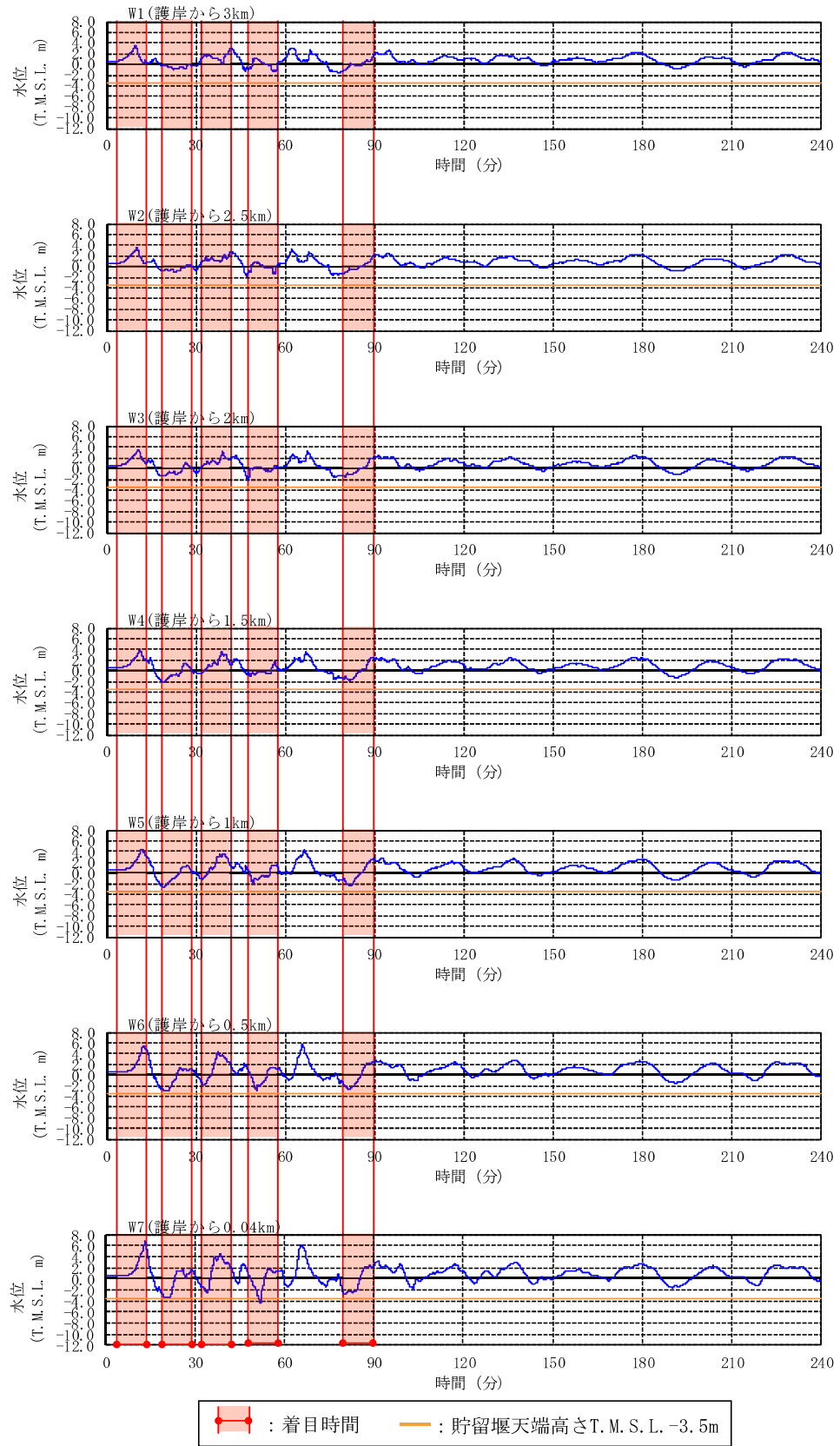


図 4.7 参 1-28 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [0-240 分]

b. 水位時刻歴波形(着目時間の拡大)

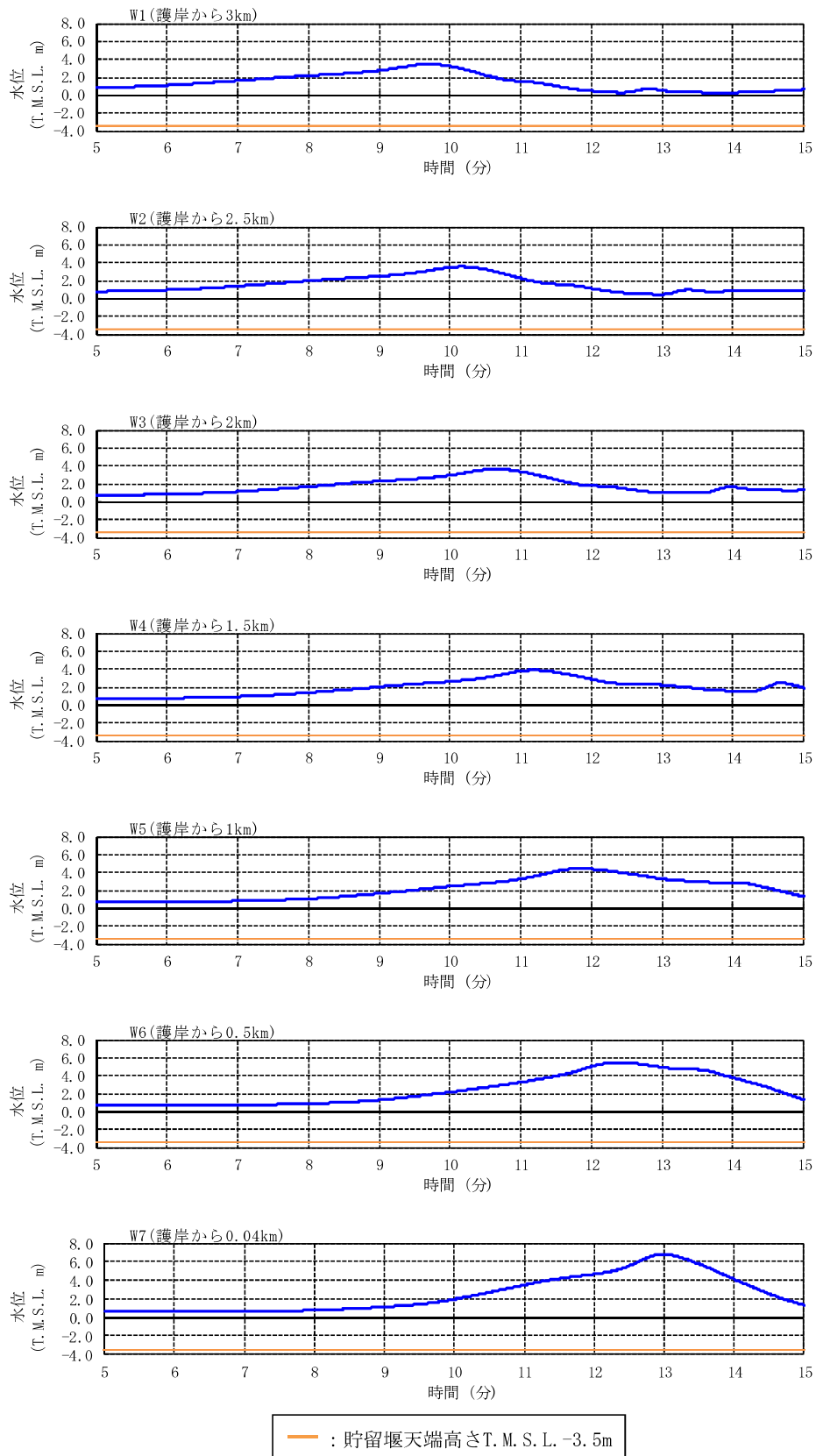


図 4.7 参 1-29 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [5-15 分を拡大]

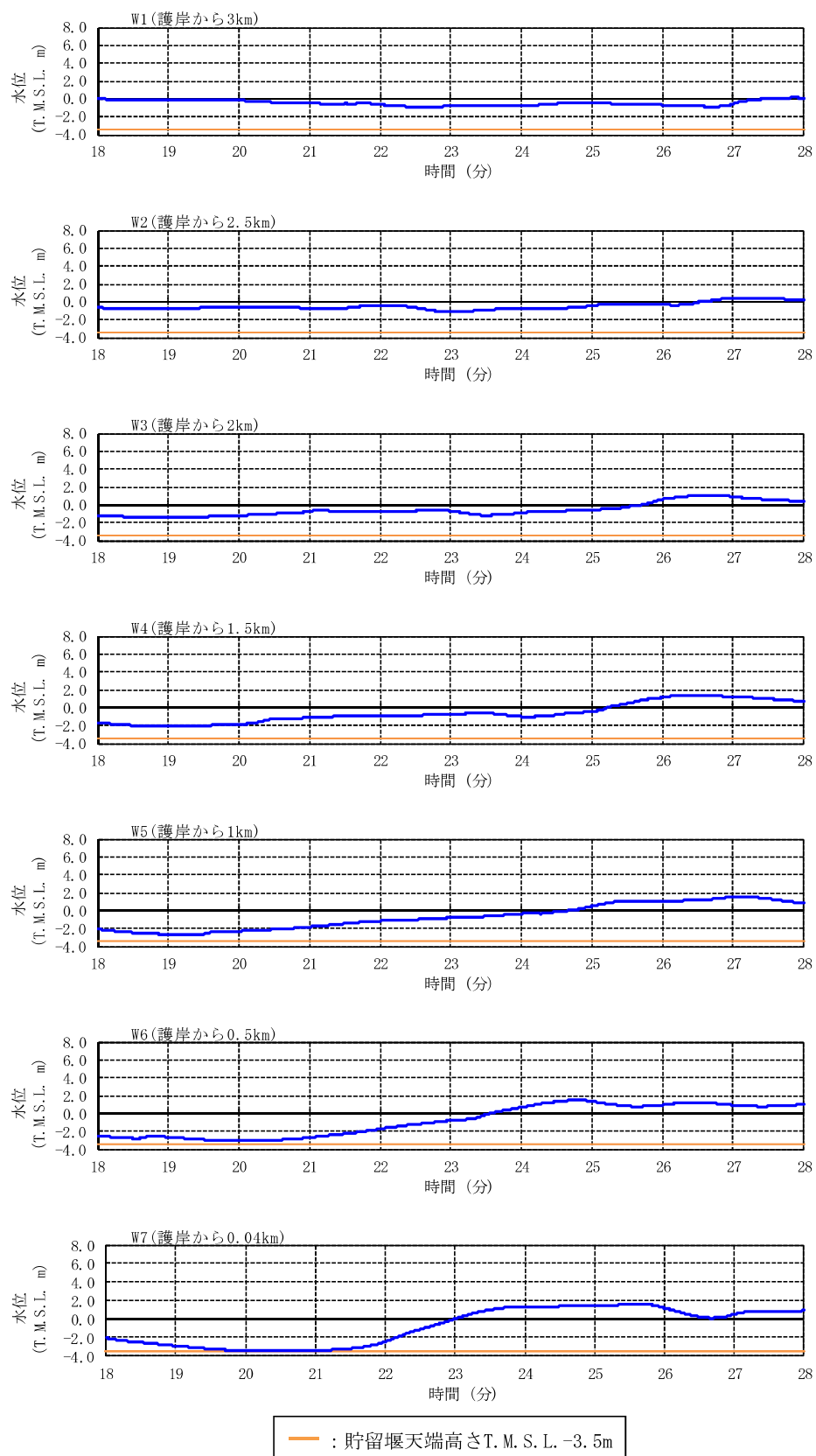


図 4.7 参 1-30 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [18-28 分を拡大]

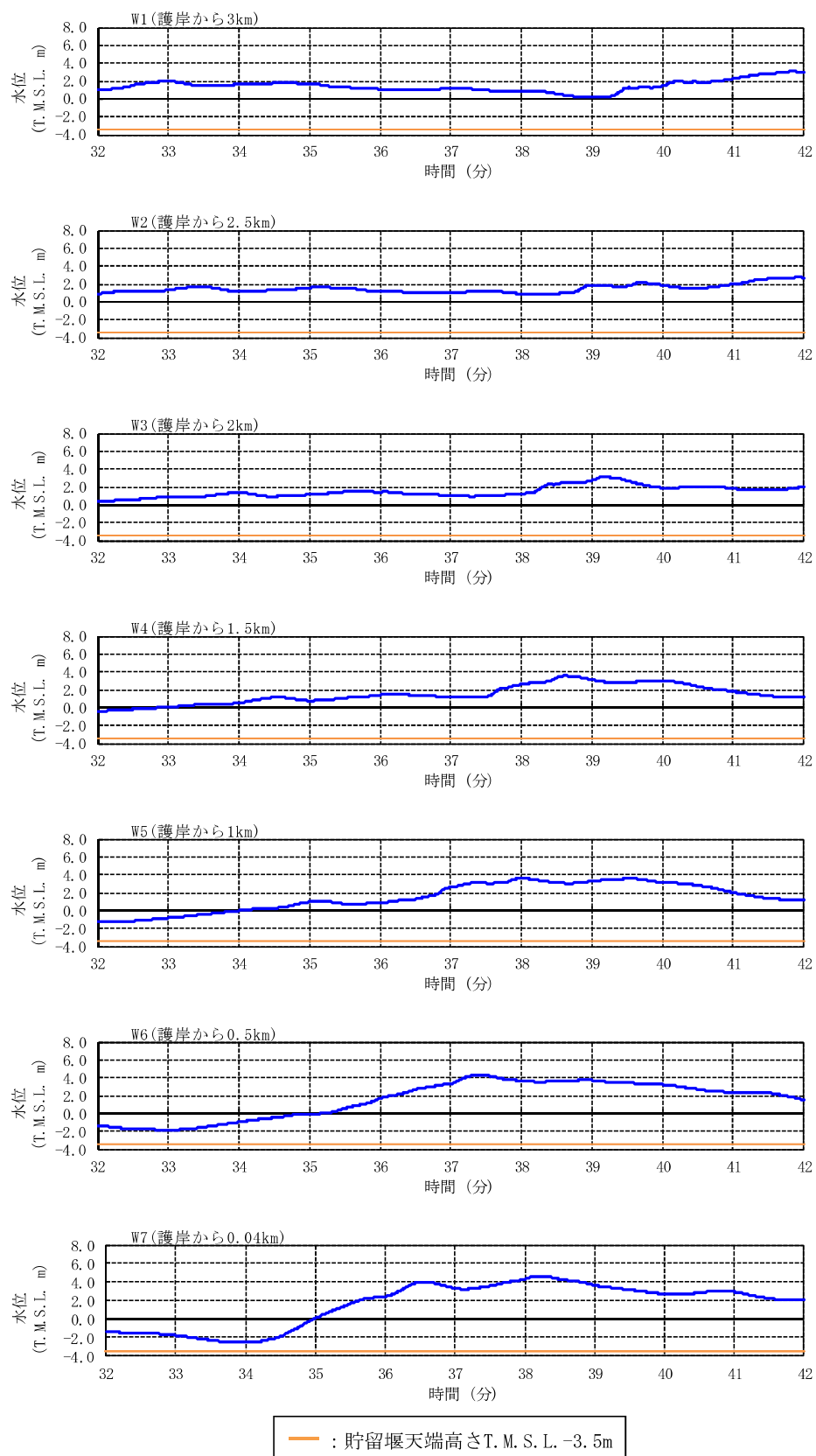


図 4.7 参 1-31 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [32-42 分を拡大]

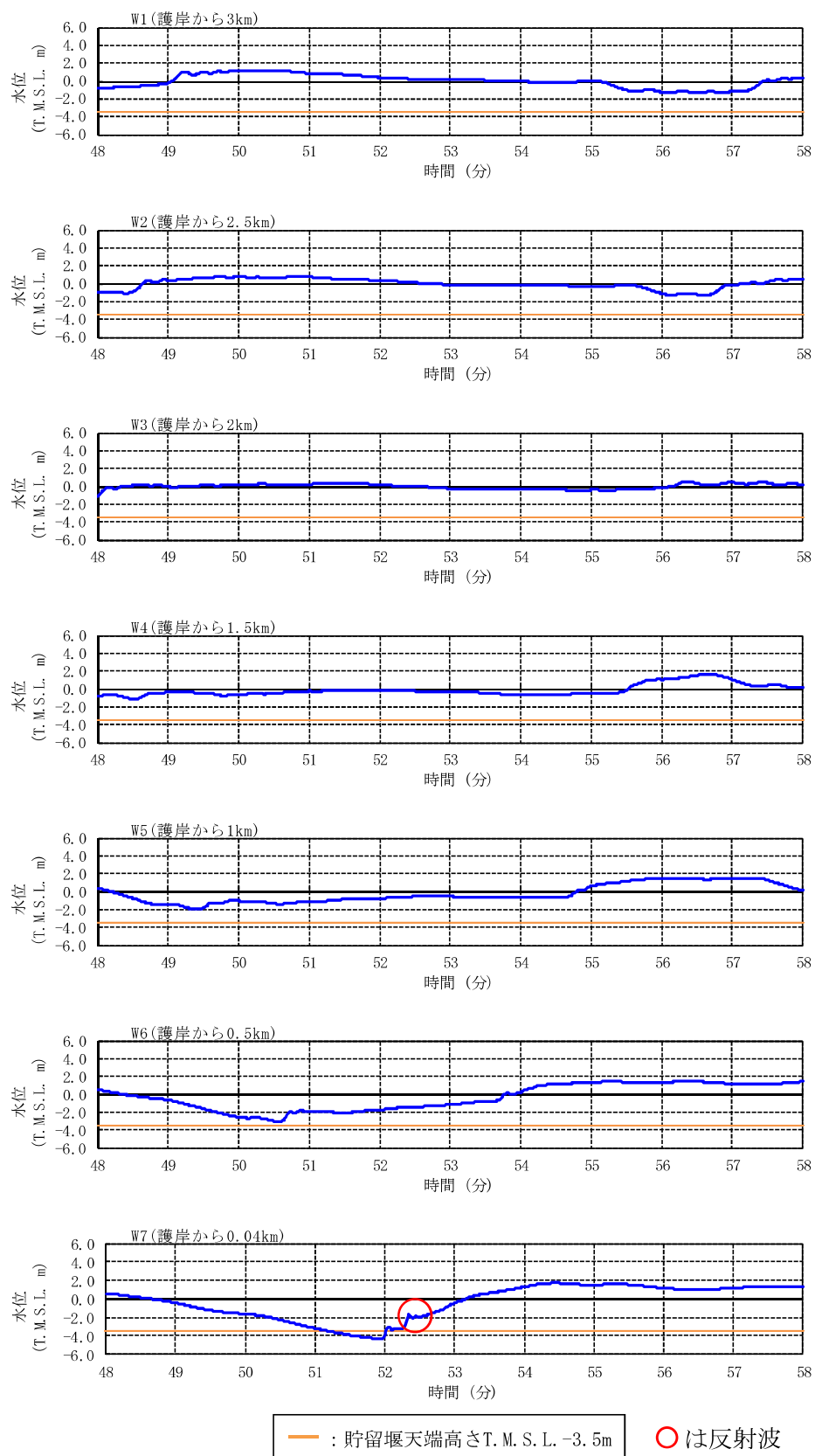


図 4.7 参 1-32 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [48-58 分を拡大]

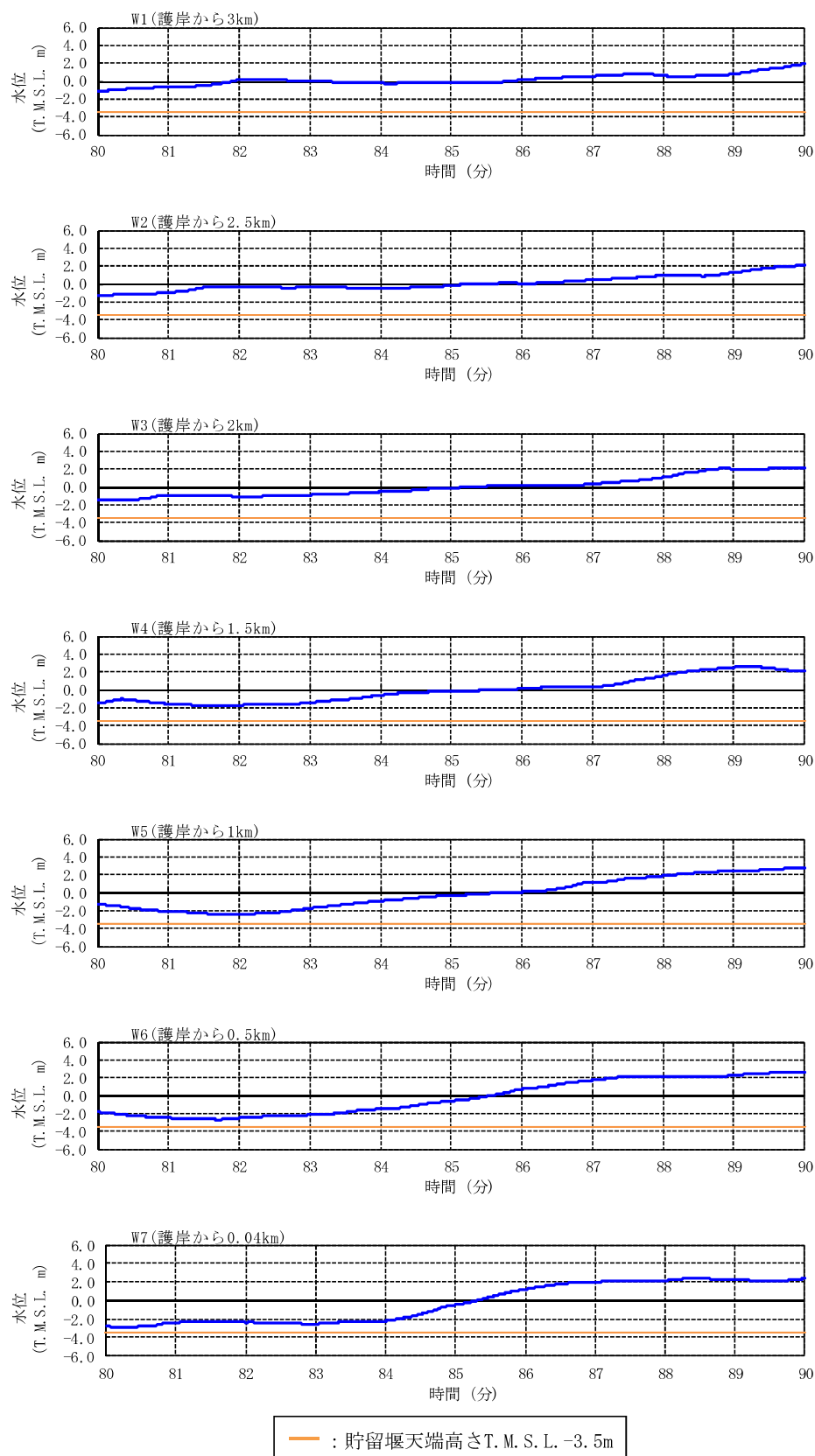


図 4.7 参 1-33 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [80-90 分を拡大]

c. 着目時間別の水位の空間分布  
 (1) 全景

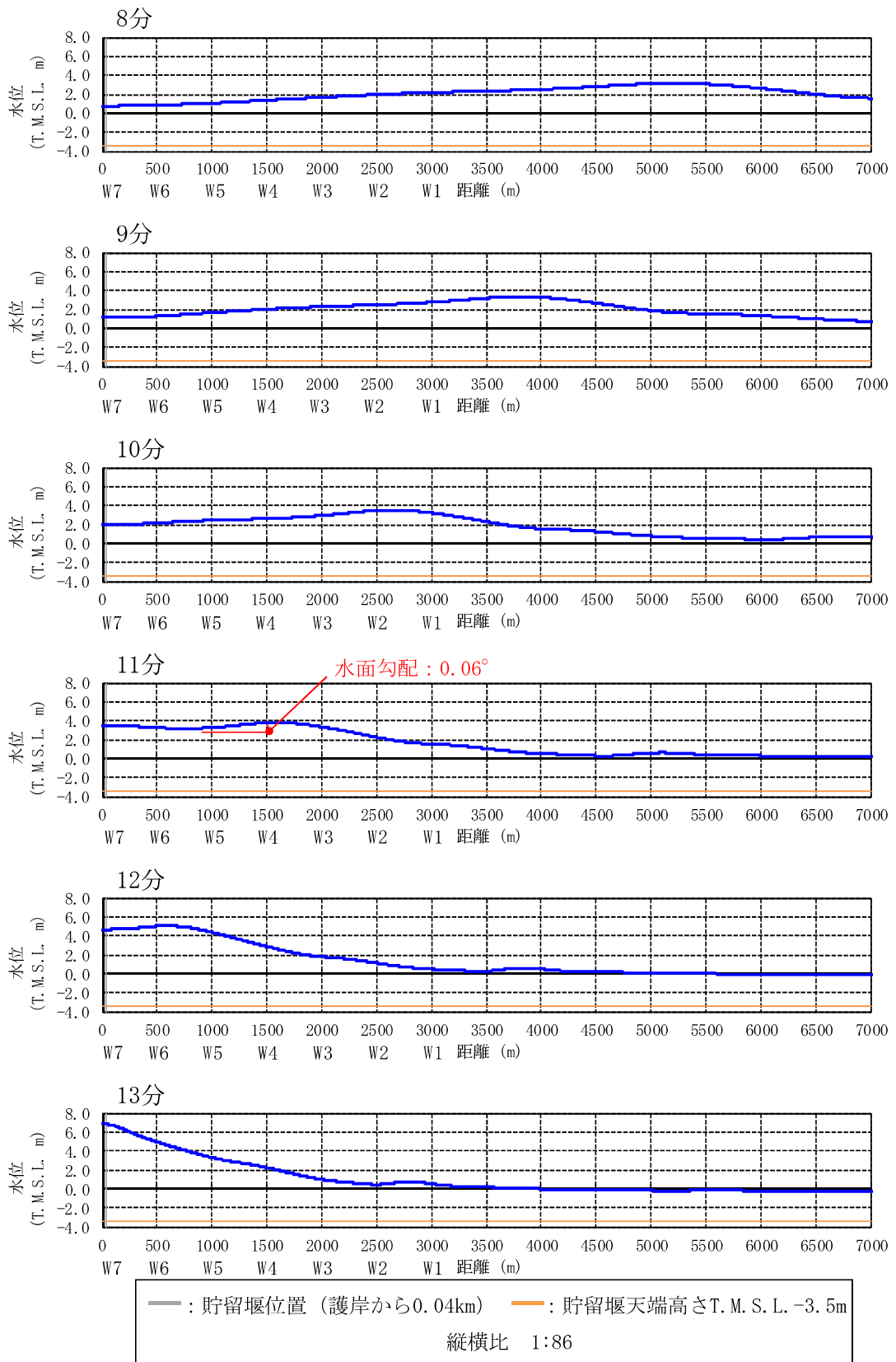


図 4.7 参 1-34 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [8-13 分]

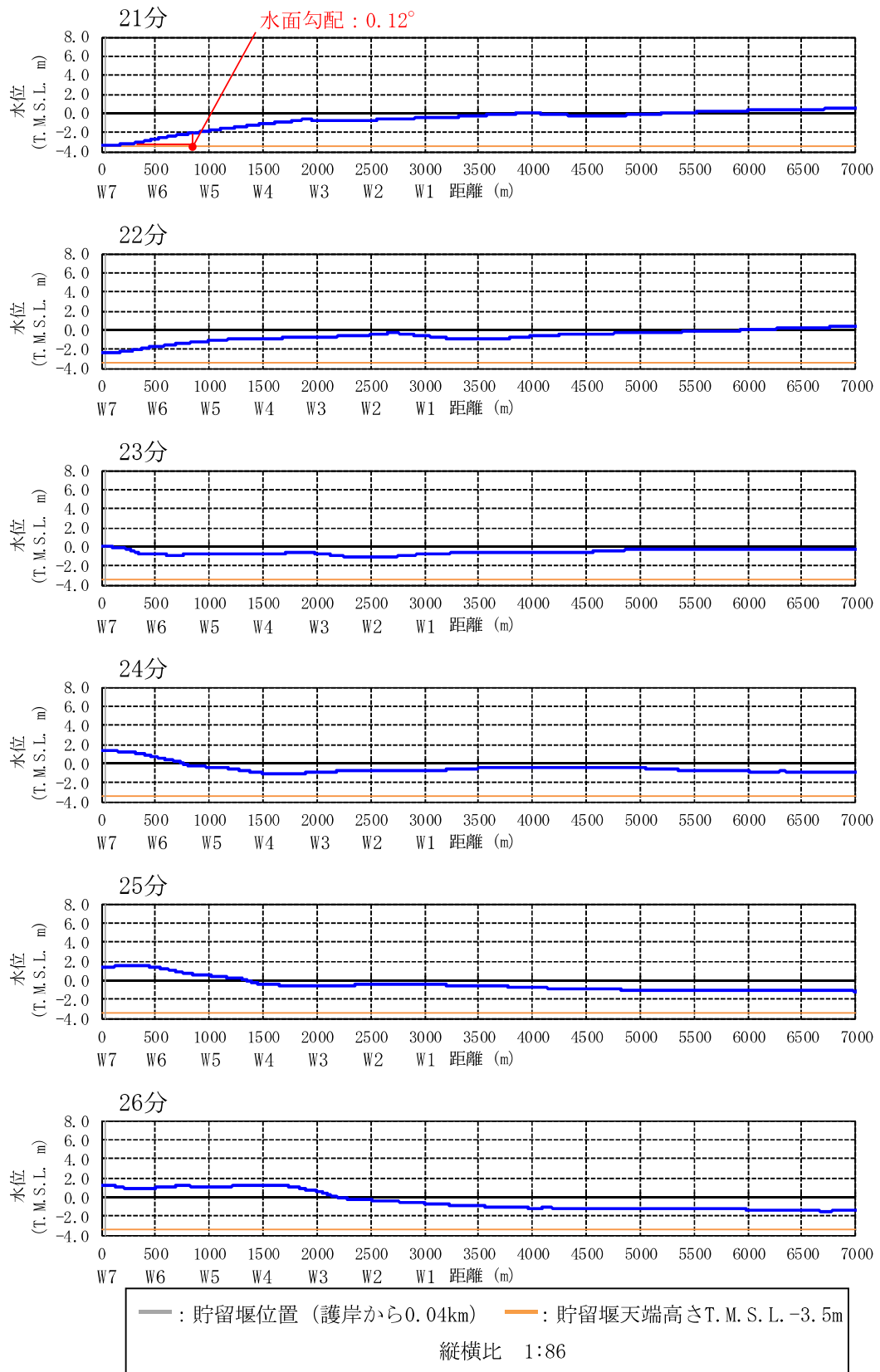


図 4.7 参 1-35 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [21-26 分]



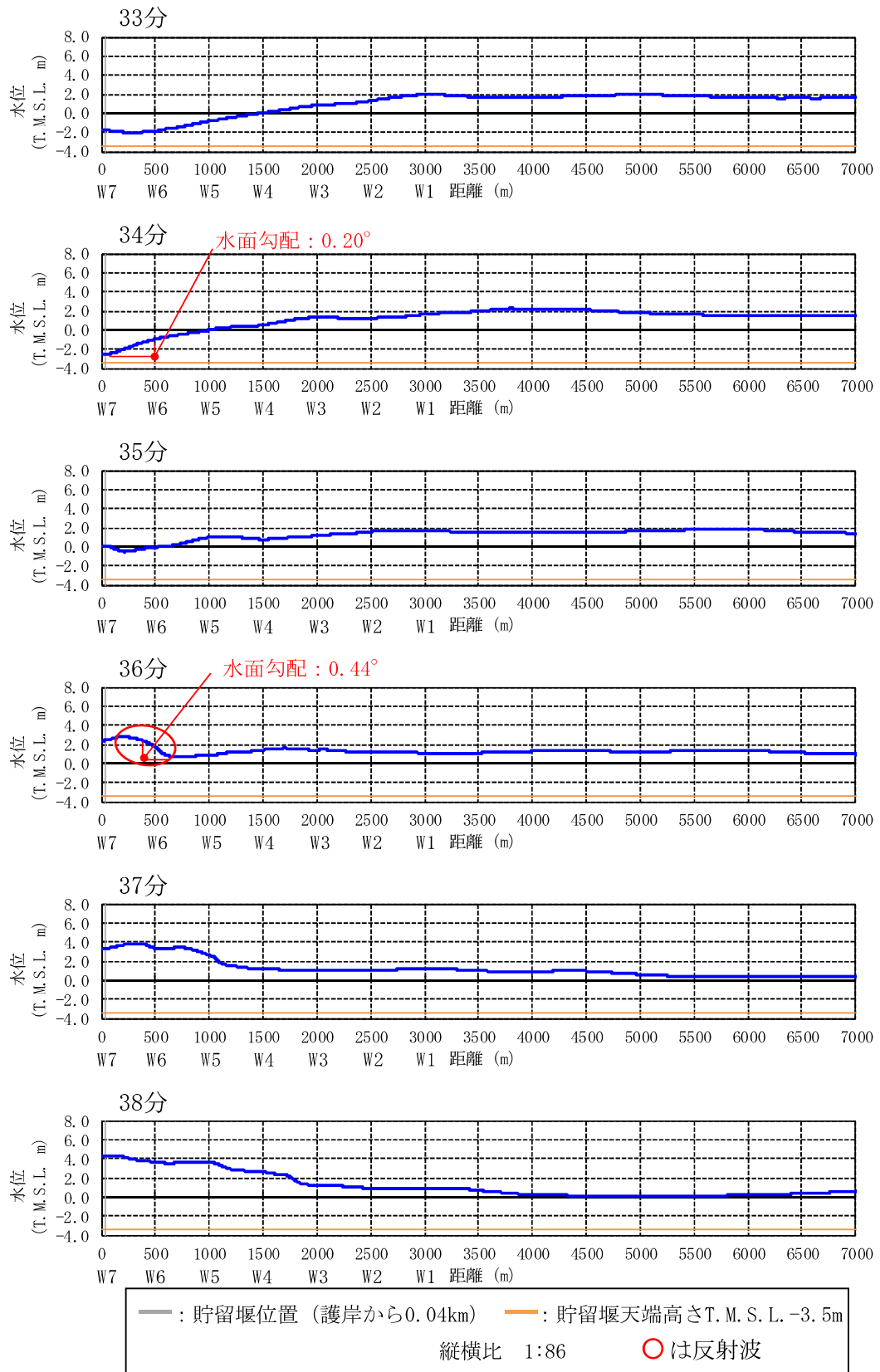


図 4.7 参 1-36 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [33-38 分]

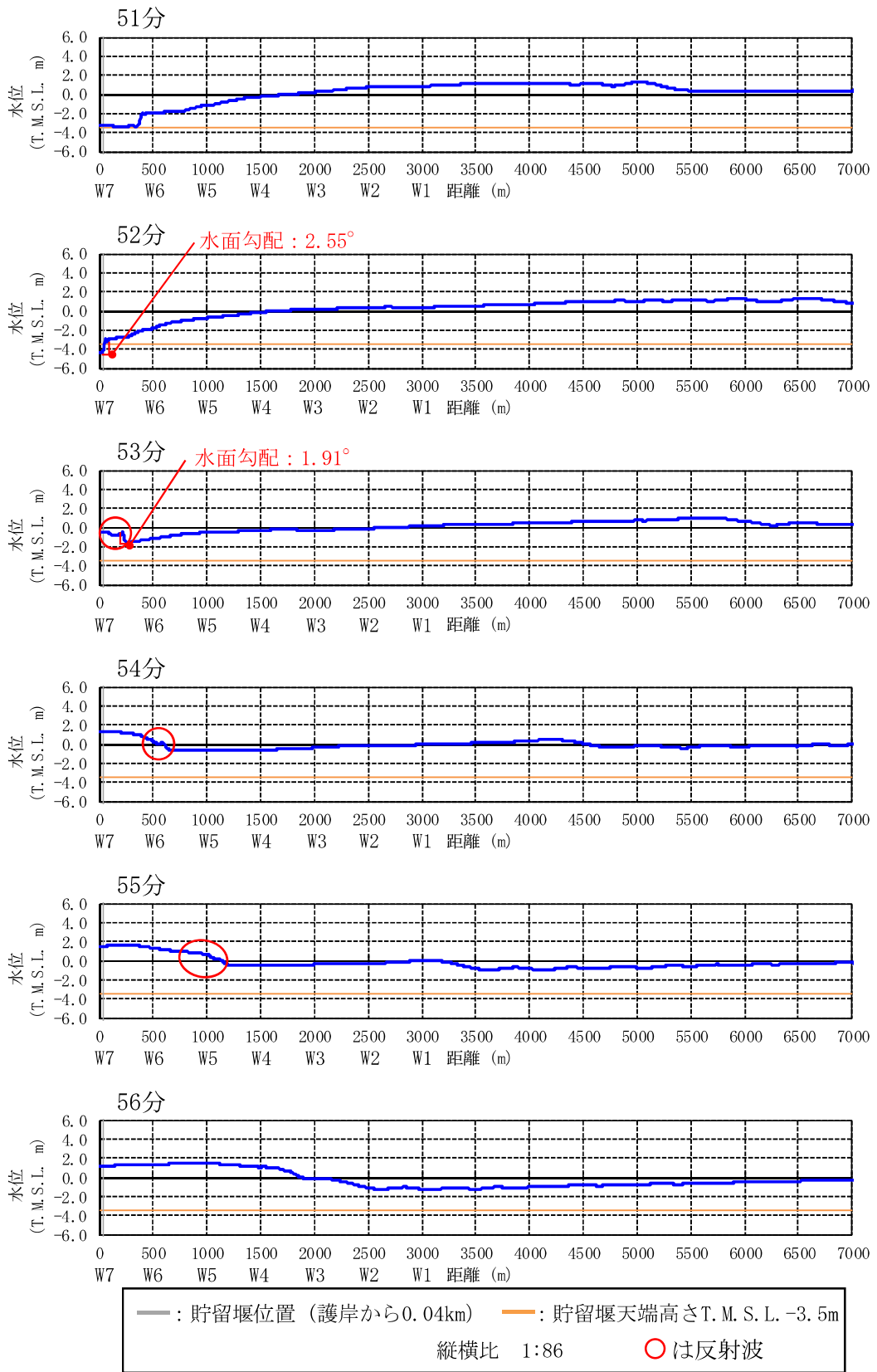


図 4.7 参 1-37 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分]

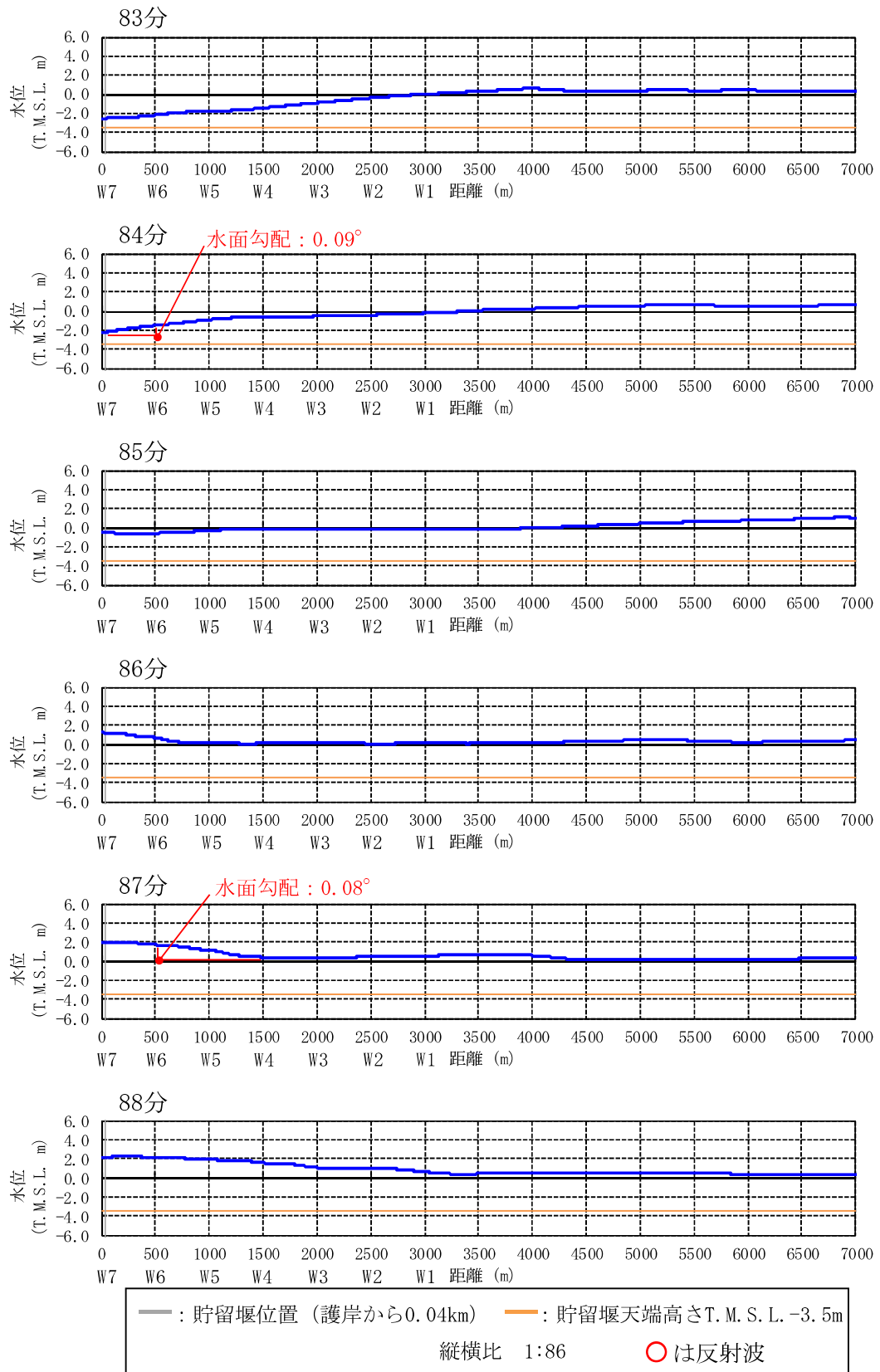


図 4.7 参 1-38 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [83-88 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

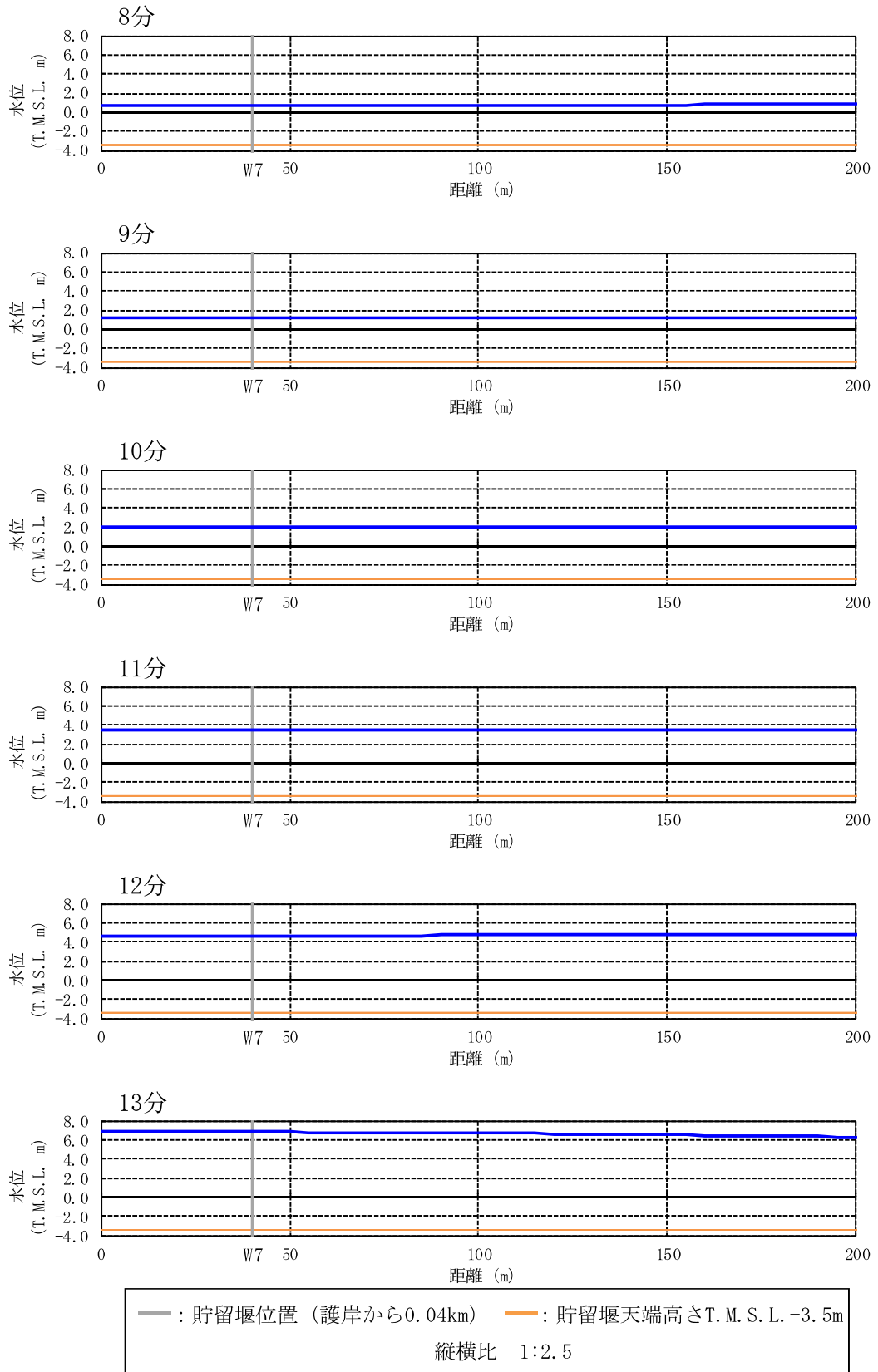


図 4.7 参 1-39 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [8-13 分, 0-200m を拡大]

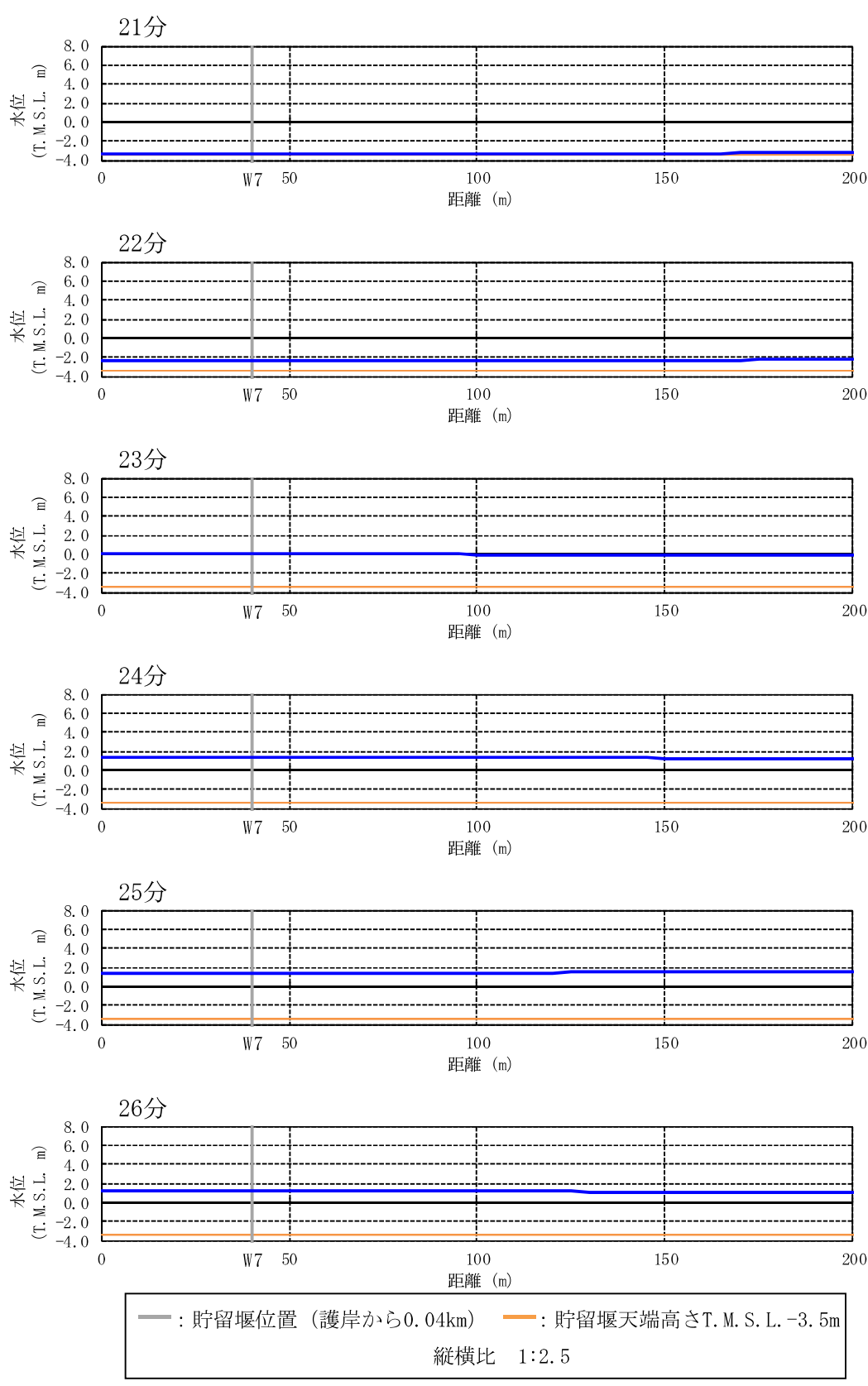


図 4.7 参 1-40 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [21-26 分, 0-200m を拡大]

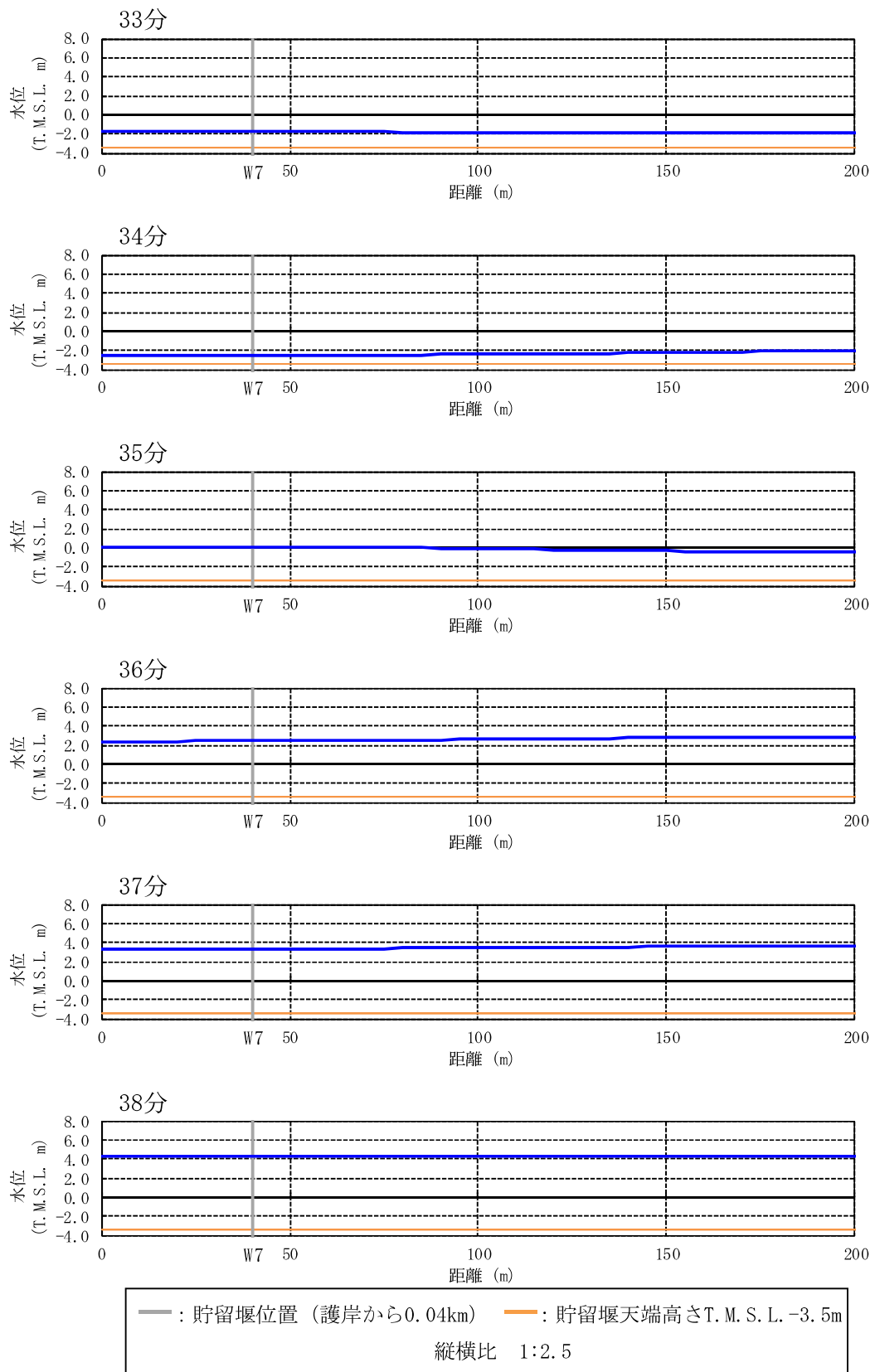


図 4.7 参 1-41 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [33-38 分, 0-200m を拡大]

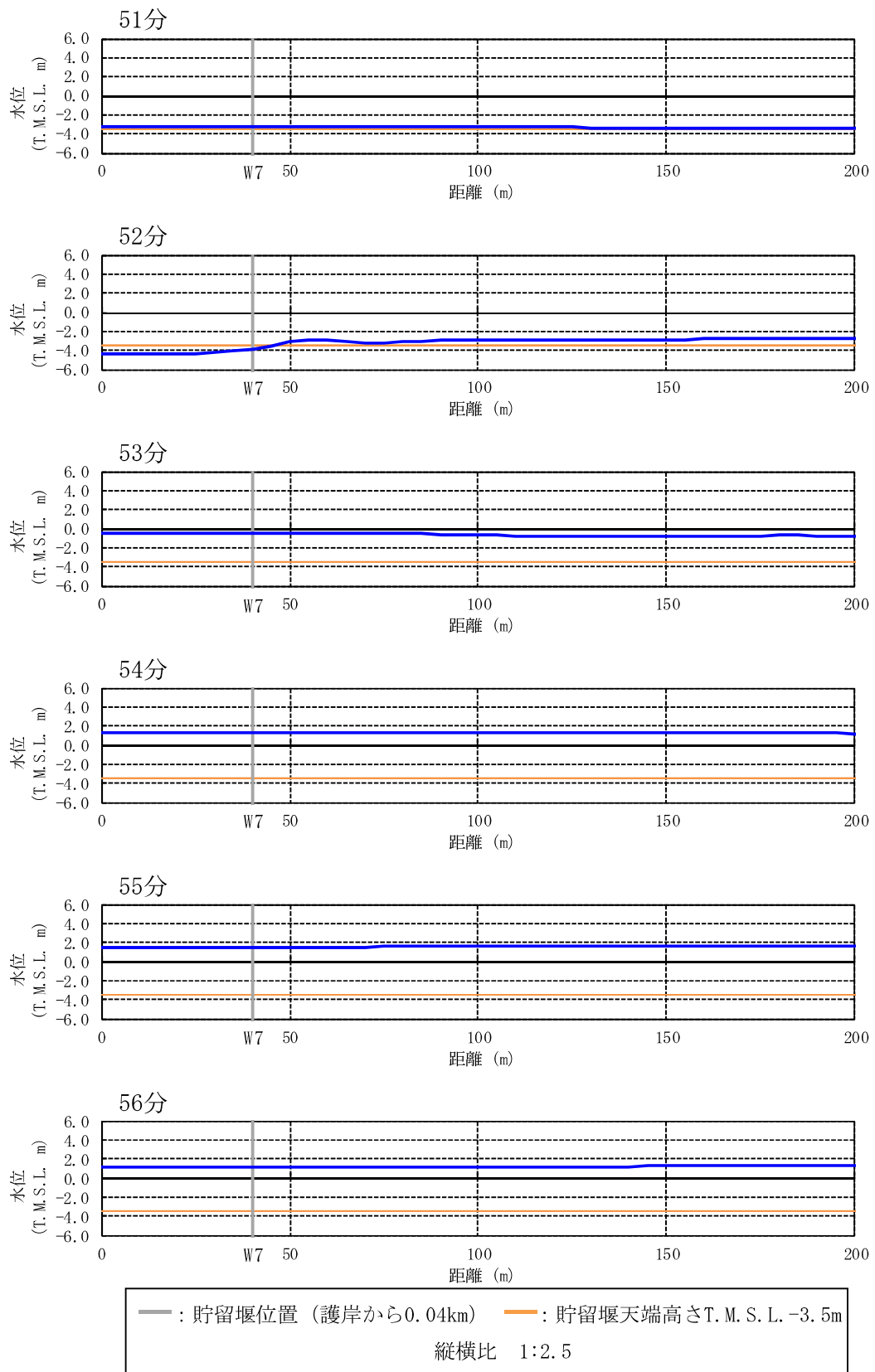


図 4.7 参 1-42 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分, 0-200m を拡大]

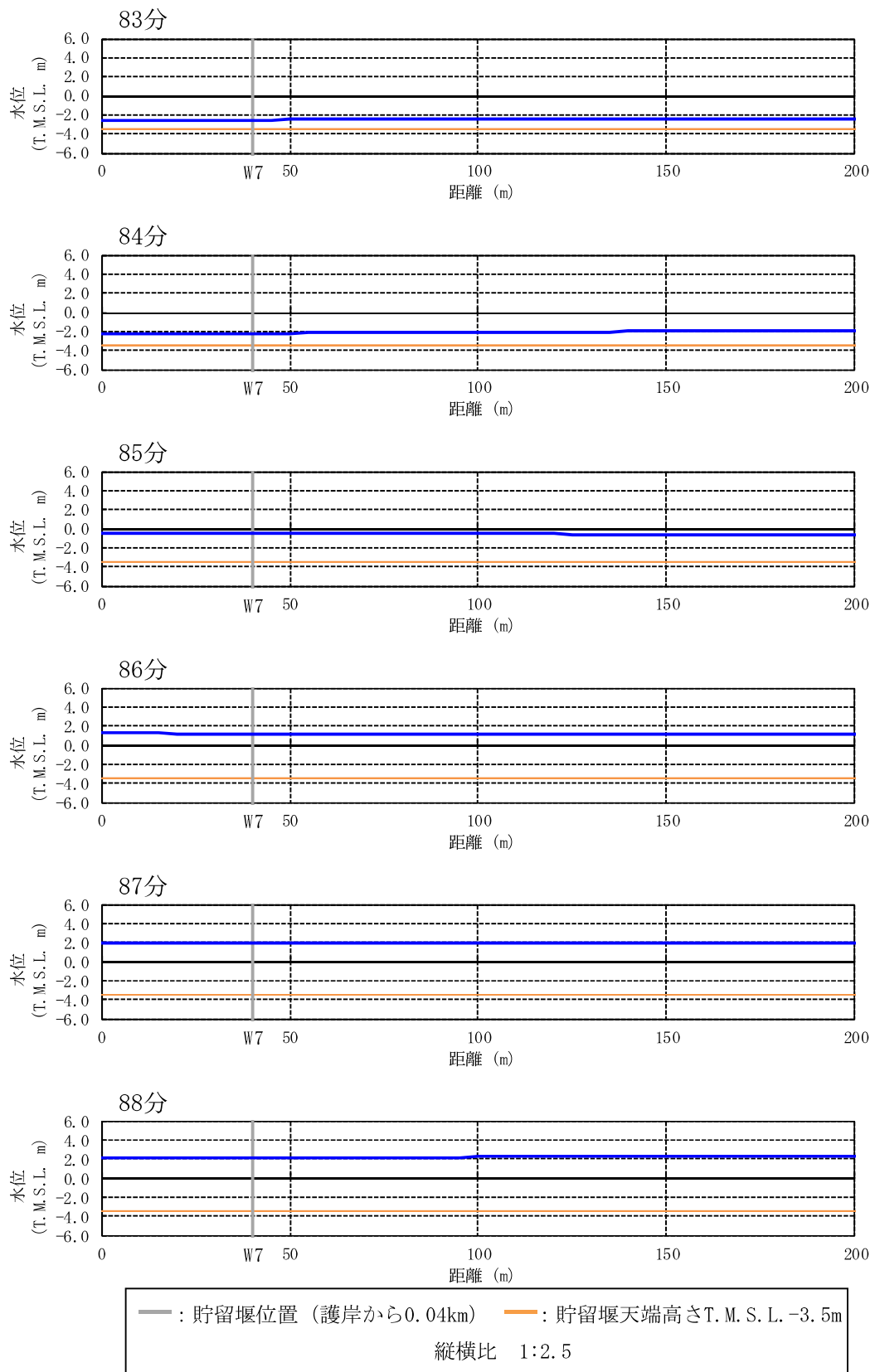


図 4.7 参 1-43 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [83-88 分, 0-200m を拡大]



## 2. 分裂波発生に関する検討まとめ

本参考資料では、柏崎刈羽原子力発電所の基準津波を対象として、ソリトン分裂および砕波の発生有無について検討を行った。検討方法の選定にあたり、当該地点の基準津波高さが水深に対して比較的大きいこと、敷地前面の海底勾配が比較的小さく局所的には1/100を下回る領域もあることから、ソリトン分裂の発生の可能性を完全に否定しきれないとして、数値計算による詳細な評価を実施した。

数値計算は、既往のソリトン分裂の実験に対する再現性が高く、かつ、押波と引波が複数回繰り返される当該地点の津波特性に対しても適用性が高いことを検証した1次元モデル（解析コードBSNSQ）を用いた。

解析の結果、津波の水位時刻歴波形及び空間分布にソリトン分裂現象と考えられる挙動は認められなかった。また、津波の水面勾配も既往の文献で提言されている砕波発生限界 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ に対して最大でも $2.57^{\circ}$ と十分に小さいことが確認できた。

以上より柏崎刈羽原子力発電所の敷地前面では、津波のソリトン分裂および砕波は発生しないことが確認できた。

3. 参考文献

- 1) 「津波の辞典」朝倉書店，2007年11月

## 各解析コードの適用性検証

## 1. 概要

ソリトン分裂の発生の有無を確認するにあたっては、1次元モデルや断面2次元モデルを用いた数値計算による検討が有効である。しかし、1次元モデルや断面2次元モデルを用いた数値計算の各解析コードの適用性は、敷地前面の海底地形や来襲する津波の特性などの条件によって異なる。そこで本参考資料では、各解析コードの柏崎刈羽原子力発電所に対する適用性を検証し、ソリトン分裂および砕波の発生有無の評価に用いる解析コードを選定する。なお、本検証では適用実績を考慮し、1次元モデルに基づいた解析コード「BSNSQ」および断面2次元モデルに基づいた解析コード「OpenFOAM」と「CADMAS-SURF 2D」を対象とした。

## 2. 解析手法と解析コードの特徴の整理

ここでは、ソリトン分裂の検討への適用実績がある解析コードについて、実験の再現解析や、柏崎刈羽原子力発電所における津波シミュレーションによって、各解析コードのソリトン分裂および砕波の発生有無の検討に対する適用性を検討する。対象とする解析コードは1次元モデルに基づいた解析コード「BSNSQ」および断面2次元モデルに基づいた解析コード「OpenFOAM」と「CADMAS-SURF 2D」とする。各解析コードの比較を表4.7参2-2-1に示す。

1次元解析で用いる地形モデルは、護岸からの水平距離と海底標高に基づきモデル化されたものであり、断面2次元解析で用いられる地形モデルと同じである。

したがって、1次元解析は、断面2次元解析と同じ地形モデルを用いた上で、流速の水深方向の分布を一様に取り扱う解析手法である。1次元解析の解析コード「BSNSQ」の基礎方程式等の詳細は、参考資料4に示す。

表4.7参2-2-1 各解析コードの比較

解析コード	解析モデル	解析コードの特徴	適用実績
BSNSQ	1次元	非線型分散波理論に基づく解析コードである。非線型分散波理論に基づく1次元津波解析は津波水位を入力条件として、水位と線流量を計算することで津波挙動が計算可能である。なお、本解析コードではPeregrine(1967) <sup>1)</sup> の分散項により波の分裂が考慮され、佐藤(1995) <sup>2)</sup> の砕波減衰項を考慮することで、砕波を表現可能となる。	検証実績を示す文献が豊富(参考資料3)
OpenFOAM	断面2次元	水と空気の不飽和流体の非圧縮性の二相流を対象とした解析コード(interFoamソ	間瀬ら(2015) <sup>3)</sup> では、実験の再現

		<p>ルバ)であり，非圧縮性流体の連続式およびナビエ・ストークス方程式を基礎方程式として，津波水位を入力し，流速と圧力を計算することで，津波挙動が計算可能である。</p> <p>また，水位はVOF法を使用し，気液海面から計算される。解析用地形は非構造格子でモデル化する。</p>	<p>計算により，ソリトン分裂をよく再現できることが示されている。</p>
CADMAS-SURF 2D	断面 2次元	<p>2次元非圧縮流体のナビエ・ストークス方程式と連続式を基礎方程式とした解析コードであり，津波水位と流速を入力条件として，流速と圧力を計算することで津波挙動が計算可能である。</p> <p>また，水位は自由表面解析モデルにVOF法を使用して計算する。解析用地形は構造格子でモデル化し，ポーラスモデルを用いて形状近似精度を高めている。</p>	<p>他サイトでのソリトン分裂に関する検討に適用された実績あり</p>

### 3. 既往実験の再現解析による検証

各解析コードについてソリトン分裂および砕波の発生有無の検討への適用性を検証するため、「原子力発電所の津波評価技術 2016（土木学会原子力土木委員会 津波評価小委員会，平成 28 年 9 月）<sup>4)</sup>」に記載されている松山ら(2005)<sup>5)</sup>の水理模型実験の再現解析を実施する。

#### 3.1 既往実験の概要

松山ら(2005)<sup>5)</sup>は、津波のソリトン分裂現象と砕波限界を把握するため、図 4.7 参 2-3-1 に示す水路を用いた実験を実施した。実験は地形勾配 1/200，造波周期 20 秒，片振幅 0.03m の条件である。実験結果を図 4.7 参 2-3-2 に示す。ソリトン分裂については、第一波押波の先端及び、その後の引波端部に発生している。

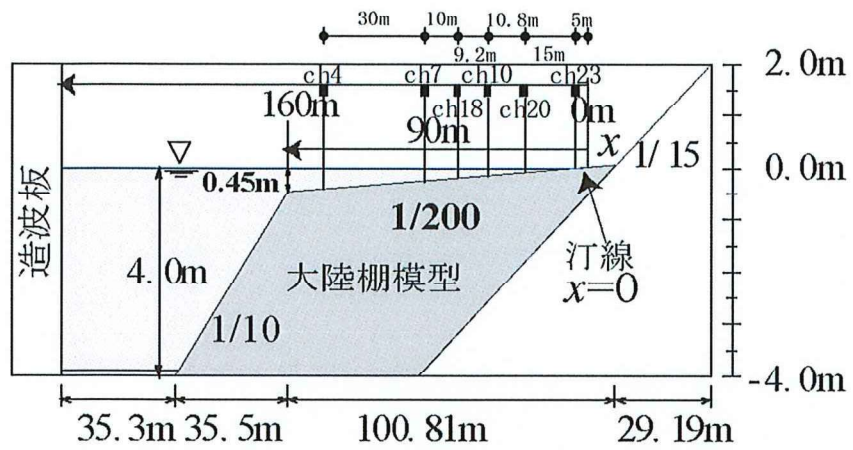


図 4.7 参 2-3-1 実験水路の概要 (松山ら (2005)<sup>5)</sup> に加筆)

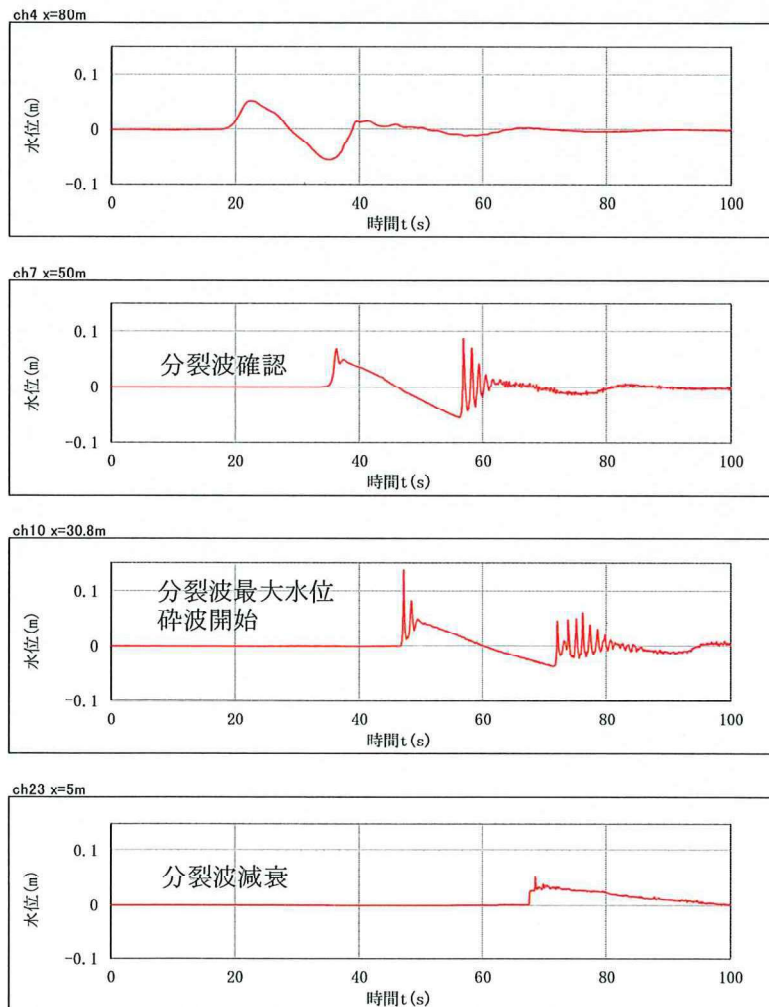


図 4.7 参 2-3-2 実験結果

### 3.2 解析コード「BSNSQ」の適用性検証

#### (1) 再現解析条件

1次元モデルでは海底地形は、実験水路と同じ1/200勾配とし、沖合（ $x=80\text{m}$ ）から護岸（ $x=-40\text{m}$ ）までを計算領域とした。地形モデルを図4.7参2-3-3に示す。沖側の境界条件（ $x=80\text{m}$ ）については、入射波条件として実験で計測された水位変動を入力した。解析条件を表4.7参2-3-2に示す。

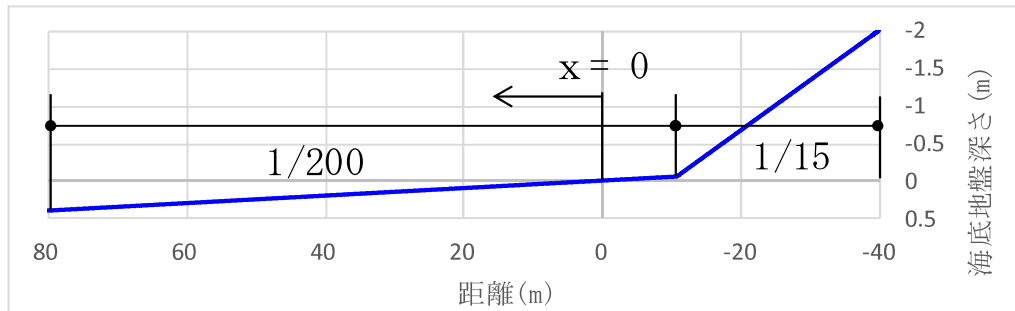


図 4.7 参 2-3-3 1次元再現解析用地形モデル

表 4.7 参 2-3-2 1次元再現解析条件

モデル化	沖合 80m ( $x=80\text{m}$ )～護岸 ( $x=-40\text{m}$ ) 海底勾配：1/200 ( $x=-10.81\text{m}\sim 80\text{m}$ ) 1/15 ( $x=-10.81\text{m}\sim -40\text{m}$ )
計算時間間隔	0.01 秒
計算格子幅	0.025m
境界条件	護岸で完全反射
摩擦係数	マンニングの粗度係数 ( $n=0.025\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ )
水平渦動粘性係数	砕波前： $\nu_e=0.01\text{ (m}^2/\text{s)}$ 砕波後： $\nu_e=\alpha\cdot\sqrt{g\cdot h_{\text{bmax}}}\cdot h_{\text{bmax}}$

(2) 再現解析結果

B SNS Qによる数値計算と実験の比較を図 4.7 参 2-3-4 に示す。計算結果では、実験でソリトン分裂が発生した第一波押波の先端およびその後の引波端部でソリトン分裂が発生する様子が良好に再現できており、ソリトン分裂および砕波の発生有無の検討に対する適用性が確認できた。

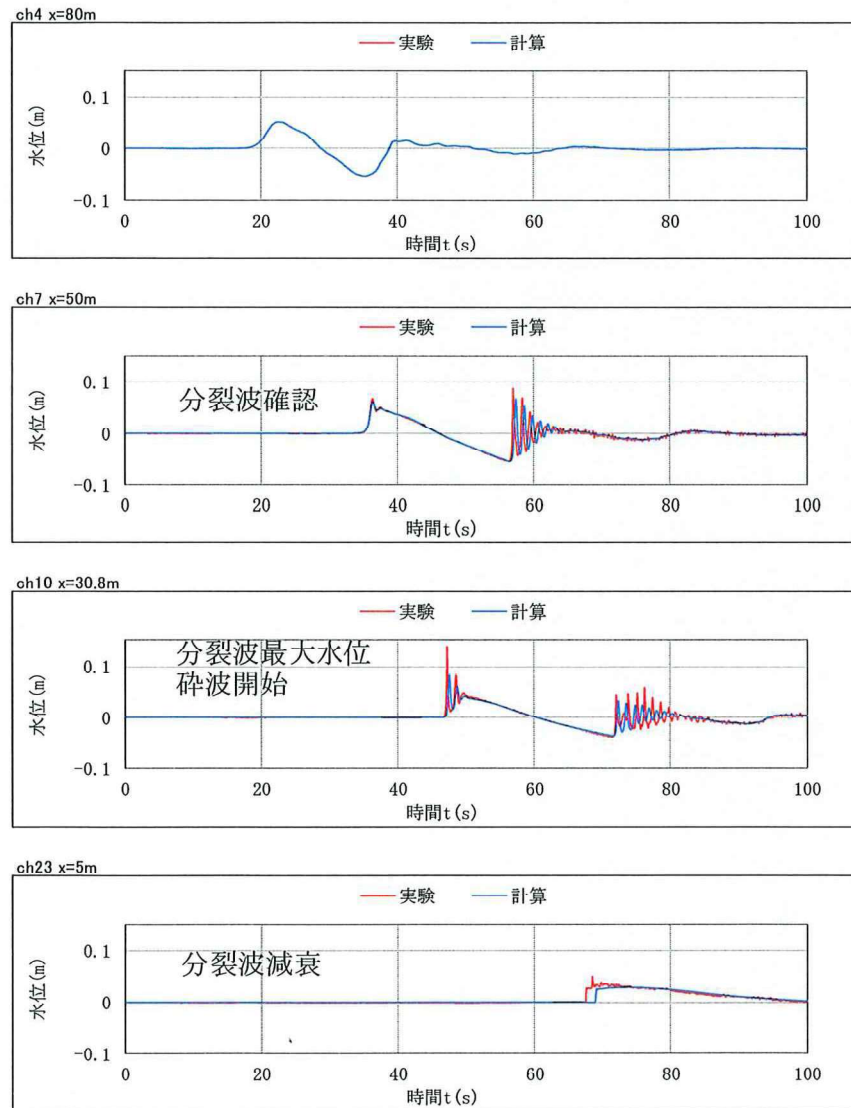


図 4.7 参 2-3-4 1次元解析結果と実験の比較



### 3.3 解析コード「OpenFOAM」の適用性検証

#### (1) 再現解析条件

断面2次元モデルでは海底地形は、実験水路と同じ1/200勾配とし、沖合（ $x=80\text{m}$ ）から護岸（ $x=-40\text{m}$ ）までを計算領域とした。地形モデルを図4.7参2-3-5に示す。沖側の境界条件（ $x=80\text{m}$ ）については、入射波条件として実験で計測された水位変動を入力した。解析条件を表4.7参2-3-3に示す。

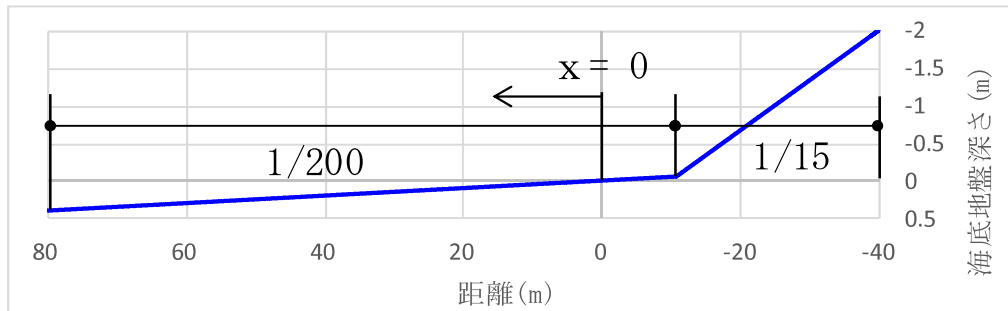


図 4.7 参 2-3-5 断面 2 次元再現解析用地形モデル

表 4.7 参 2-3-3 断面 2 次元再現解析条件

使用ソフトウェア	OpenFOAM ver. 6
ソルバー	interFoam
計算時間間隔	自動設定（最大クラン数:0.5）
メッシュ間隔	$\Delta x=0.025\text{m}$ , $\Delta z=0.0125\text{m}$
乱流モデル	kOmegaSST
底面の境界条件	ノンスリップ

(2) 再現解析結果

OpenFOAMによる数値計算と実験の比較を図4.7参2-3-6に示す。計算結果では、実験でソリトン分裂が発生した第一波押波の先端およびその後の引波端部でソリトン分裂が発生する様子が良好に再現できており、ソリトン分裂および碎波の発生有無の検討に対する適用性が確認できた。

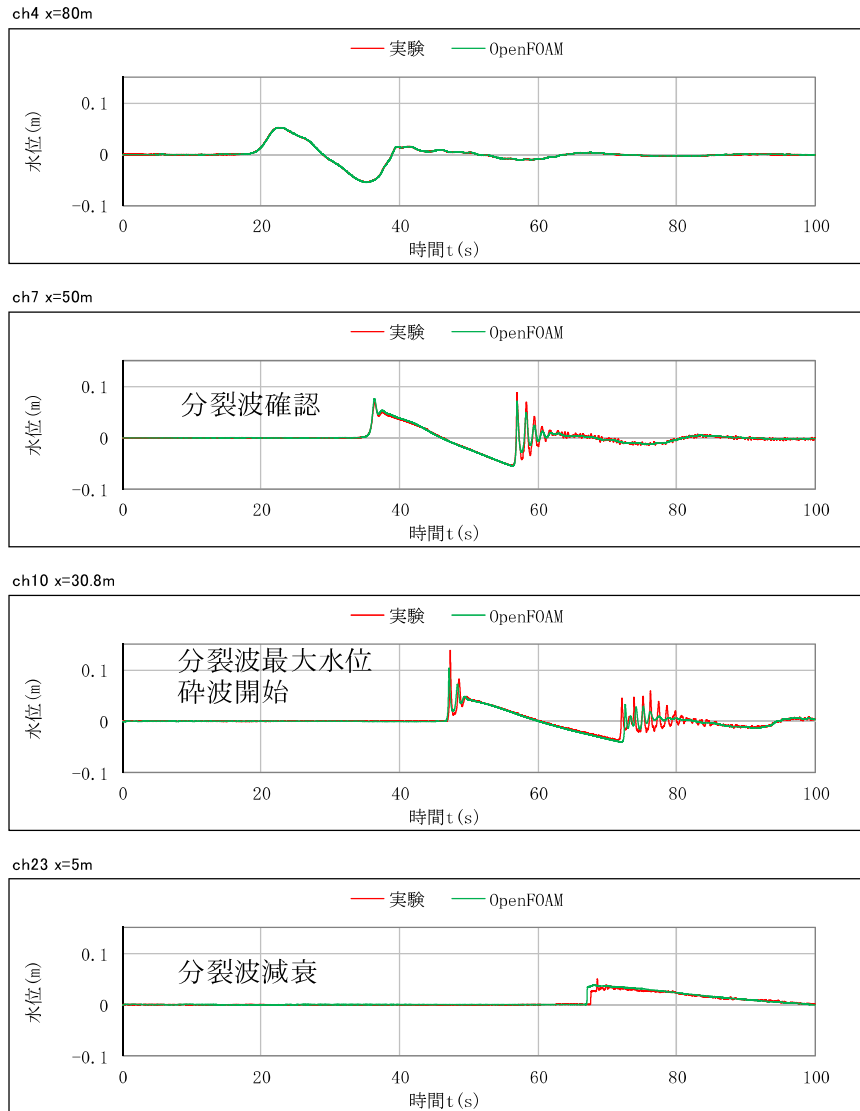


図 4.7 参 2-3-6 断面 2 次元解析結果と実験の比較

### 3.4 解析コード「CADMAS-SURF 2D」の適用性検討

断面2次元モデルに基づいた解析コード「CADMAS-SURF 2D」では、入力として津波水位と流速を考慮することが必要である。しかしながら対象とした松山ら(2005)<sup>5)</sup>の実験では、流速を計測していないため再現解析は実施できない。したがって、次の「4. 実規模地形を対象とした検証」において、柏崎刈羽原子力発電所の数値計算を実施し、他の解析コードの結果と合わせて検討することとした。

#### 4. 実規模地形を対象とした検証

前章では、既往実験の再現解析によって、各解析コードのソリトン分裂および砕波の発生有無の検討に対する適用性を確認した。本項では、柏崎刈羽原子力発電所の基準津波の数値計算によってソリトン分裂および砕波の発生有無の検討に対する適用性を検討する。

##### 4.1 各解析コードの計算結果比較

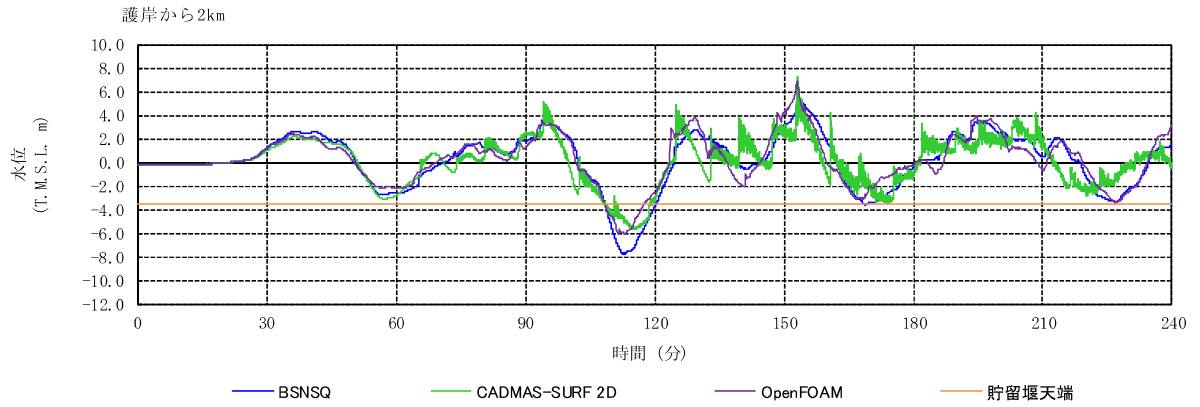
柏崎刈羽原子力発電所の海底地形で1次元モデルおよび断面2次元モデルによる津波水位解析を実施する。各解析コードの解析条件を表4.7参2-4-1、解析結果の比較を図4.7参2-4-1に示す。なお、地形モデルは全て添付資料1図4.7添1-3.5-1にて示した断面地形モデルの基準津波策定位置から護岸までの範囲を用いる。また、当該サイトの基準津波の特徴として、押波と引波が複数回繰り返す傾向があり、引波により露出した海水貯留堰に対する押波の形状の評価についての適用性も検討する必要があるため、水位低下が大きい基準津波2を対象とする。

図4.7参2-4-1より、BSNSQとOpenFOAMの解析結果は概ね同じ傾向を示しているが、CADMAS-SURF 2Dの解析結果は2波目以降で他手法とは異なる傾向を示している。

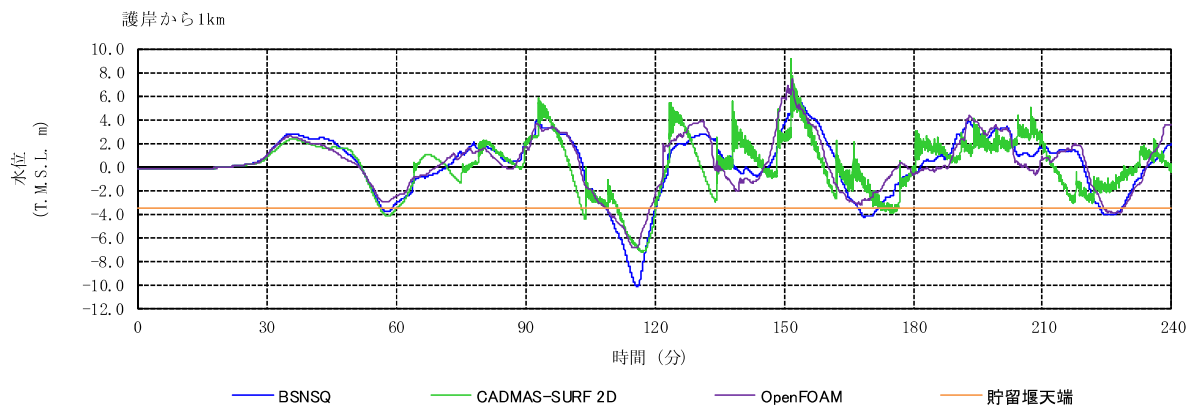
表 4.7 参 2-4-1 解析条件の比較

	BSNSQ	OpenFOAM	CADMAS-SURF 2D
入力波形	基準津波 2	基準津波 2	基準津波 2
初期潮位	T. M. S. L. -0.12m*	T. M. S. L. -0.12m*	T. M. S. L. -0.12m*
計算時間間隔	0.05 秒	自動設定	自動設定
計算時間	4 時間	4 時間	4 時間
計算格子間隔	5m	$\Delta x=10m, \Delta z=5m$	$\Delta x=2.5m, \Delta z=0.5m$

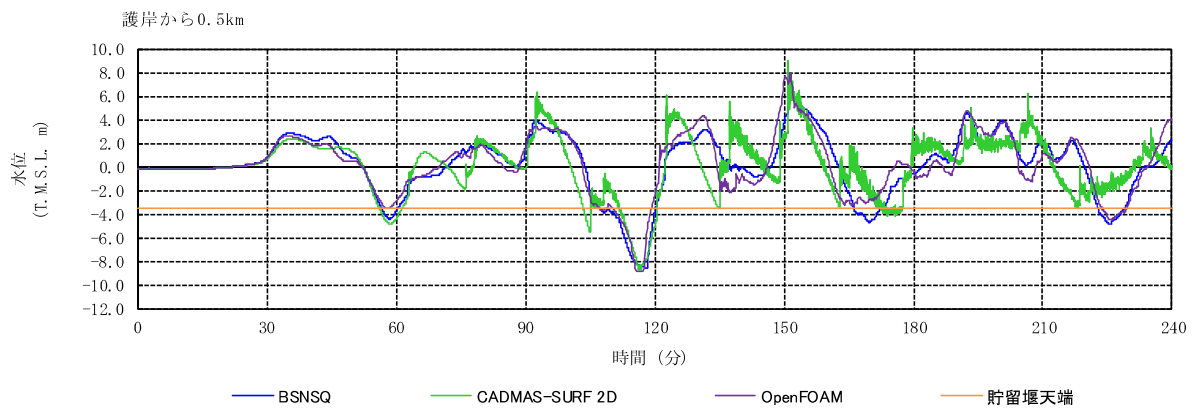
注記\* : 5 条まとめ資料と同様に潮位のばらつきを考慮



護岸から 2.0km 地点



護岸から 1.0km 地点



護岸から 0.5km 地点

図 4.7 参 2-4-1 各解析コードによる解析結果の水位時刻歴波形の比較

## 4.2 解析コード「CADMAS-SURF 2D」の解析結果

4.1「各解析コードの計算結果比較」の図4.7参2-4-1のように、解析コード「CADMAS-SURF 2D」の解析で得られた津波波形は、他の2つの解析手法で得られた津波波形とやや異なる傾向を示している。その原因の一つとして、海底地形モデル化方法の違いが考えられる。海底を斜面として考慮できるBSNSQやOpenFOAMと異なり、CADMAS-SURF 2Dでは直交格子によるモデル化を行うため、海底勾配を階段状にモデル化する必要がある。このようなモデル化を行った場合、引波により水位が低下したときに海底地形のモデル化の影響が海面の津波波形に現れることがあり、後続波に対してもその影響が残ってしまう可能性が考えられる。図4.7参2-4-2は引波の流速ベクトルの空間分布を示しているが、水深が浅くなった時に階段状の海底で流れが乱れる傾向が現れており、これは実現象と異なるものと考えられる。また、CADMAS-SURF 2Dでは沖側の境界（モデル端部）条件が完全反射となるため、結果として護岸で発生した反射波が護岸と入力境界で反射を繰り返すこととなり、後続波の評価に影響を与える。

以上のことから、複数の断層が連動することにより、押波と引波が複数回にわたって繰り返される柏崎刈羽原子力発電所の基準津波の特性に対しては、特に海底地形のモデル化には留意が必要であり、本解析コードの適用性についても十分な検証がなされていない。

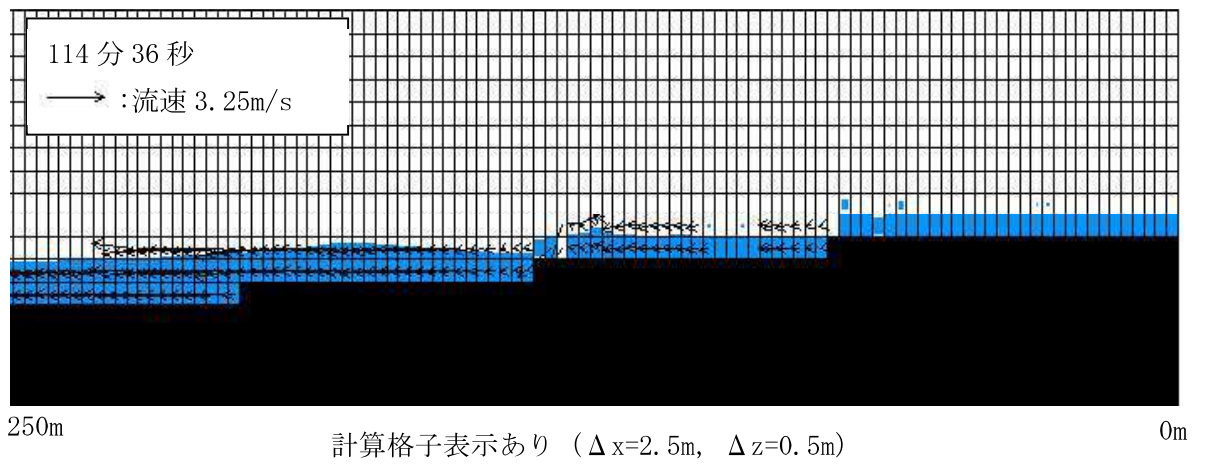
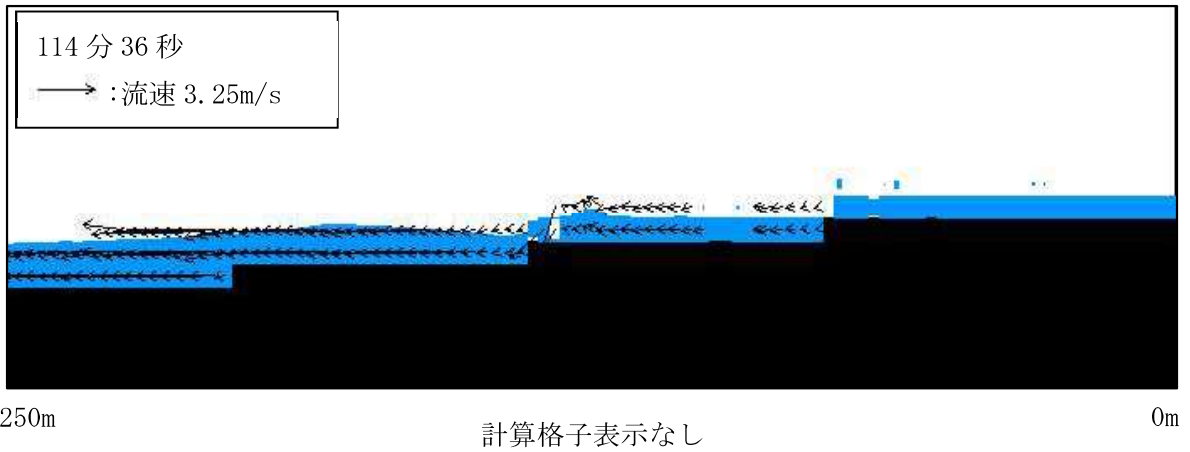


図 4.7 参 2-4-2 CADMAS-SURF 2Dによる解析結果の空間分布  
 (引波時の護岸付近を拡大, 縦横比 1:10)

#### 4.3 解析コード「BSNSQ」と「OpenFOAM」の比較

4.1「各解析コードの計算結果比較」では、BSNSQとOpenFOAMの解析で得られた津波波形が概ね同じ傾向となることを示した。そのため、柏崎刈羽原子力発電所におけるソリトン分裂および砕波の発生有無の検討に対してはいずれの手法でも適用可能と考えられる。

両手法の条件を比較すると、OpenFOAMはCADMAS-SURF 2Dと同様に沖側の境界（モデル端部）条件が完全反射となるため、結果として護岸で発生した反射波が護岸と入力境界で反射を繰り返すこととなり、後続波の評価に影響を与える。一方で、BSNSQは沖側の境界で反射波を減衰させるため、反射を繰り返す現象を抑えることができる。したがって、後続波の評価が必要な柏崎刈羽原子力発電所の検討においてはBSNSQの適用性が高いと判断する。



## 5. 解析コードの選定

「3. 既往実験の再現解析による検証」では、1次元モデルに基づいた解析コード「BSNSQ」、断面2次元モデルに基づいた解析コード「OpenFOAM」と「CADMAS-SURF 2D」を対象とし、実験の再現解析によってソリトン分裂および砕波の発生有無の検討への適用性を検討した。

「4. 実規模地形を対象とした検証」では、柏崎刈羽原子力発電所の海底地形の断面モデルで1次元解析および断面2次元解析を実施し、当該サイトにおけるソリトン分裂および砕波の発生有無の検討に対する適用性を検討した。

CADMAS-SURF 2Dは、直交格子によるモデル化を行うため海底地形を階段状にモデル化することとなり、引波により水位が大きく低下する場合など、海底地形のモデル化の影響によって分裂波のような短周期の波が発生する。そしてその短周期の波が沖側の境界で反射するため、後続波の評価に影響を与えることとなる。当該サイトの検討津波は大きく水位が低下する引波が発生することから、CADMAS-SURF 2Dを適用することが難しい。

BSNSQとOpenFOAMによる解析結果は波形が概ね同じ傾向を示しており、1次元モデルと断面2次元モデルでは同等の精度で検討が可能である。両手法の条件を比較すると、沖側の境界で反射波を減衰できる点で、後続波の評価が必要な柏崎刈羽原子力発電所の検討においてはBSNSQの適用性が高い。

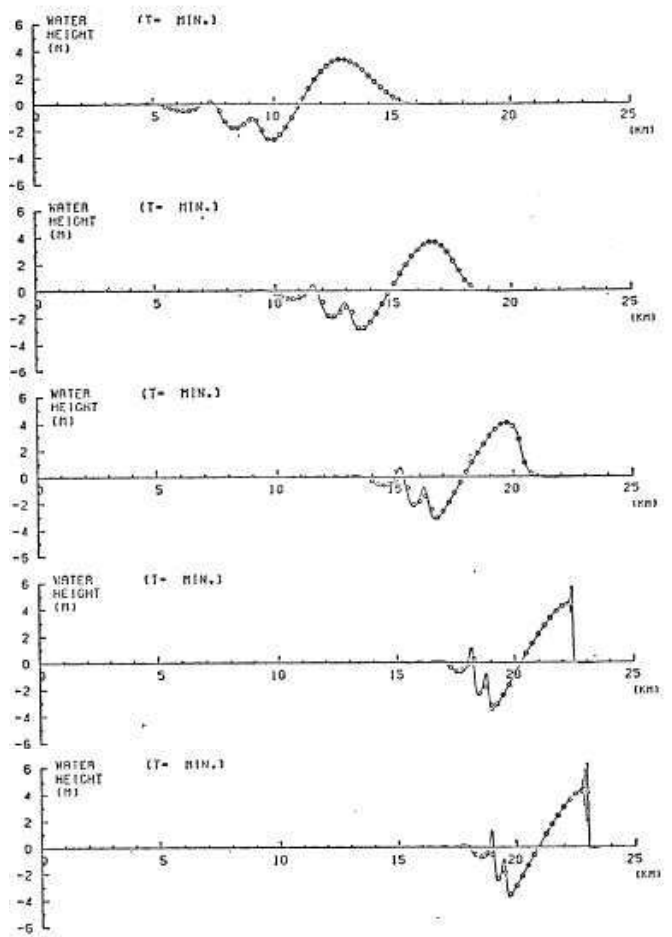
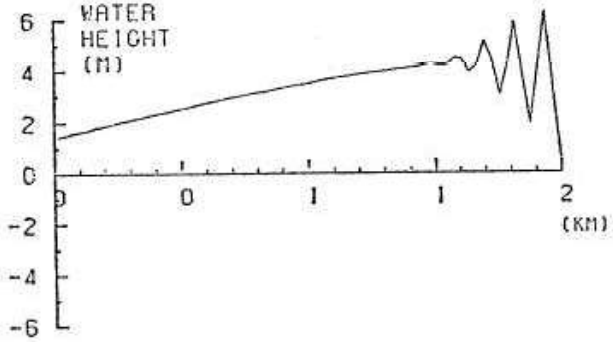
加えて、1次元解析は検証実績が豊富であることも踏まえ、柏崎刈羽原子力発電所においては解析コード「BSNSQ」による1次元解析の適用性が高いと判断した。なお、1次元解析によるソリトン分裂の発生の可能性について検討した実績を参考資料3に示す。

## 6. 参考文献

- 1) Peregrine, D.H : Long waves on a beach, Journal of the Fluid Mechanics, Vol.27, Part4, pp.815-827, 1967
- 2) 佐藤慎司：波の分裂と砕波を考慮した津波の数値計算, 海岸工学論文集 第42巻, pp.376-380, 1995
- 3) 間瀬肇・Jun ZANG・安田誠宏・Feng GAO・Lifen CHEN：浅瀬を伝播する津波のソリトン分裂に関する OpenFOAM による再現性の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.71 No.1, PP52-57, 2015
- 4) 「原子力発電所の津波評価技術 2016」土木学会原子力土木委員会 津波評価小委員会, 2016年9月
- 5) 松山昌史・池野正明・榊山勉・柳沢賢・藤井直樹：大陸棚上におけるソリトン分裂した津波の砕波に関する無ひずみ模型実験, 海岸工学論文集 第52巻, pp.241-245, 2005

## 1次元解析によるソリトン分裂に関する検討実績

## 1. 1次元解析によるソリトン分裂に関する検討実績

著者	概要	計算結果
後藤 (1984) <sup>1)</sup>	<p>非線型分散波理論を用いた1次元伝播計算を行い、浅水理論による計算結果との比較を行うことで、浅水理論の適用限界を検討した。なお、計算は北秋田海岸を含む約 270km × 200km の領域を対象とした浅水理論を用いた2次元伝播計算の結果から、最大波峰の伝播経路を1次元水路と見なして計算している。結論として、水深 30 m 程度までは浅水理論で十分であること、30m以浅は 10 m 以下の空間格子を用いた非線型分散理論を使う必要があるとしている。</p>	 <p>図-7 Peregrine の式を用いた計算結果</p>  <p>図-8</p>

久保田ら  
(1986)<sup>2)</sup>

非線形分散波理論の方程式に基づく断面1次元数値解析手法を用いてパラメータスタディを実施し、ソリトン分裂の発生条件の整理を行った。

また、その結果を利用して対象地点に來襲する津波の先端にソリトン分裂が発生するか否かの推定例を示した。

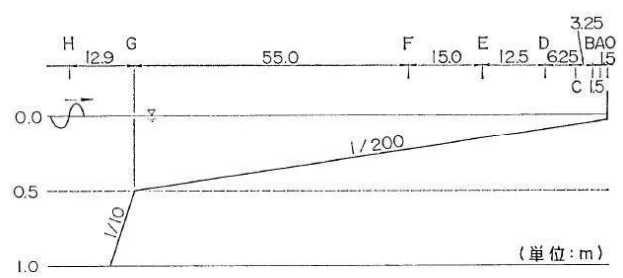


図-2 解析モデル

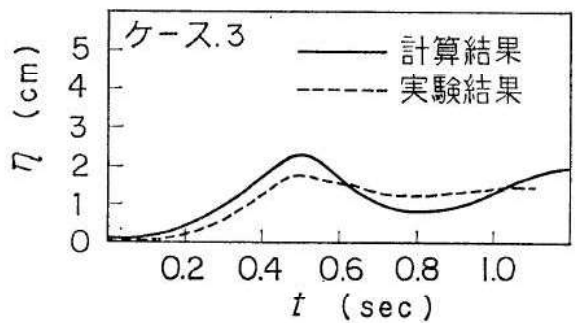
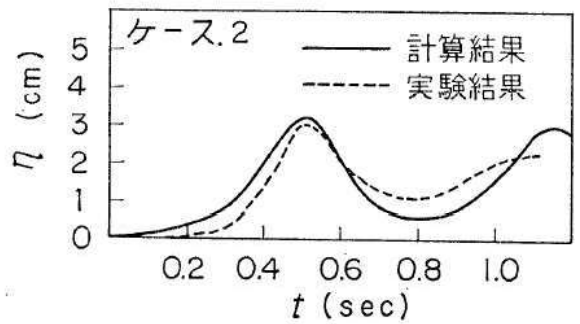
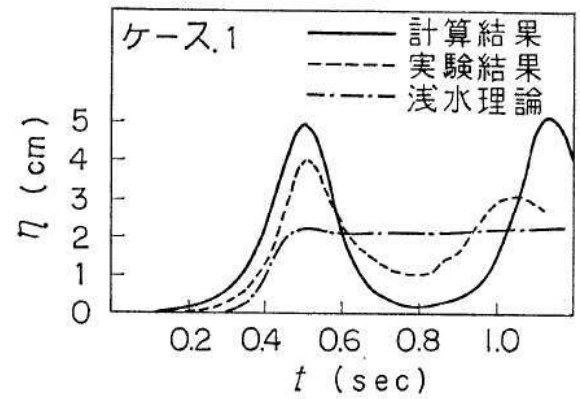


図-5 ソリトン波形の比較 (測定点C)

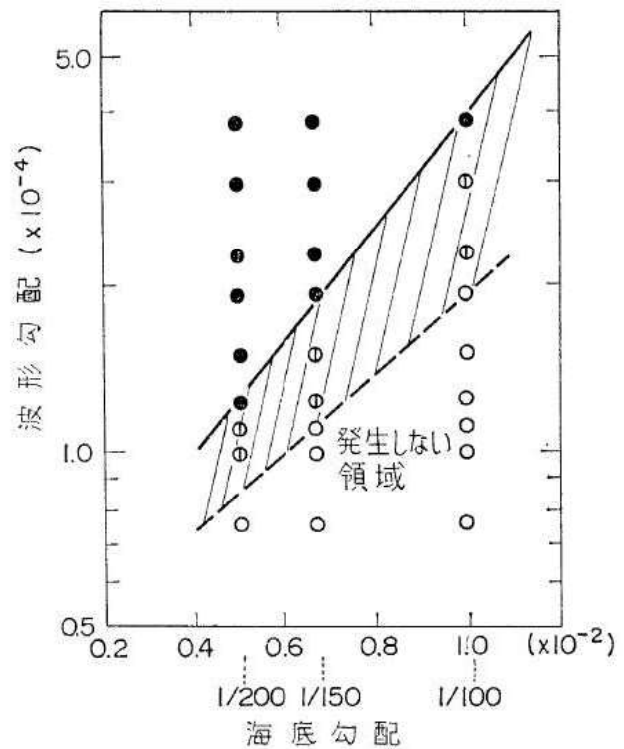


図-8 ソリトン分裂の発生条件の結果整理図

大森ら  
(2000)<sup>3)</sup>

直立護岸を越流し  
遡上する津波を対象として、水位および流速の計算精度を向上させることを目的に、水理模型実験結果の再現計算を行った。  
結果として、直立護岸における遡上現象に対し、越流式として本間の方法を適用することにより、非分裂波および海域で分裂、砕波を伴うような波の遡上を再現している。

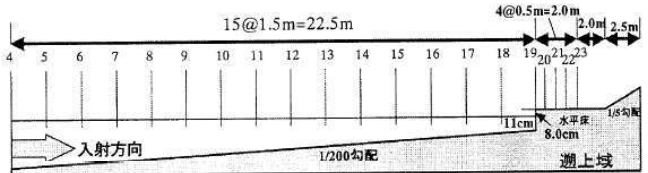
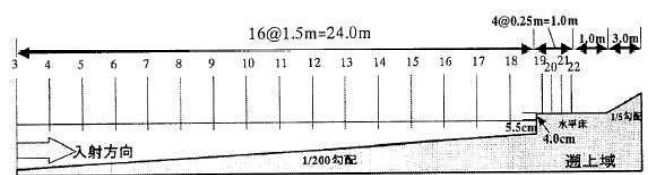
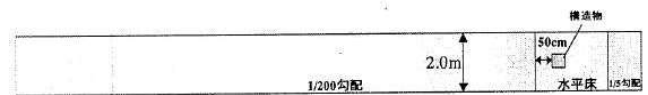


図-1 中型水路断面図と計測点



(1) 断面図



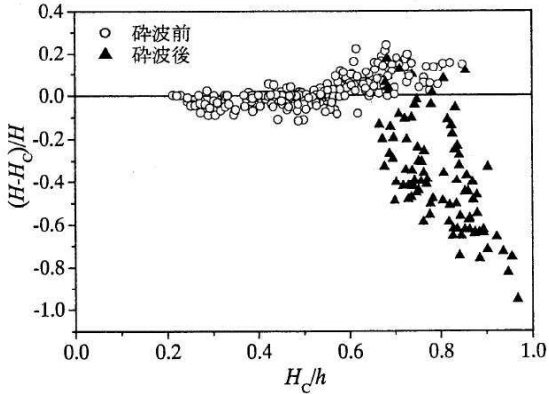
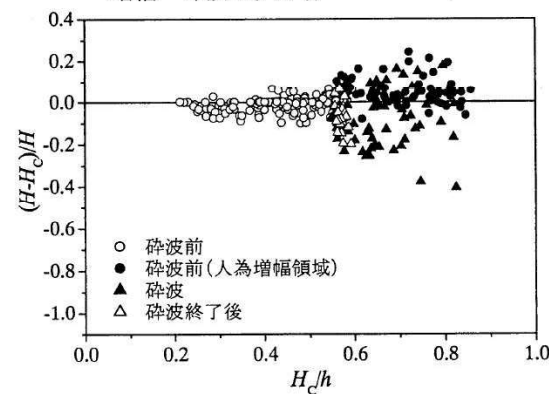
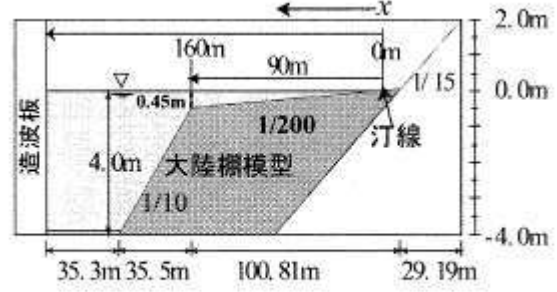
(2) 平面図

図-2 大型水路断面・平面図と計測点

表-1 実験ケース

ケース	実験水路	波の種類	波高	周期
1-A	中型	非分裂波	15 cm	63 s
1-B	中型	分裂波	20 cm	63 s
2-A	大型	非分裂波	4.5 cm	60 s
2-B	大型	分裂波	4.5 cm	30 s

		<p>水時刻歴波形 (ケース 1-B)</p> <p>水時刻歴波形 (ケース 2-B)</p>
<p>岩瀬ら (2001)<sup>4)</sup></p>	<p>水理実験と1次元数値計算結果を比較し、水平床を伝播するソリトン分裂波を対象とした碎波条件を明らかにした。</p> <p>結論として、人為増幅モデルおよび碎波減衰モデルを考慮した計算結果は、考慮しない計算結果に対し、20%の計算精度内でソリトン分裂から増幅、碎波に至る一連の変</p>	<p>Wave Generator</p> <p>図-1 実験装置</p> <p>図-9 水理実験と数値計算の比較</p>

	<p>形を再現することが可能であるとしている。</p>	<p>増幅・碎波モデル無</p>  <p>増幅・碎波モデル有</p>  <p>波高水深比に伴う水位誤差</p>
<p>松山ら (2006)<sup>5)</sup></p>	<p>大陸棚を模擬した大型造波水路を用いた水理実験と1次元数値計算結果を比較し、非線形分散波理論に基づく数値計算モデルの改良を行った。</p> <p>結論として、碎波水深と碎波波高を10%程度の誤差の範囲で推定することができるとした。</p>	 <p>図-1 実験水路の概要 (地形勾配 1/200)</p>

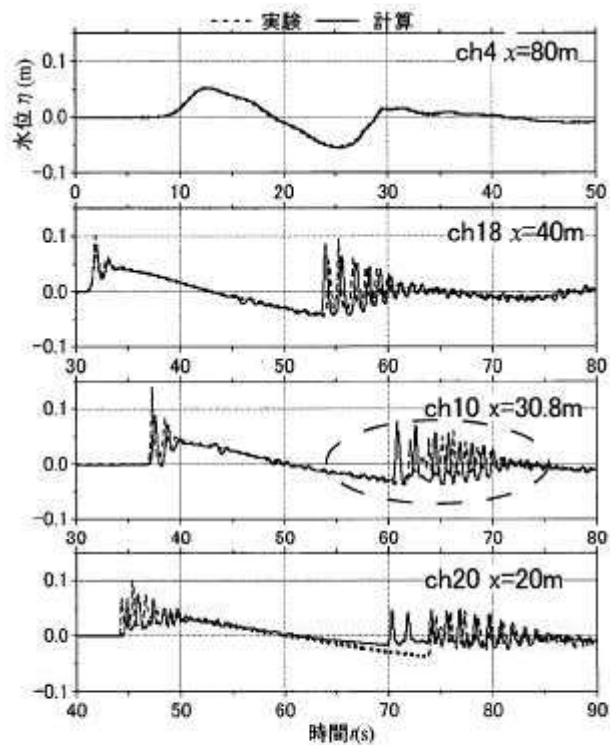


図-3 従来の数値計算モデルによる  
数値計算と実験の比較 (No.024)



## 2. 参考文献

- 1) 後藤智明：北秋田海岸における日本海中部地震津波の計算に関する検討，第31回海岸工学論文集，pp. 233-236，1984
- 2) 久保田博・大橋良弘・高本全徳：断面1次元数値解析手法によるソリトン分裂の発生条件の検討，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 66-70，1986
- 3) 大森政則・藤井直樹・京谷修・高尾誠・金戸俊道・池谷毅：直立護岸を越流した津波の水位・流速および波力の数値計算，海岸工学論文集 第47巻，pp. 376-380，2000
- 4) 岩瀬浩之・深澤雅人・後藤智明：ソリトン分裂波の砕波変形に関する水理実験と数値計算，海岸工学論文集 第48巻，pp. 306-310，2001
- 5) 松山昌史・池野正明・榊山勉・武田智吉：大陸棚上における津波のソリトン分裂波に関する砕波モデル，海岸工学論文集 第53巻，pp. 226-230，2006

## 1 次元津波水位解析に用いた解析コード「BSNSQ」の適用性について

## 1. 解析コードの概要

項目	コード名
	BSNSQ
使用目的	非線形分散波理論による 1 次元津波水位解析
開発機関	東電設計株式会社
開発時期	1998 年
使用したバージョン	Ver. 1.0
コードの概要	本解析コードは、東電設計株式会社によって開発された非線形分散波理論に基づく津波水位計算プログラムであり、ソリトン分裂波及び砕波が表現可能である。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>本解析コードは、海水貯留堰前面におけるソリトン分裂の発生を確認するための 1 次元津波水位解析に用いている。</p> <p><b>【検証 (Verification)】</b></p> <p>本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 既往文献<sup>1)</sup>では、ソリトン分裂を発生させた水理模型実験結果と本解析コードを用いた解析結果が良好な一致を示しており、非線形分散波理論による 1 次元津波水位解析がソリトン分裂を適切に評価できることを確認している。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <p>本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 検証の内容のとおり、非線形分散波理論による 1 次元津波水位解析への適用性を確認していることから、今回の解析に本解析コードを適用することは妥当である。</li> </ul>

## 2. 解析手法

### 2.1 概要

本解析コードは、非線形分散波理論に基づく津波水位計算プログラムであり、ソリトン分裂波及び砕波が表現可能である。今回の検討においては、柏崎刈羽原子力発電所の敷地前面の海底地形が広範囲に亘ってほぼ一定の勾配で沖合に向かって変化しているため、1次元のモデル化で代表的な断面を設定することが可能と判断し、1次元津波水位解析を適用した。

### 2.2 解析理論

解析理論を以下に示す。

#### (1) 基礎方程式

非線形分散波モデルを用いた基礎方程式は、以下の式で示される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M \cdot N}{D} \right) + g \cdot D \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ &= \frac{1}{3} \cdot h^2 \cdot \left( \frac{\partial^3 M}{\partial x^2 \cdot \partial t} + \frac{\partial^3 N}{\partial x \cdot \partial y \cdot \partial t} \right) \\ & \quad - \frac{g \cdot n^2}{D^{7/3}} \cdot M \cdot \sqrt{M^2 + N^2} + \nu_e \cdot \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M \cdot N}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + g \cdot D \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ &= \frac{1}{3} \cdot h^2 \cdot \left( \frac{\partial^3 M}{\partial x \cdot \partial y \cdot \partial t} + \frac{\partial^3 N}{\partial y^2 \cdot \partial t} \right) \\ & \quad - \frac{g \cdot n^2}{D^{7/3}} \cdot N \cdot \sqrt{M^2 + N^2} + \nu_e \cdot \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

ここに,

$t$  : 時間

$x, y$  : 平面座標

$\eta$  : 静水面から鉛直上方にとった水位変動量

$M$  :  $x$  方向の線流量

$N$  :  $y$  方向の線流量

$h$  : 静水深

$D$  : 全水深 ( $D=h+\eta$ )

$g$  : 重力加速度

$\nu_e$  : 渦動粘性係数

$n$  : マニングの粗度係数である。

上記 (2) (3) 式の右辺第一項は分散項, 右辺第三項は砕波減衰項である。

分散項は, 土木学会委員会報告<sup>2)</sup>にてソリトン分裂の検討に用いられた Peregrine (1967)<sup>3)</sup> モデルを使用している。砕波減衰項は佐藤 (1995)<sup>4)</sup> のモデルを使用しており, 渦動粘性係数は以下に示す。なお, 同文献では, 実験結果の再現計算が行われており, 分裂しながら砕波する非線形分散波列の伝播を精度良く計算できることが示されている。

渦動粘性係数を以下に示す。

$$\nu_e = \alpha \cdot \sqrt{g h_{\text{bmax}}} \cdot h_{\text{bmax}}$$

ここに,

$h_{\text{bmax}}$  : その時刻における最も深い砕波点の水深

$\alpha$  : 係数 (佐藤 (1995)<sup>4)</sup> を参考に  $\alpha=3$  とする)

### 2.3 解析フローチャート

解析フローチャートを図 4.7 参 4-1 に示す。

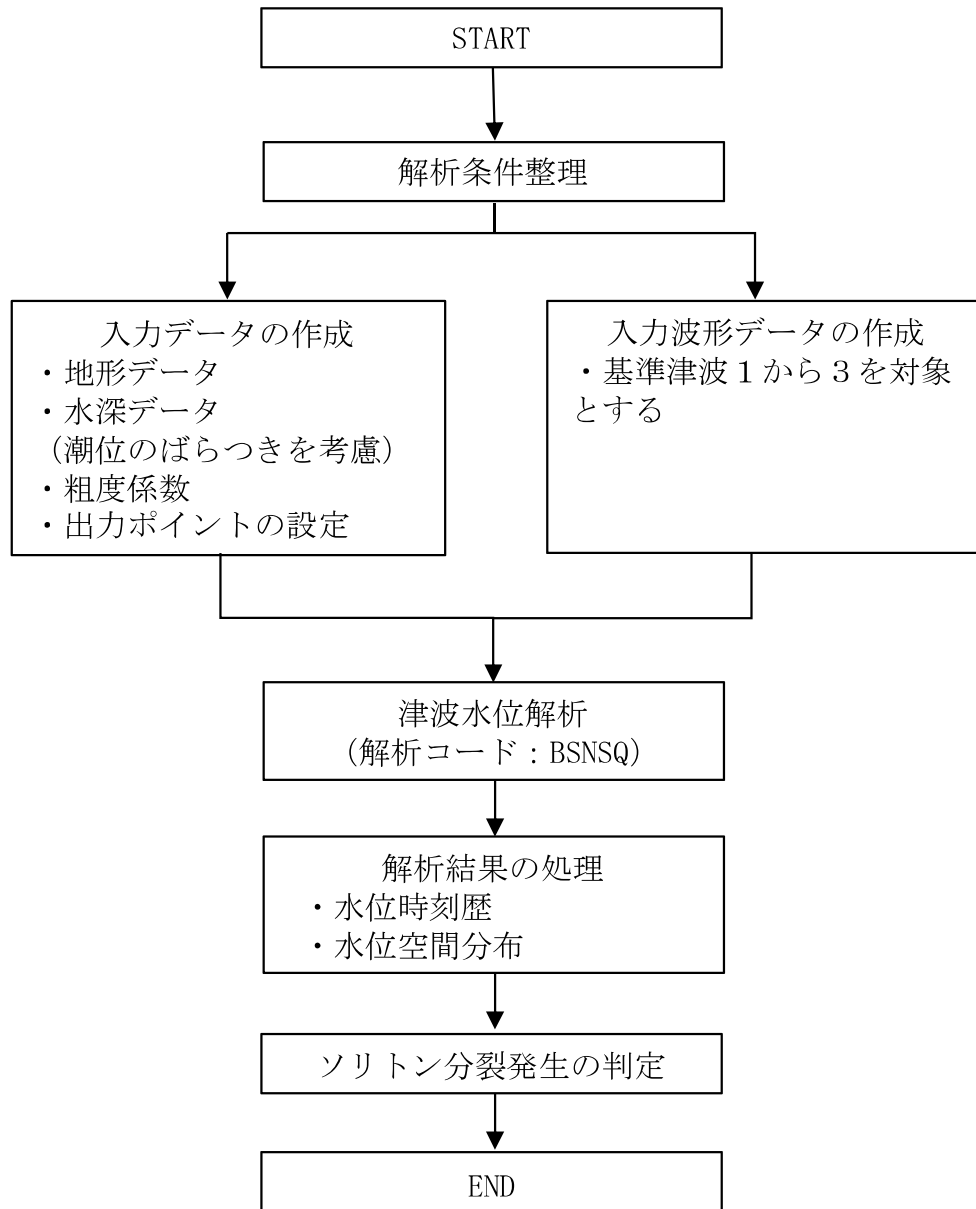


図 4.7 参 4-1 解析フローチャート

## 2.4 検証 (Verification) 及び妥当性確認 (Validation)

### (1) 文献による検証

本解析コードを適用するに当たり、水理模型実験の結果と解析結果との比較を行っている既往文献(大森ら(2000))<sup>1)</sup>によって、ソリトン分裂の発生検討に対する本解析コードの適用性を確認する。

計算の対象とした実験設備と計測点配置を図 4.7 参 4-2 および図 4.7 参 4-3 に示す。また、実験ケースを表 4.7 参 4-1 に示す。ケース 1-B, 2-B の模型実験において分裂波が確認されたため、その 2 ケースについて本解析コードを用いた再現計算が行われている。実験結果と解析結果の比較を図 4.7 参 4-4 および図 4.7 参 4-5 に示す。いずれのケースも実験結果を良好に再現しており、本解析コードは、今回の解析の目的に対し、適用性があることを確認した。

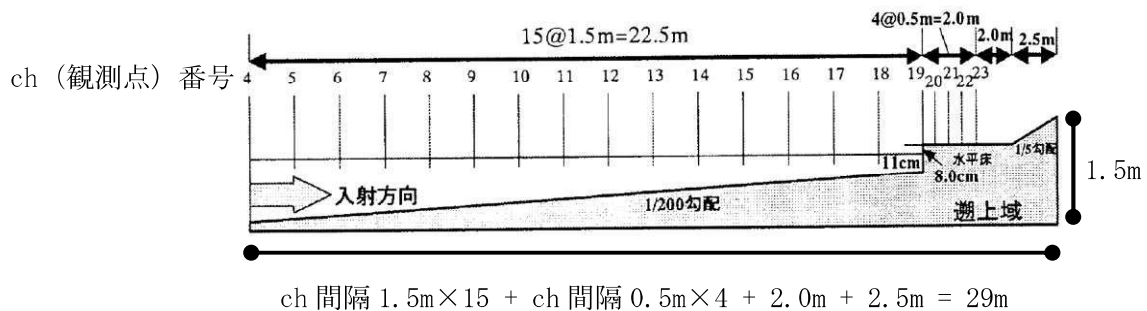


図 4.7 参 4-2 中型水路断面図と計測点 (大森ら(2000))<sup>1)</sup>に加筆)

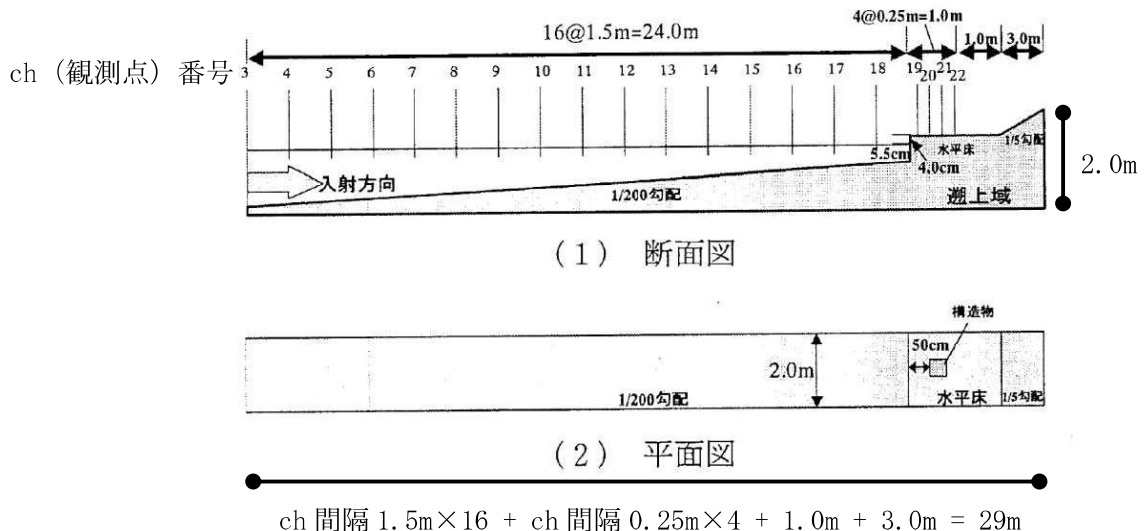


図 4.7 参 4-3 大型水路断面・平面図と計測点 (大森ら(2000))<sup>1)</sup>に加筆)

表 4.7 参 4-1 実験ケース

ケース	実験水路	波の種類	波高	周期
1-A	中型	非分裂波	15 cm	63 s
1-B	中型	分裂波	20 cm	63 s
2-A	大型	非分裂波	4.5 cm	60 s
2-B	大型	分裂波	4.5 cm	30 s

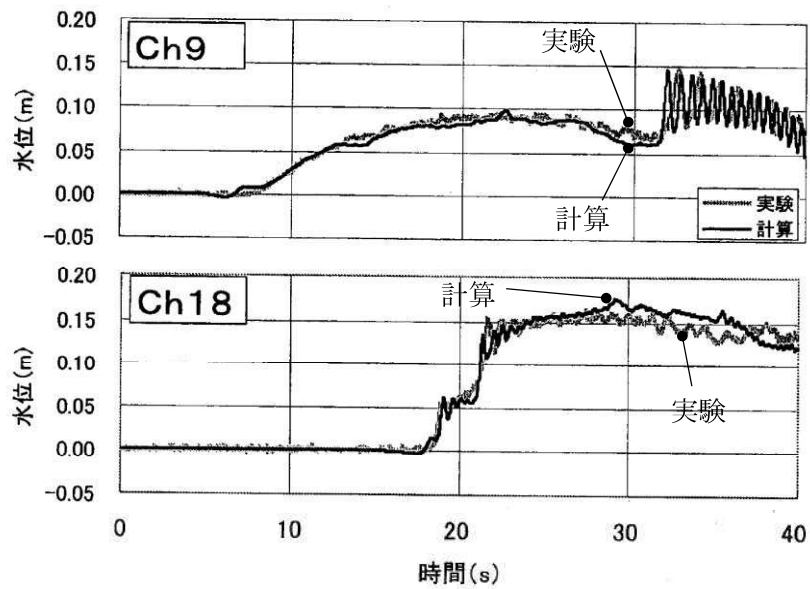


図 4.7 参 4-4 水時刻歴波形 (ケース 1-B) (大森ら(2000)<sup>1)</sup>に加筆)

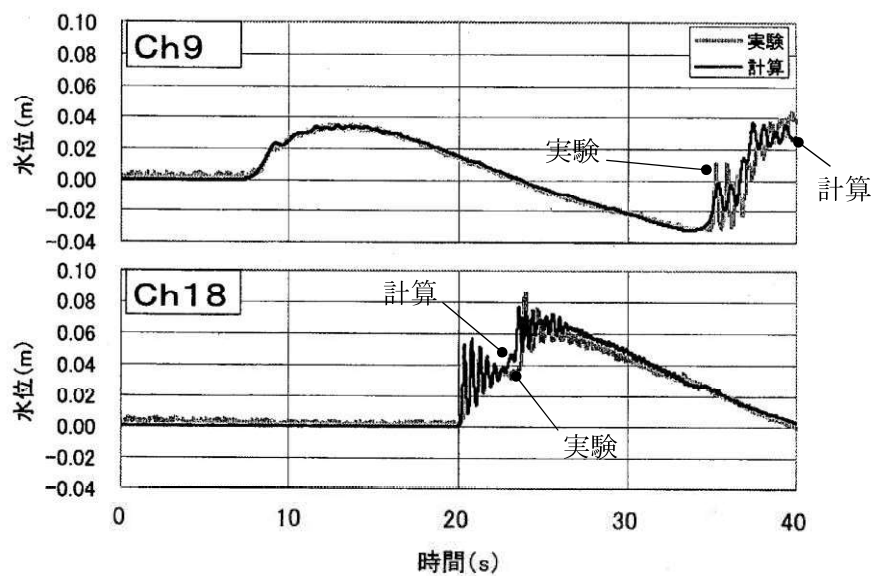


図 4.7 参 4-5 水位時刻歴波形 (ケース 2-B) (大森ら(2000)<sup>1)</sup>に加筆)

(2) 使用内容に対する妥当性

文献による検証のとおり，本解析コードの解析結果は水理模型実験の結果をよく再現していることから，海水貯留堰前面におけるソリトン分裂の発生を確認するための1次元津波水位解析に，本解析コードを適用することは妥当である。



### 3. 参考文献

- 1) 大森政則・藤井直樹・京谷修・高尾誠・金戸俊道・池谷毅：直立護岸を越流した津波の水位・流速および波力の数値計算，海岸工学論文集 第47巻，pp.376-380，2000
- 2) 原子力土木委員会 津波評価部会 委員会報告：津波評価手法の高精度化研究－津波水位の確率論的評価法ならびに分散性と砕波を考慮した数値モデルの検討－，土木学会論文集 B Vol.63 No.2，pp.168-177，2007
- 3) Peregrine, D.H : Long waves on a beach, Journal of the Fluid Mechanics, Vol.27, Part4, pp.815-827, 1967
- 4) 佐藤慎司：波の分裂と砕波を考慮した津波の数値計算，海岸工学論文集 第42巻，pp.376-380，1995

## 漂流物挙動の検討について

(港湾内海底露出範囲への漂流物侵入，直近海域への漂流物侵入（気中衝突）の可能性）

## (1) 検討概要

港湾内海底露出範囲への漂流物侵入の可能性，直近海域への漂流物侵入（気中衝突）の可能性を評価するため，水位・流向・流速・軌跡シミュレーションを用いて漂流物挙動の検討を実施した。

## (2) 検討対象・検討結果

検討対象・検討結果を表 4.7-添 2-1 に示す。以降，それぞれの検討内容の詳細を示す。

表 4.7-添 2-1 検討対象・検討結果一覧

検討項目・No.	検討対象	検討結果
港湾内海底露出範囲への漂流物侵入の可能性		
添付資料 2(a)	航行不能船舶	港湾内海底露出範囲に侵入しない
直近海域への漂流物侵入（気中衝突）の可能性		
添付資料 2(b)	航行不能船舶	直近海域へ侵入せず，気中衝突は生じない

港湾内海底露出範囲への漂流物侵入の可能性 -航行不能船舶-

(1) 軌跡シミュレーション

軌跡シミュレーションの評価条件を表 4.7-添 2(a)-1, 評価結果を図 4.7-添 2(a)-1 に示す。なお, 図 4.7-添 2(a)-1 には地震発生後 135 分後までの結果を表示している。

表 4.7-添 2(a)-1 軌跡シミュレーション評価条件

項目		評価条件
基準津波		基準津波 2 (地震発生後 2 時間付近で港湾内海底露出) ※基準津波 1, 基準津波 3 では広範囲の港湾内海底面露出なし
地形モデル	防波堤	健全, 1m 沈下, 2m 沈下, なし
	護岸部・敷地	健全
	荒浜側防潮堤	健全
評価時間		12 時間
漂流条件		流速: - 浸水深: 50cm 以上で移動, 50cm 未満で停止
初期配置		

(2) 水位・流向・流速を用いた傾向分析

水位・流向・流速を用いた傾向分析結果を図 4.7-添 2(a)-2~図 4.7-添 2(a)-5 に示す。なお, 詳細分析は, 各検討ケースにおいて港湾内海底面が広範囲に露出する期間 (地震発生後 2 時間付近) に着目して実施した。

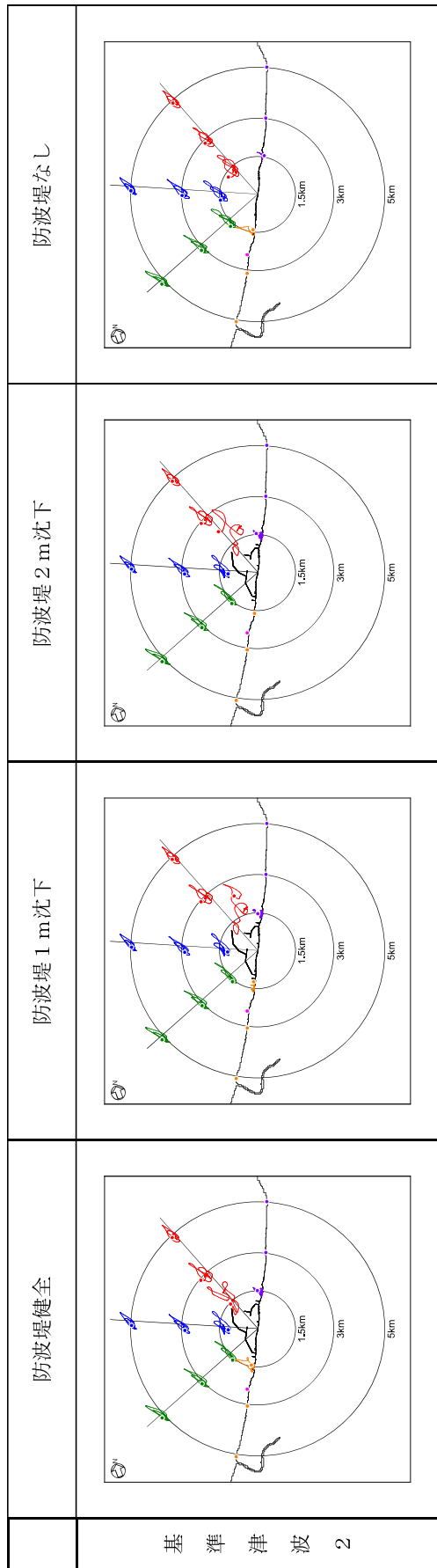
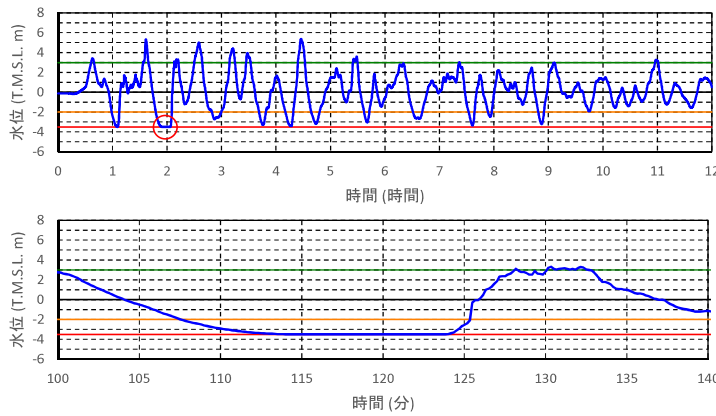


図 4.7-添 2(a) ー1 軌跡シミュレーション評価結果 (135 分後)

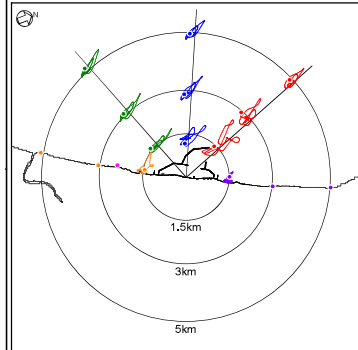
- 地震発生後2時間付近で港湾内海底が露出するが、この期間には「直近海域」には侵入しない。
- 地震発生後2時間付近の漂流物の挙動を、水位・流向・流速を用いて分析。

地震発生後2時間付近で港湾内海底露出



6号機取水口前面水位

「直近海域」に侵入しない



軌跡シミュレーション結果  
(地震発生後135分)

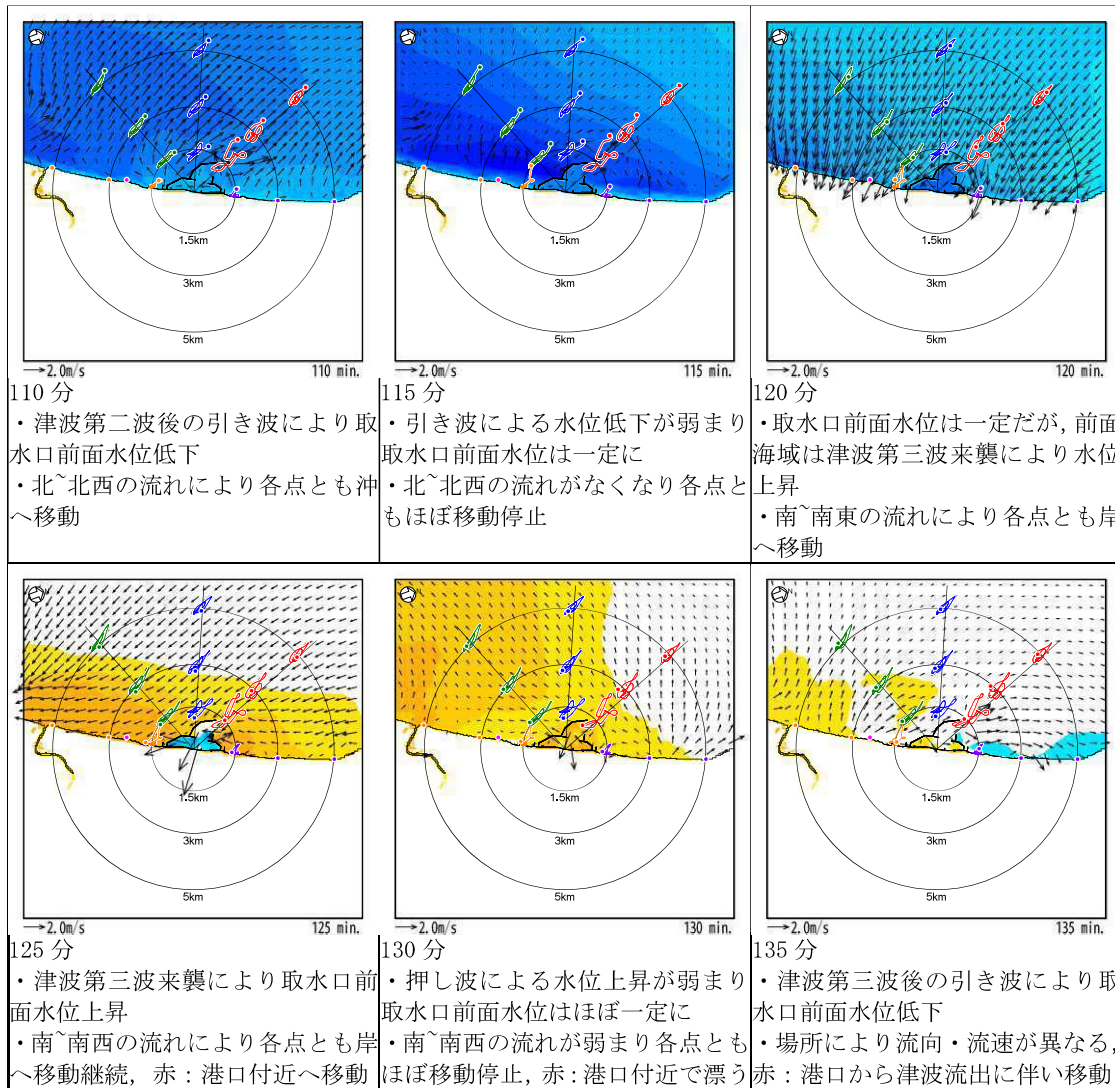
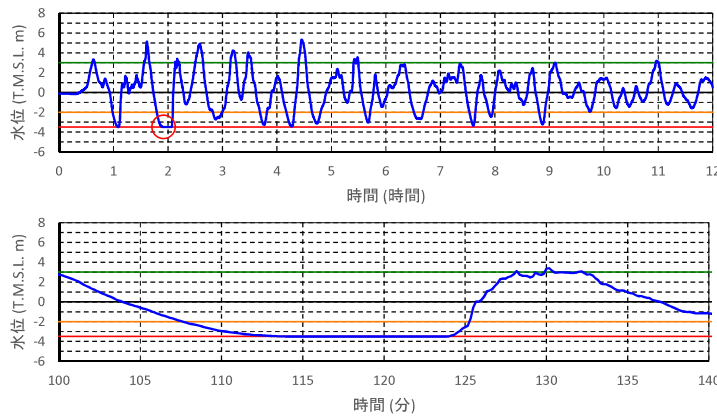


図 4.7-添 2(a)-2 水位・流向・流速を用いた傾向分析結果 (基準津波 2 防波堤健全)

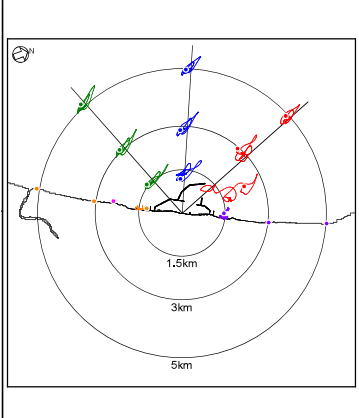
- 地震発生後2時間付近で港湾内海底が露出するが、この期間には「直近海域」には侵入しない。
- 地震発生後2時間付近の漂流物の挙動を、水位・流向・流速を用いて分析。

地震発生後2時間付近で港湾内海底露出

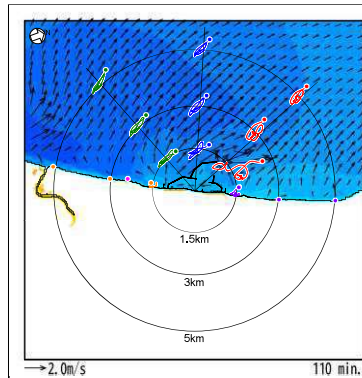


6号機取水口前面水位

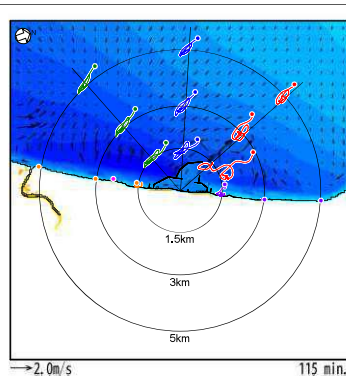
「直近海域」に侵入しない



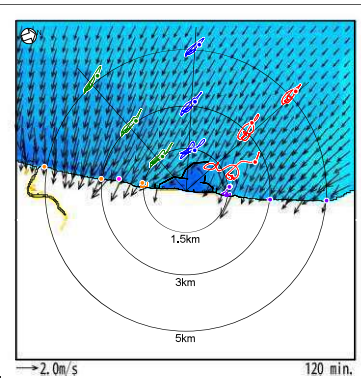
軌跡シミュレーション結果  
(地震発生後135分)



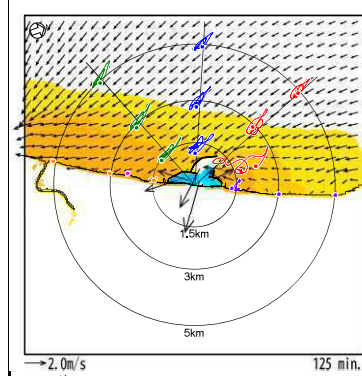
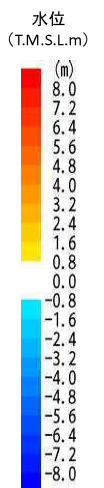
110分  
・津波第二波後の引き波により取水口前面水位低下  
・北~北西の流れにより各点とも沖へ移動



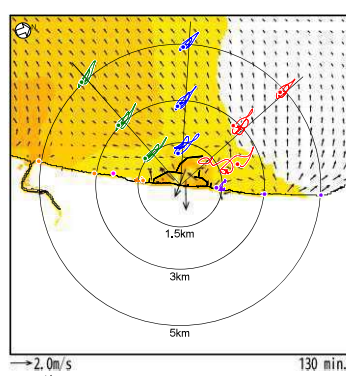
115分  
・引き波による水位低下が弱まり取水口前面水位は一定に  
・北~北西の流れがなくなり各点ともほぼ移動停止



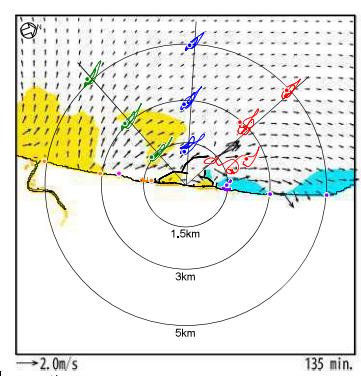
120分  
・取水口前面水位は一定だが、前面海域は津波第三波来襲により水位上昇  
・南~南東の流れにより各点とも岸へ移動



125分  
・津波第三波来襲により取水口前面水位上昇  
・南~南西の流れにより各点とも岸へ移動継続



130分  
・押し波による水位上昇が弱まり取水口前面水位はほぼ一定に  
・南~南西の流れが弱まり各点ともほぼ移動停止

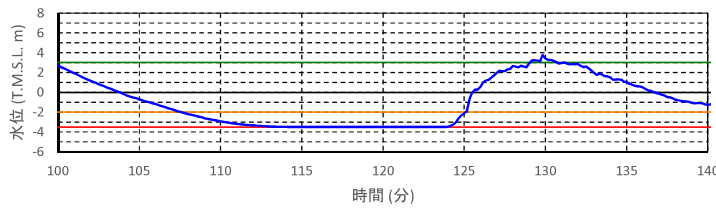
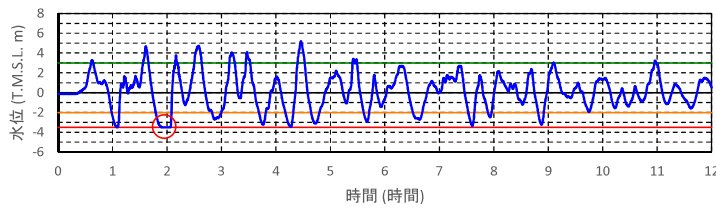


135分  
・津波第三波後の引き波により取水口前面水位低下  
・場所により流向・流速が異なる

図 4.7-添 2(a)-3 水位・流向・流速を用いた傾向分析結果 (基準津波 2 防波堤 1m 沈下)

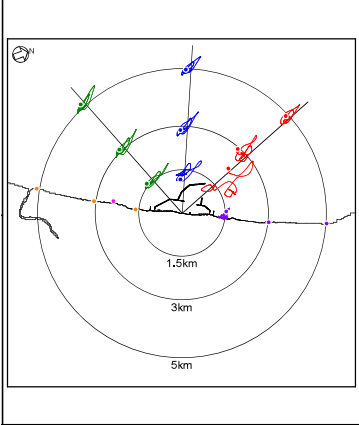
- 地震発生後2時間付近で港湾内海底が露出するが、この期間には「直近海域」には侵入しない。
- 地震発生後2時間付近の漂流物の挙動を、水位・流向・流速を用いて分析。

地震発生後2時間付近で港湾内海底露出



6号機取水口前面水位

「直近海域」に侵入しない



軌跡シミュレーション結果  
(地震発生後135分)

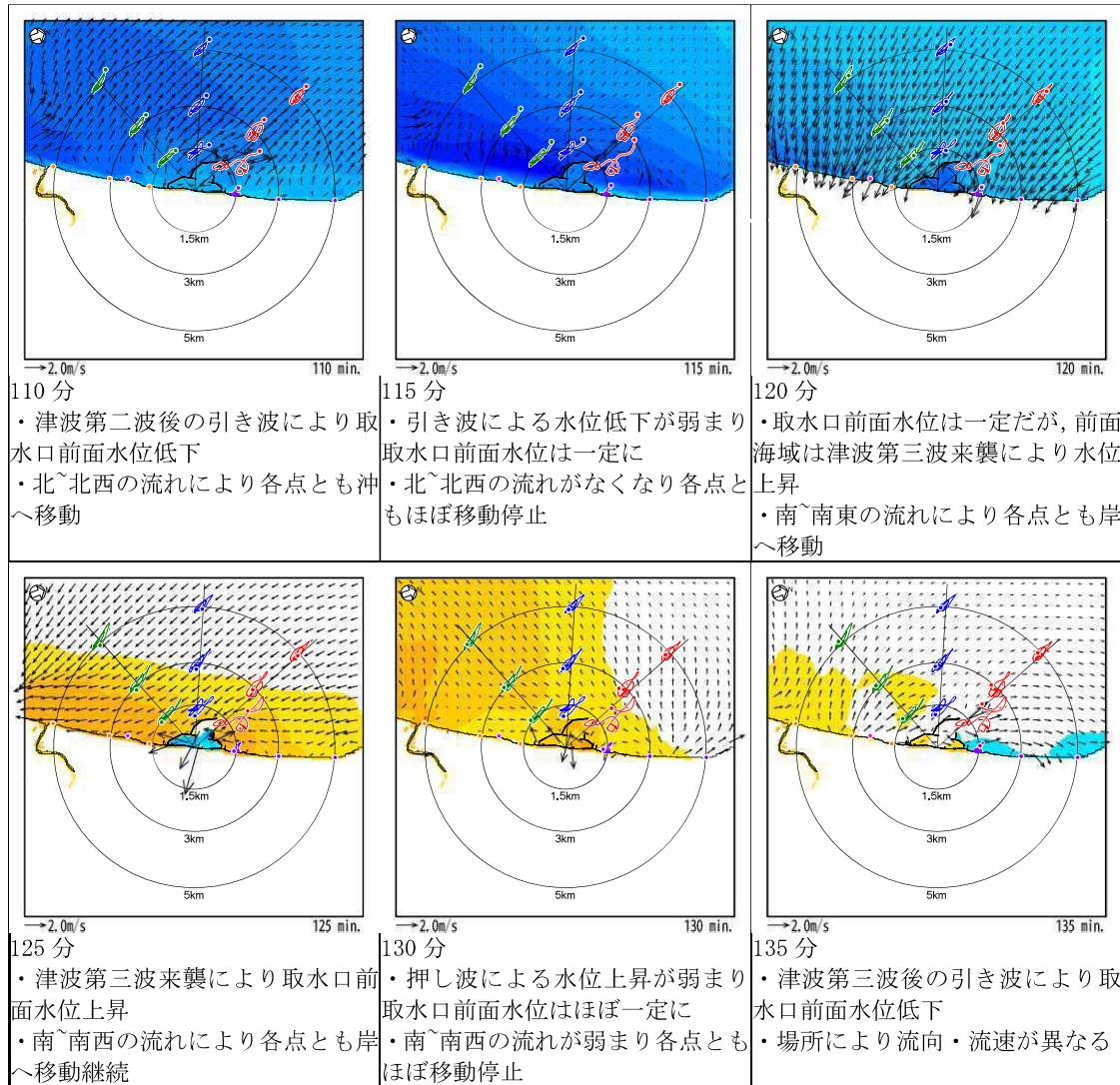
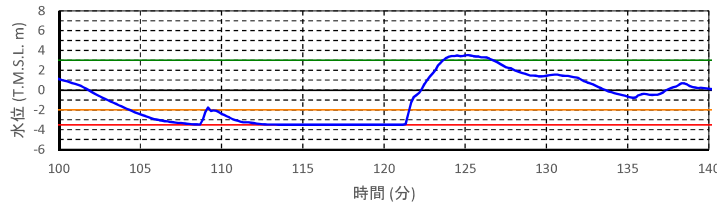
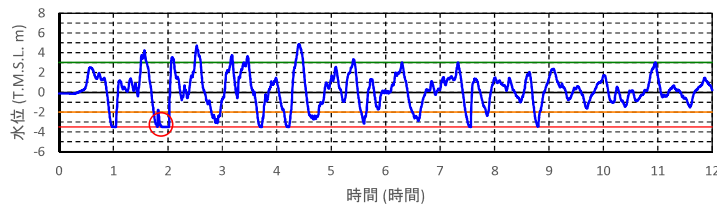


図 4.7-添 2(a)-4 水位・流向・流速を用いた傾向分析結果 (基準津波 2 防波堤 2m 沈下)

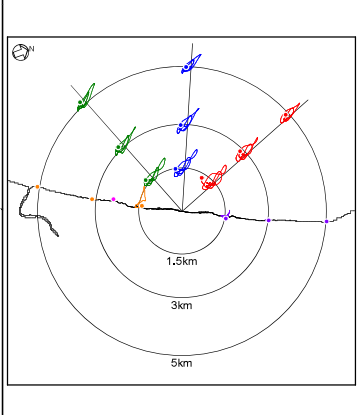
- 地震発生後2時間付近で港湾内海底が露出するが、この期間には「直近海域」には侵入しない。
- 地震発生後2時間付近の漂流物の挙動を、水位・流向・流速を用いて分析。

地震発生後2時間付近で港湾内海底露出



6号機取水口前面水位

「直近海域」に侵入しない



軌跡シミュレーション結果  
(地震発生後135分)

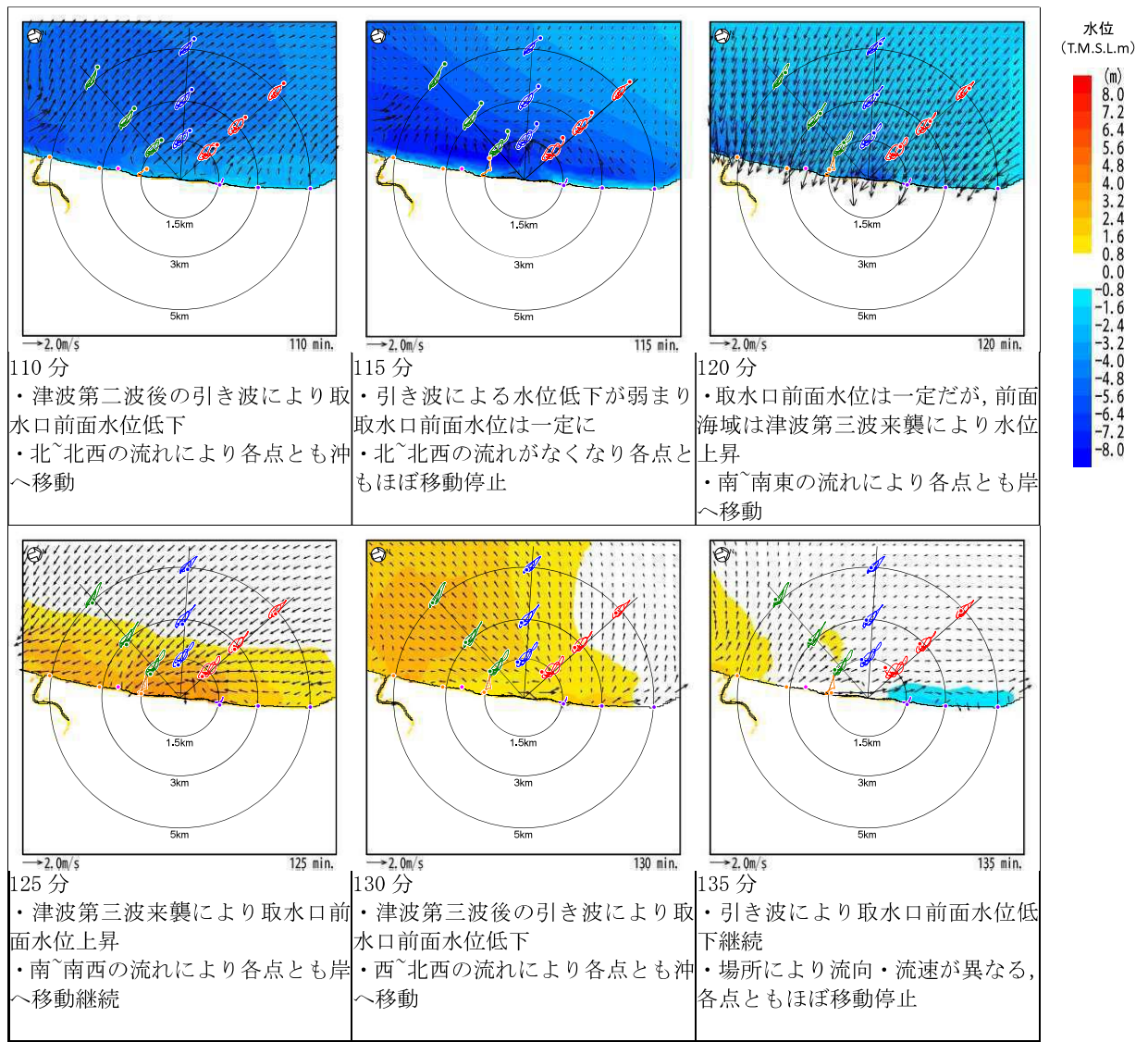


図4.7-添2(a)-5 水位・流向・流速を用いた傾向分析結果 (基準津波2 防波堤なし)

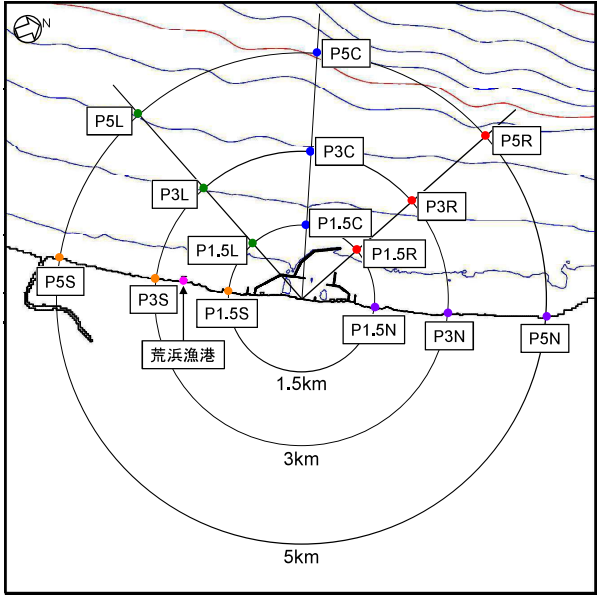


直近海域への漂流物侵入（気中衝突）の可能性 -航行不能船舶-

(1) 軌跡シミュレーション

軌跡シミュレーションの評価条件を表 4.7-添 2(b)-1, 評価結果を図 4.7-添 2(b)-1 に示す。

表 4.7-添 2(b)-1 軌跡シミュレーション評価条件

項目	評価条件
基準津波	基準津波 1～3
地形モデル	防波堤 健全, 1m 沈下, 2m 沈下, なし
	護岸部・敷地 健全
	荒浜側防潮堤 健全
評価時間	12 時間
漂流条件	流速：－ 浸水深：50cm 以上で移動, 50cm 未満で停止
初期配置	 <p>The diagram illustrates the initial configuration of simulation points for a drift object simulation. It shows a coastal area with a harbor labeled '荒浜漁港' (Arahama Fishing Port). Concentric circles with radii of 1.5km, 3km, and 5km are centered on the harbor area. Various points are marked with colored dots and labeled: P1.5L, P1.5C, P1.5R (red dots); P3L, P3C, P3R (green dots); P5L, P5C, P5R (blue dots); P1.5S, P3S, P5S (orange dots); and P1.5N, P3N, P5N (purple dots). A north arrow is located in the top left corner of the diagram.</p>

(2) 水位・流向・流速を用いた傾向分析

水位・流向・流速を用いた傾向分析結果を図 4.7-添 2(b)-2～図 4.7-添 2(b)-14 に示す。

詳細分析では、まず、各検討ケース（評価時間 12 時間）において海水貯留堰天端露出の有無・「直近海域」への侵入の有無を確認した（図 4.7-添 2(b)-2～図 4.7-添 2(b)-13）。

このうち、海水貯留堰天端の露出及び「直近海域」への侵入が確認される検討ケース（基準津波 2（防波堤健全・防波堤 1m 沈下・防波堤 2m 沈下）については、海水貯留堰天端が露出する期間に着目し、この期間に「直近海域」へ侵入するかどうかを検討した。これ以外の検討ケースについては、取水行前面水位が最も低下する期間に着目した検討を実施した。

また、別途、基準津波 1（防波堤なし）の検討ケースにおいて、発電所北側 1.5km 付近の漂流物（P1.5N）が海水貯留堰方向への移動する期間（移動量が最も大きい期間）に着目した検討を実施した（図 4.7-添 2(b)-14）。

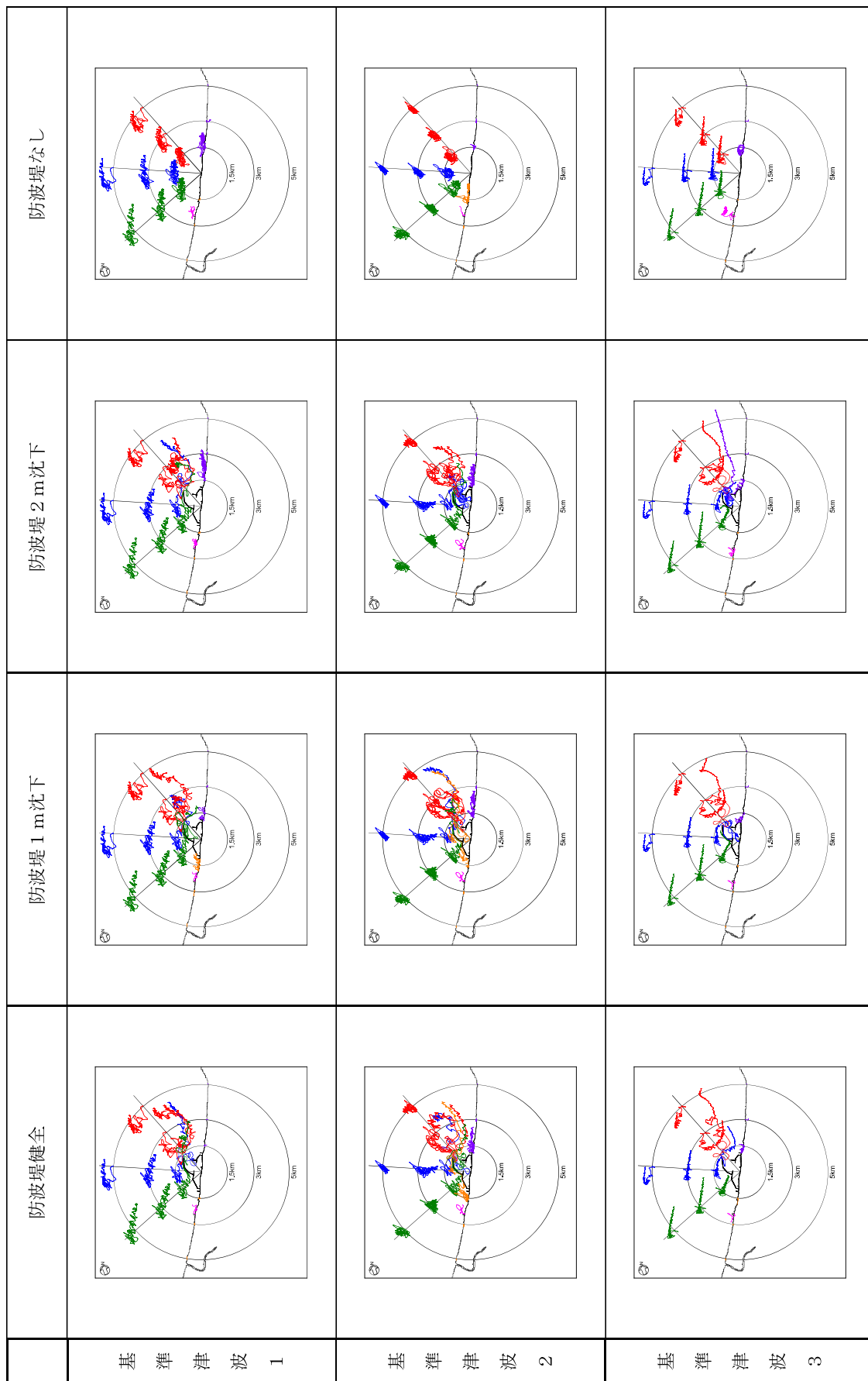


図 4.7-添 2 (b) -1 軌跡シミュレーション評価結果

- 6号機取水口前面水位は T.M.S.L. -3.5m まで低下しない, 「直近海域」に侵入。  
→海水貯留堰の天端が露出しないため, 気中衝突は発生しない。
- なお, 取水口水位が最も低下する期間(地震発生後 120 分頃)の漂流物の挙動を, 水位・流向・流速を用いて分析(次頁参照)。

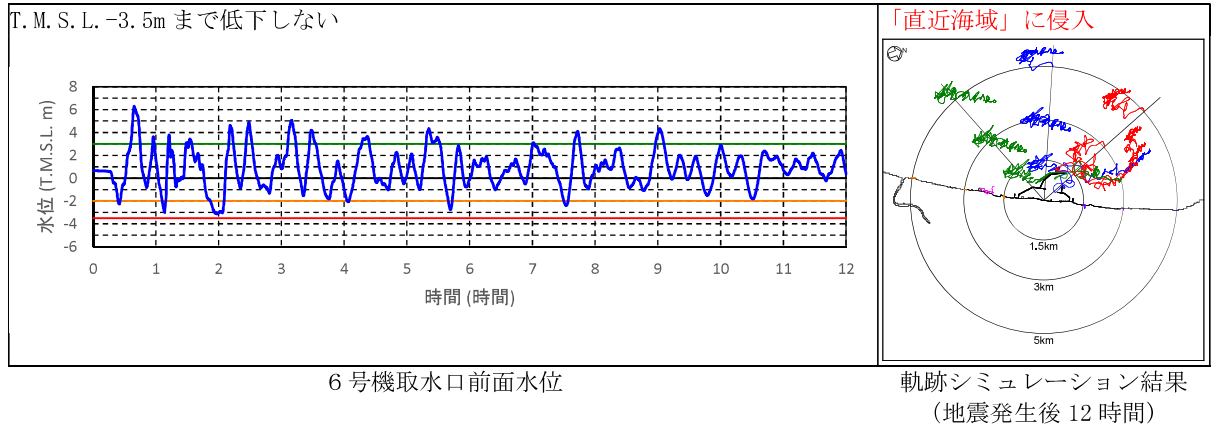
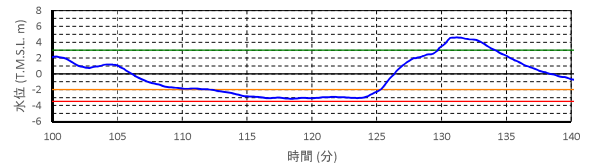
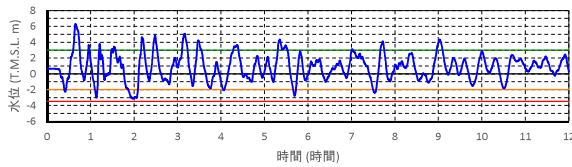


図 4.7-添 2(b)-2(1) 水位・流向・流速を用いた傾向分析結果(基準津波 1 防波堤健全)

- 発電所前面海域の主たる流れは、津波第四波後の引き波、津波第五波による押し波・引き波に応じて変化し、長期間一様な流れとなっていない。
- 取水口水位が最も低下する期間において「直近海域」に侵入しない。



6号機取水口前面水位

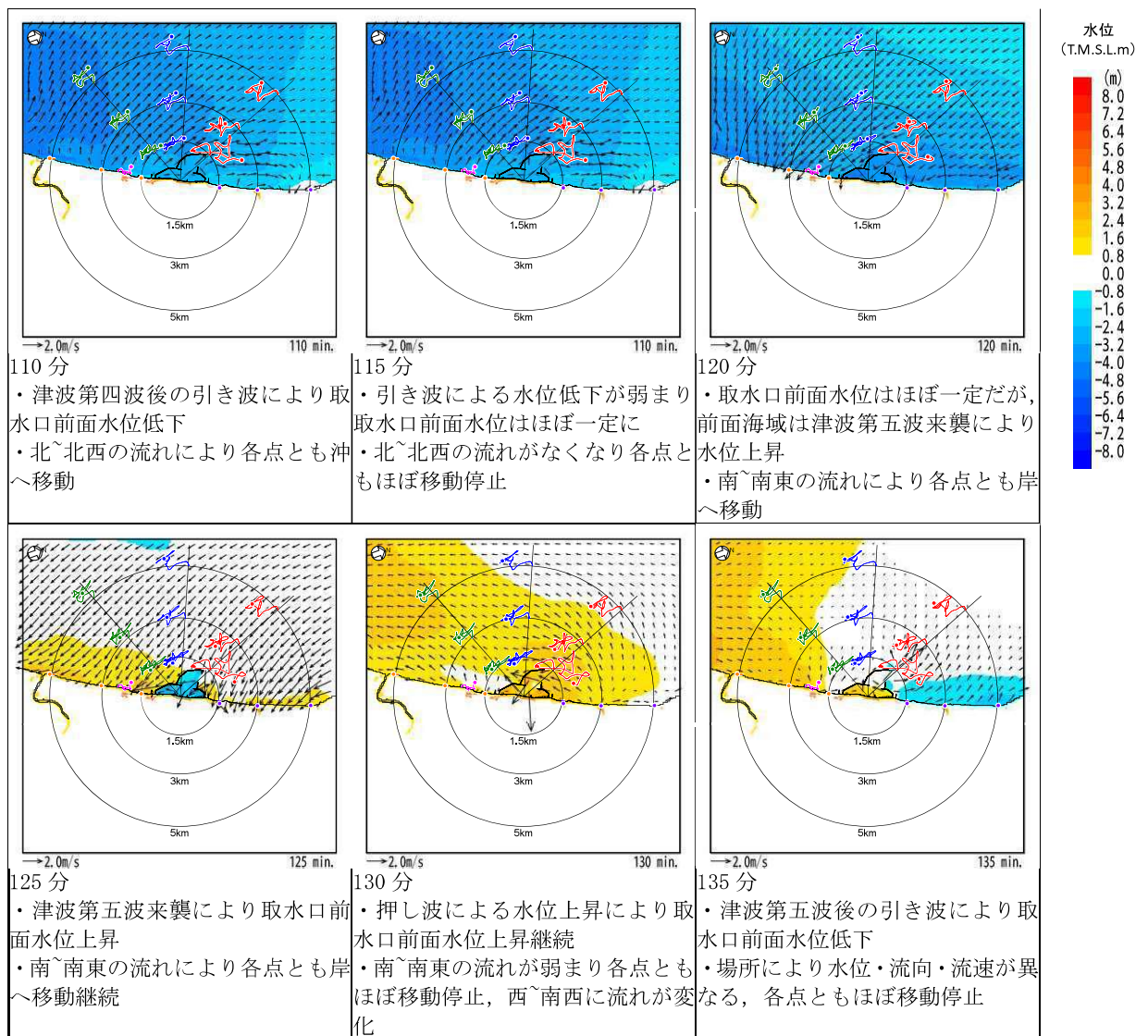


図 4.7-添 2(b)-2(2) 水位・流向・流速を用いた傾向分析結果 (基準津波 1 防波堤健全)

- 6号機取水口前面水位はT.M.S.L. -3.5mまで低下しない、「直近海域」に侵入。  
→海水貯留堰の天端が露出しないため、気中衝突は発生しない。
- なお、取水口水位が最も低下する期間（地震発生後120分頃）の漂流物の挙動を、水位・流向・流速を用いて分析（次頁参照）。

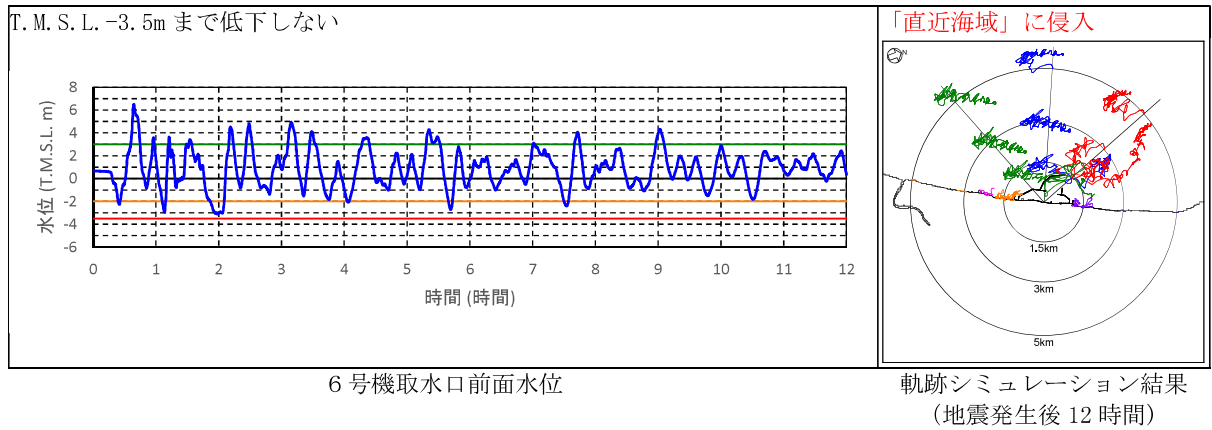
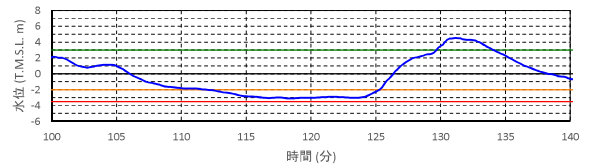
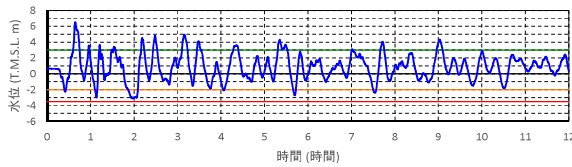


図 4.7-添 2(b)-3(1) 水位・流向・流速を用いた傾向分析結果（基準津波1 防波1m沈下）

- 発電所前面海域の主たる流れは、津波第四波後の引き波、津波第五波による押し波・引き波に応じて変化し、長期間一様な流れとなっていない。
- 取水口水位が最も低下する期間において「直近海域」に侵入しない。



6号機取水口前面水位

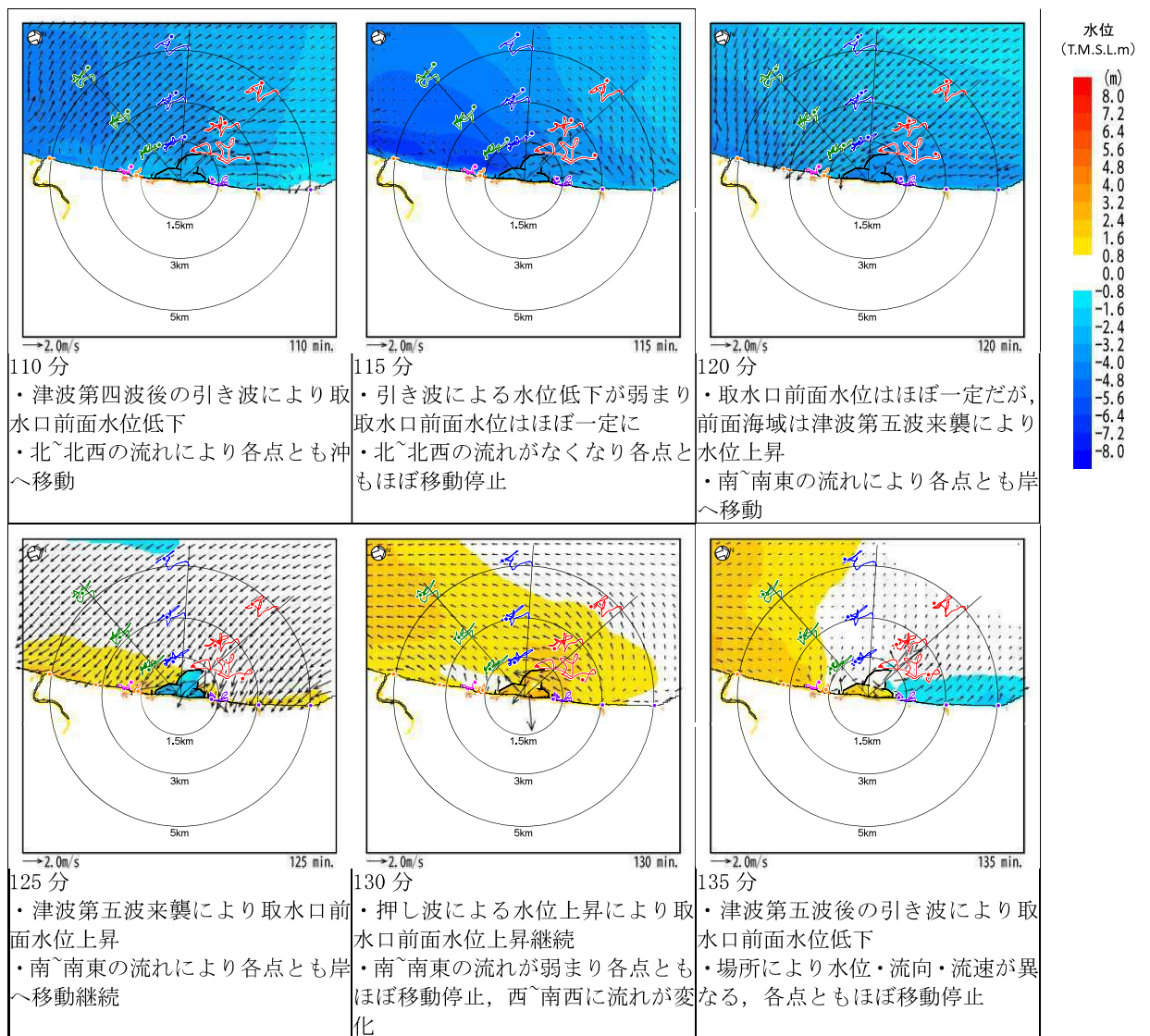


図 4.7-添 2(b)-3(2) 水位・流向・流速を用いた傾向分析結果 (基準津波 1 防波堤 1m 沈下)

- 6号機取水口前面水位は T.M.S.L. -3.5m まで低下しない、「直近海域」に侵入しない。  
→海水貯留堰の天端が露出せず、「直近海域」に侵入しないため、気中衝突は発生しない。
- なお、取水口水位が最も低下する期間（地震発生後 120 分頃）の漂流物の挙動を、水位・流向・流速を用いて分析（次頁参照）。

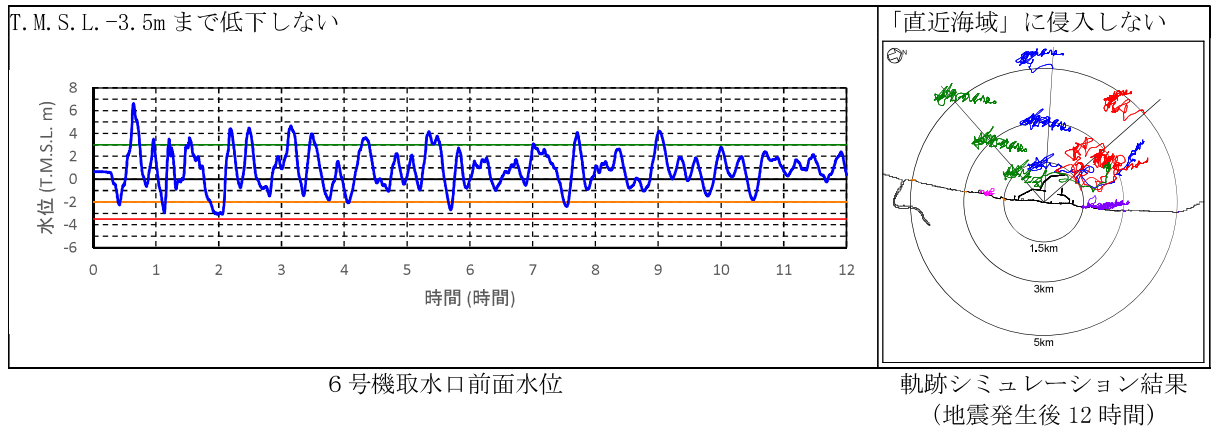


図 4.7-添 2(b)-4(1) 水位・流向・流速を用いた傾向分析結果（基準津波 1 防波堤 2m 沈下）