

4.7 漂流物衝突を考慮した津波防護施設的设计について

4.7 漂流物衝突を考慮した津波防護施設の設計について

4.7.1 概要

施設・設備の強度評価において考慮する漂流物の衝突荷重は、基準津波の特徴及び発電所のサイト特性に加え、衝突評価対象物（被衝突体）の設置場所並びに検討対象漂流物（衝突物）の種類及び衝突形態を考慮し、各種論文等にて提案される漂流物の衝突荷重算定式の中から適切なものを選定し算定する。

4.7.2 衝突評価対象物（被衝突体）の選定

津波防護施設及び浸水防止設備としては、表 4.7-1 に示す設備が挙げられるが、表 4.7-1 に記載のとおり、それらの設置位置を考慮し、衝突評価対象物（被衝突体）として海水貯留堰を選定した。

表 4.7-1 衝突評価対象物（衝突体）に係る整理

津波防護施設 及び浸水防止設備	範囲内/外*1	漂流物衝突 評価対象	対象外とする理由
7号機海水貯留堰	範囲内	○	—
6号機海水貯留堰	範囲内	○	—
取水槽閉止板	範囲内	×	取水路の最奥に位置する設備であり、取水路の前面に除塵装置が設置されること、除塵装置と補機冷却用海水取水槽の間に約 150m の距離があることから津波に伴う漂流物は衝突しないと判断
水密扉	範囲外	×	基準津波が直接到達する範囲外に設置されるため
床ドレンライン閉止治具	範囲外	×	基準津波が直接到達する範囲外に設置されるため
貫通部止水処置	範囲外	×	基準津波が直接到達する範囲外に設置されるため

注記*1 基準津波が直接到達する範囲内に設置されるか、範囲外に設置されるかを表す。

4.7.3 衝突評価対象物（被衝突体）の特性

被衝突体である 6 号及び 7 号機の海水貯留堰は、図 4.7-1 に示す通りその天端高さが T. M. S. L. -3.5m であり、通常時は海水に没水している施設となる。

したがって、浮遊状態の漂流物が海水貯留堰に衝突する事象は、津波により海水位が一定程度低下する状況において発生することとなるとともに、気中衝突が発生するのは海水位が T. M. S. L. -3.5m まで低下する時間帯にのみ発生することとなる。

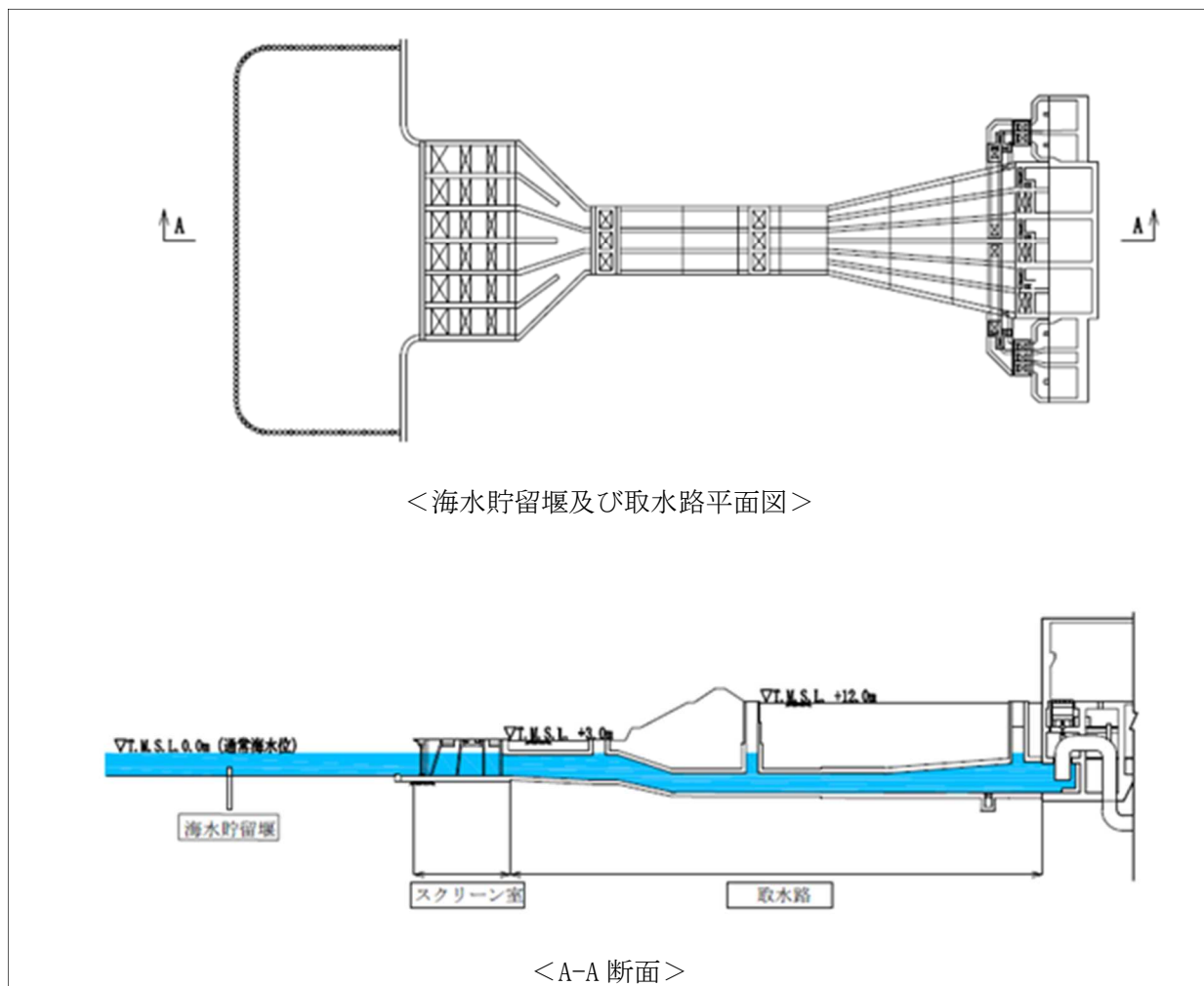


図 4.7-1 海水貯留堰の施設概要

4.7.4 検討対象漂流物（衝突物）の整理

衝突影響を評価する検討対象漂流物（衝突物）は、「4.2 漂流物による影響確認について」において 6 号及び 7 号機取水口に到達し得る漂流物とし、具体的には表 4.7-2 示す施設・設備等とした。

表 4.7-2 衝突影響を評価する検討対象漂流物一覧

状態	設置場所情報			種類	内容・名称・構造等	重量
	海域/陸域	構内/構外	場所			
浮遊	海域	構外	発電所周辺	船舶	発電所近傍で航行不能となった船舶	約 15t
		構内	発電所港湾内	船舶	作業船（ゴムボート）	1t 未満
	陸域	構内	大湊側海岸線	車両	軽自動車	1t 以下
				資機材	ユニットハウス，角材，排水用ホース，カラーコーン	1t 未満
			荒浜側海岸線	資機材	ユニットハウス，角材，排水用ホース，カラーコーン	1t 未満
				植生	保安林	約 140kg
滑動	海域	構内	発電所港湾内	防波堤	捨石・砕石	約 100kg
	陸域	構内	大湊側海岸線	建屋	コンクリート建屋（小片）	10t 未満
				車両	乗用車，中型/大型トラック，ユニック，バキューム車，建設用車両（大型クレーンを除く）	14t 以下
				資機材	足場板，角パイプ，スクリーン点検用架台，水中ポンプ，発電機等	1t 未満
				一般構築物	監視カメラ，拡声器，標識，海水放射能モニタ等	200kg 以下

4.7.5 衝突荷重算定式の選定

4.7.5.1 漂流物衝突荷重評価に係る既往の評価式の整理

浮遊状態の漂流物が衝突する際の漂流物衝突荷重に関する既往の評価式について、各種文献における記載概要及び各種文献において実施された実験の条件等を整理して表 4.7-3 に示す。

また、各種文献において実施された実験の条件等を踏まえ、柏崎刈羽原子力発電所における適用性を整理した結果を表 4.7-4 に示す。

上記整理の結果、荷重算定式の選択にあたっては、衝突物が被衝突体の近傍（直近海域）にある状態で津波が作用するのか、あるいは衝突物が被衝突体から一定程度離れた場所（前面海域）にある状態で津波が作用するのかが重要となるものと判断した。

以降では、表 4.7-2 に示す各検討対象漂流物について、津波作用時に「直近海域」又は「前面海域」のいずれに存在することとなるかを整理した上で、検討対象漂流物ごとに選択すべき評価式を整理する。

表 4.7-3 規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物の衝突荷重算定式の整理 (1/2)

No.	出典	種類	概要及び算定式	算定式の適用性が確認された範囲 (実験条件等)
①	松富ほか (1999)	流木	<p>円柱形上の流木が縦向きに衝突する場合の漂流物の衝突荷重算定式を提案している。</p> $F_m/(\gamma D^2 L) = 1.6 C_{MA} \{v_{A0}/(gD)^{0.5}\}^{1.2} (\sigma_y/\gamma L)^{0.4}$ <p>F_m: 衝突力, γ: 流木の単位体積重量, D: 木材の直径, L: 木材の長さ, g: 重力加速度, C_{MA}: 見かけの質量係数 (水の緩衝機能も加味), v_{A0}: 衝突速度, σ_y: 木材の降伏応力</p>	<p>「実験に基づく推定式」</p> <ul style="list-style-type: none"> 見かけの質量係数に関する水路実験 (実験: 高さ 0.5m, 幅 0.3m, 長さ 11.0m) 流木 (丸太) の直径: 4.8cm~12cm 流木の質量: 305~8615 gf 衝突荷重に関する空中での試験 <p>水理模型実験及び空中衝突実験において, 流木 (植生林ではない丸太) を被衝突体の前面 (2.5m 以内) に設置した状態で衝突させている。</p>
②	池野・田中 (2003)	流木	<p>円柱以外にも角柱, 球の形状をした木材による漂流物の衝突荷重を提案している。</p> $F_H/(gM) = S \cdot C_{MA} \cdot \{V_H/(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})\}^{2.5}$ <p>F_H: 衝突力, g: 重力加速度, M: 漂流物の質量, S: 係数 (=5.0), C_{MA}: 付加質量係数, V_H: 漂流物移動速度, D: 漂流物の直径 (角柱の場合は正方形断面辺長), L: 漂流物の長さ</p>	<p>「実験に基づく推定式」 (縮尺 1/100 の模型実験)</p> <ul style="list-style-type: none"> 漂流物の形状: 円柱, 角柱, 球 漂流物重量: 0.588 N~29.792 N <p>受圧板を陸上構造物と想定し, 衝突体を受圧板前面 80cm (現地換算 80m) 離れた位置に設置した状態で衝突させた実験である。</p>
③	道路橋示方書 (2002)	流木等	<p>橋 (橋脚) に自動車, 流木あるいは船舶等が衝突する場合の漂流物の衝突荷重を定めている。</p> $P = 0.1WU$ <p>P: 衝突力, W: 流送物の重量, U: 表面流速</p>	<p>漂流物が流下 (漂流) してきた場合に, 表面流速 (津波流速) を与えることで漂流流速に対する荷重を算定できる。</p>

表 4.7-3 規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物の衝突荷重算定式の整理 (2/2)

No.	出典	種類	概要及び算定式	算定式の適用性が確認された範囲 (実験条件等)
④	FEMA* (2012)	流木 コンテナ	$F_i = 1.3u_{max}\sqrt{km_d(1+c)}$ $F_i: \text{衝突力}, c: \text{付加質量係数}, u_{max}: \text{漂流物を運ぶ流体の最大流速}, m_d: \text{漂流物の質量}, k: \text{漂流物の有効軸剛性}$	<p>「運動方程式に基づく衝突力方程式」</p> <p>非減衰系の振動方程式に基づいており、衝突体及び被衝突体の両方とも完全弾性体で、かつ衝突時のエネルギー減衰が一切考慮されていない前提条件での算定式であることから、衝突時に塑性変形を伴う漂流物の衝突荷重算定では、個別の漂流物に対して、実現象を再現するような軸剛性を適切に定める必要がある。</p> <p>漂流物が地表面を転がるような場合には、衝突流速を 50% として良い可能性があると記載がある。</p>
⑤	水谷ほか (2005)	コンテナ	<p>漂流するコンテナによる漂流物の衝突荷重を提案している。</p> $F_m = 2\rho_w\eta_m B_c V_x^2 + \left(\frac{WV_x}{gdt}\right), V_x \approx C_x = 2\sqrt{g\eta m}$ $F_m: \text{衝突力}, g: \text{重力加速度}, W: \text{コンテナの重量}, B_c: \text{コンテナ幅}, \eta_m: \text{漕上波の最大水位}, dt: \text{衝突時間}, \rho_w: \text{水の密度}, V_x: \text{コンテナの漂流速度}, C_x: \text{津波の漕上流速}$	<p>「実験に基づく推定式」(縮尺 1/75 の模型実験)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・使用コンテナ：長さを 20 ft と 40 ft ・コンテナ重量：0.2 N~1.3 N 程度 ・漕上流速：1.0m/s 以下 ・材質：アクリル <p>被衝突体の直近のエプロン上にコンテナを設置して衝突力を求めた算定式である。衝突体と水塊が一体となって衝突し、衝突前の運動量が全て力積として作用するものとして考えた算定式であり、右辺の第 1 項は付加質量による荷重を表している。</p>
⑥	有川ほか (2007, 2010)	流木 コンテナ	<p>鋼製構造物 (コンテナ等) による漂流物の衝突荷重を提案している。</p> $F = \gamma_p x^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5}{4}\tilde{m}\right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{2}{5}}, x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1+k_2}, k = \frac{(1-v^2)}{mE}, \tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}$ <p>a: 衝突面半径の 1/2 (ここではコンテナ衝突面の縦横長さの平均の 1/4), E: ヤング係数, v: ポアソン比, m: 質量, v: 衝突速度, γ_p: 塑性によるエネルギー減衰効果, 添字 1, 2 は衝突体と被衝突体を表す。</p>	<p>「実験に基づく推定式」(縮尺 1/5 の模型実験)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・使用コンテナ：長さ 1.21m, 高さ 0.52m, 幅 0.49m ・衝突速度：1.0~2.5m/s 程度 ・材質：鋼製 <p>水理模型実験では、コンテナを被衝突体の前面 1.21m (現地換算 6.05m) に設置して衝突力を求めた算定式である。</p>

注記* : FEMA : FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY

表 4.7-4 各種基準種類の漂流物の衝突荷重算定式の適用性の整理

No.	出典	種類	漂流物の配置	適用流速	適用性
①	松富ほか	流木	直近	衝突速度	個別の流木（丸太）の種類等に応じて、実現象を再現するようなパラメータを適切に定める必要があるという課題はあるものの、「直近海域」からの流木に対して適用可能と判断する。
②	池野・田中	流木	直近	漂流物の移動速度	流木を対象とした算定式であるが、実験の模型縮尺（1/100）を考慮すると、原子力発電所における漂流物衝突事象への適用は困難と判断する。
③	道路橋示方書	流木等	前面海域	表面流速（津波流速）	漂流物が流下（漂流）して来た場合に、表面流速（津波流速）を与えることで漂流流速に対する荷重を算定できるため、「前面海域」からの漂流物に対して適用可能と判断する。
④	FEMA	流木 コンテナ	直近	漂流物を運ぶ流体の最大流速	個別の漂流物に対して、実現象を再現するような軸剛性を適切に定める必要があるという課題はあるものの、「直近海域」からの漂流物に対して適用可能と判断する。
⑤	水谷ほか	コンテナ	直近	津波の遡上流速	エプロン上にコンテナを設置して衝突力を求めるという特殊な実験により得られた式であり、柏崎刈羽原子力発電所において想定している漂流物の衝突形態とは異なるため、適用は困難と判断する。
⑥	有川ほか	流木 コンテナ	直近	衝突速度	剛性に係る k 値を適切に定める必要があるが、対象としている種類以外への適用性がある k 値に係る k1 及び k2 の値、すなわち実験データを再現するよう同定された当該式の妥当な k1 及び k2 の値が不明であるため、現状は当該式は対象としている種類（流木）以外への適用は困難と判断する。 したがって、「直近海域」からの流木に対して適用可能と判断する。

4.7.5.2 衝突荷重算定式の選定に係る整理（浮遊状態漂流物）

4.2.1に記載する、柏崎刈羽原子力発電所の津波に関するサイト特性及び4.7.3に記載する被衝突体の特性を踏まえ、衝突荷重算定式の選定に関して、以下の観点で整理する。

- ソリトン分裂及び砕波の発生位置

- 漂流物がソリトン分裂又は砕波を伴う津波とともに海水貯留堰に衝突する場合、その衝突事象において衝撃的な荷重が発生する可能性がある。したがって、浮遊状態の漂流物が分裂波又は砕波の発生位置よりも海水貯留堰に近い位置に存在する際に津波が作用する場合は、表4.7-4における「直近海域」からの漂流物が衝突する事象に該当すると整理する。

- 海底露出の範囲

- 海底露出の範囲に位置する漂流物が津波とともに海水貯留堰に衝突する場合、その衝突事象において衝撃的な荷重が発生する可能性がある。したがって、浮遊状態の漂流物が海底露出範囲に存在する際に津波が作用する場合は、表4.7-4における「直近海域」からの漂流物が衝突する事象に該当すると整理する。

- 気中衝突の発生有無

- 浮遊状態の漂流物が海水貯留堰に気中衝突する場合、その衝突事象において衝撃的な荷重が発生する可能性がある。したがって、海水貯留堰の天端が露出する際（取水口前面水位がT.M.S.L.-3.5mまで低下している際）に浮遊状態の漂流物が海水貯留堰近傍に存在する場合は、表4.7-4における「直近海域」からの漂流物が衝突する事象に該当すると整理する。

(1) ソリトン分裂及び砕波の発生位置

添付資料1「分裂波発生に関する検討」に示すとおり、基準津波の水位時刻歴波形や空間分布の時間変化から砕波が発生するような段波形状も見られないとともに、水面勾配は最大で 2.57° であり、「松山ら(2005)*1」における水面勾配の砕波限界 $30^\circ \sim 40^\circ$ に比べ十分小さいことから、基準津波発生時に分裂波及び砕波のいずれも発生しないものと判断した。なお、上記最大水面勾配は、基準津波2において、海水貯留堰設置位置における水位が海底標高と同程度となった後に水位が上昇している期間において確認された。（図4.7-2及び図4.7-3参照）

上記より、ソリトン分裂及び砕波の観点では「直近海域」からの漂流物は存在しないものと整理した。

注記*1：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

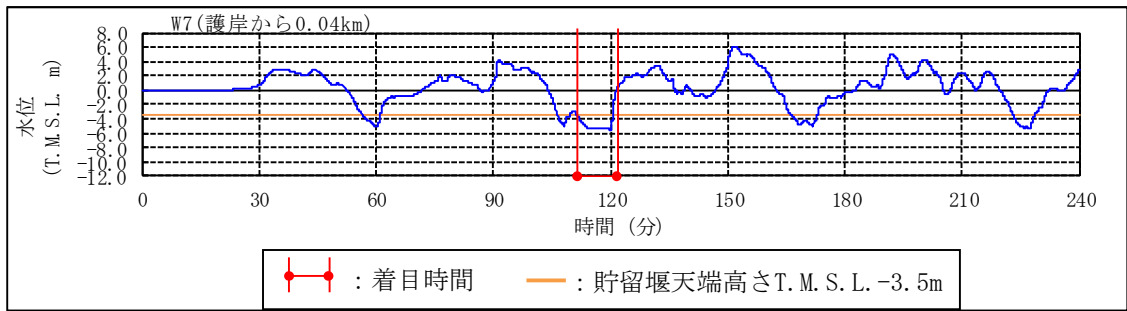


図 4.7-2 最大水面勾配が確認された時刻（基準津波 2，118 分，海水貯留堰設置位置（W7））

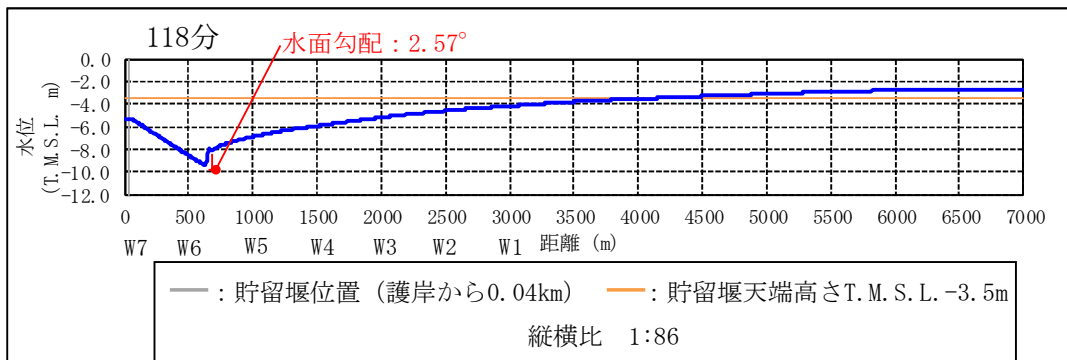


図 4.7-3 最大水面勾配が確認された時刻の津波波形（空間分布）

(2) 海底の露出範囲

柏崎刈羽原子力発電所における基準津波の特性の一つとして、引き波時に港湾内の海底が露出するという特徴がある（図 4.7-4 に港湾内の露出範囲を示す。）。図 4.7-4 に示す港湾内の海底露出が確認されるのは、基準津波 2 の地震発生後 120 分付近となり、この際漂流物が上記海底露出範囲に存在した場合、当該漂流物は「直近海域」からの漂流物となる。

以上を踏まえ、表 4.7-2 に示す各漂流物の配置を整理すると、航行不能船舶及び保安林以外の漂流物については大湊側港湾内、大湊側海岸線等にて発生する漂流物であり、基準津波 2 の地震発生後 120 分付近で港湾内の海底露出範囲に含まれる大湊側港湾内に存在する可能性を否定できないため、それらについては海底露出範囲の観点で、「直近海域」からの漂流物として整理する。

一方で、航行不能船舶及び保安林については発電所港湾外からの漂流物であり、港湾内の海底露出範囲に存在する時期が限定的であると考えられることから、基準津波 2 の地震発生後 120 分付近における漂流物の挙動を、流向・流速・軌跡シミュレーションに係る検討を実施することで確認した。

検討結果詳細については添付資料 2(a) に示し、ここでは軌跡シミュレーションの結果を抜粋して図 4.7-5 に示す。

上記検討の結果、航行不能船舶及び保安林については基準津波の 2 の地震発生後 120 分付近において、港湾内の海底露出範囲には存在しないことが確認されたため、海底露出範囲の観点では「直近海域」からの漂流物ではないと整理する。

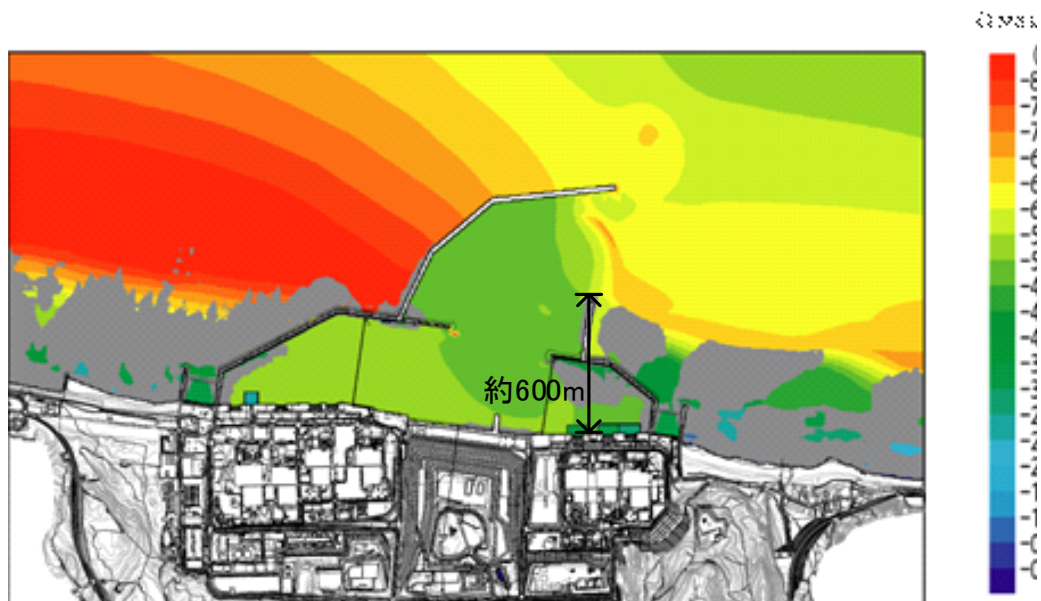
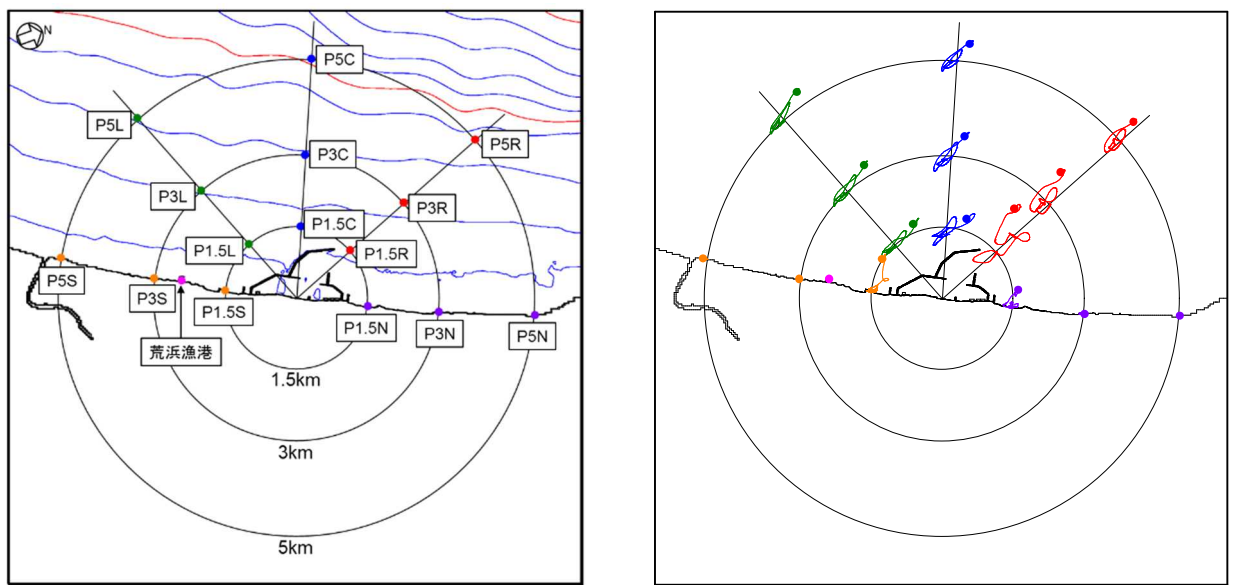


図 4.7-4 基準津波における海底露出範囲（基準津波 2 における最低水位分布）



<初期配置>

<117分時点の配置>

図 4.7-5 港湾内海底露出時の航行不能船舶及び保安線の挙動

(3) 気中衝突の発生有無

「4.7.3 衝突評価対象物（被衝突体）の特性」に記載のとおり、海水貯留堰の天端高さは T. M. S. L. -3.5m であり、通常時は海水に没水している構造となる。

一方で、引き波時の一部で港湾内の水位が T. M. S. L. -3.5m を下回ることとなり、その際に海水貯留堰への衝突事象が発生する場合、その衝突事象は気中衝突となる。

気中衝突は、港湾内の水位が T. M. S. L. -3.5m を下回っている（取水口前面水位が T. M. S. L. -3.5m まで低下している）タイミングにおいて漂流物が海水貯留堰近傍に存在する場合に発生するものと考えられるが、ここでは前述の港湾内の露出範囲に加え、図 4.7-6 に示す港湾内の流況を考慮し、図 4.7-7 に示す範囲を海水貯留堰の近傍（「直近海域」）として扱い、それ以外の範囲を「前面海域」として取り扱うこととする。

表 4.7-2 に示す各漂流物のうち、航行不能船舶及び保安林以外の漂流物については「(2) 海底の露出範囲」の記載と同様に、取水口前面の水位が T. M. S. L. -3.5m まで低下している期間に上記「直近海域」に存在する可能性を否定できないため、それらについては気中衝突の発生有無の観点で、「直近海域」からの漂流物として整理する。

一方で、航行不能船舶及び保安林については発電所港湾外からの漂流物であり、上記「直近海域」に存在する時間が限定的であると考えられることから、基準津波 1~3 について、取水口前面水位が T. M. S. L. -3.5m まで低下している期間の漂流物の挙動を、流向・流速・軌跡シミュレーションに係る検討を実施することで確認した。

検討結果詳細については添付資料 2(b) に示し、ここでは各基準津波の取水口前面における水位時刻歴及び地震発生後 12 時間までの軌跡シミュレーションの結果を図 4.7-8 及び図 4.7-9 に示す。図 4.7-8 及び図 4.7-9 に示すとおり、基準津波 2 の防波堤ありケースにおいて、取水口前面水位が T. M. S. L. -3.5m まで低下する期間があるとともに、いずれかの時間帯で漂流物が「直近海域」に侵入する可能性があることが確認されたため、上記ケースについて、取水口前面水位が T. M. S. L. -3.5m まで低下する期間における漂流物の挙動詳細を検討した（図 4.7-10 参照）。

上記挙動の詳細検討により、基準津波 2 の防波堤ありケースにおいて取水口前面水位が T. M. S. L. -3.5m まで低下する地震発生後 120 分付近においては、津波第二波後の引き波及び津波第三波による押し波・引き波に応じて港湾外の主たる流れが変化し、長期間一様な流れとなっておらず、この期間においては港湾外の漂流物（航行不能船舶及び保安林）は「直近海域」に侵入しないことが確認された。

したがって、航行不能船舶及び保安林については気中衝突の発生有無の観点では「直近海域」からの漂流物ではないと整理する。

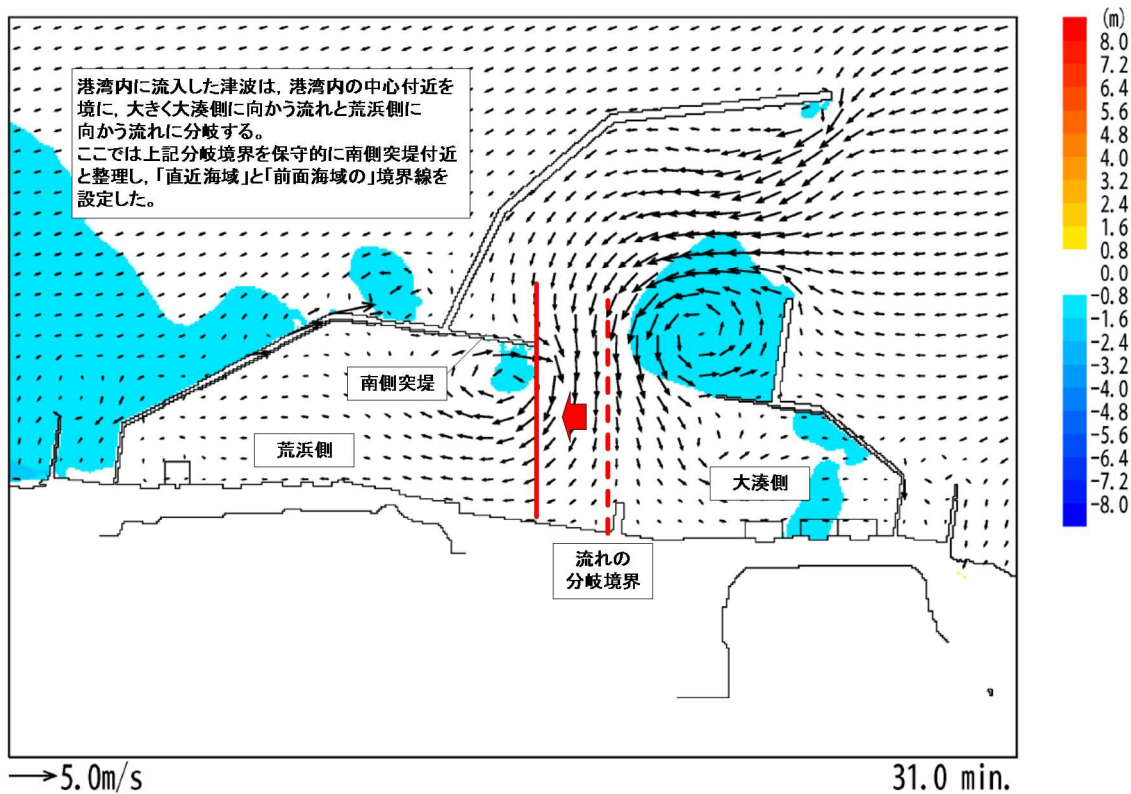


図 4.7-6 港湾内の流況（基準津波 1 防波堤あり 31 分を抜粋）

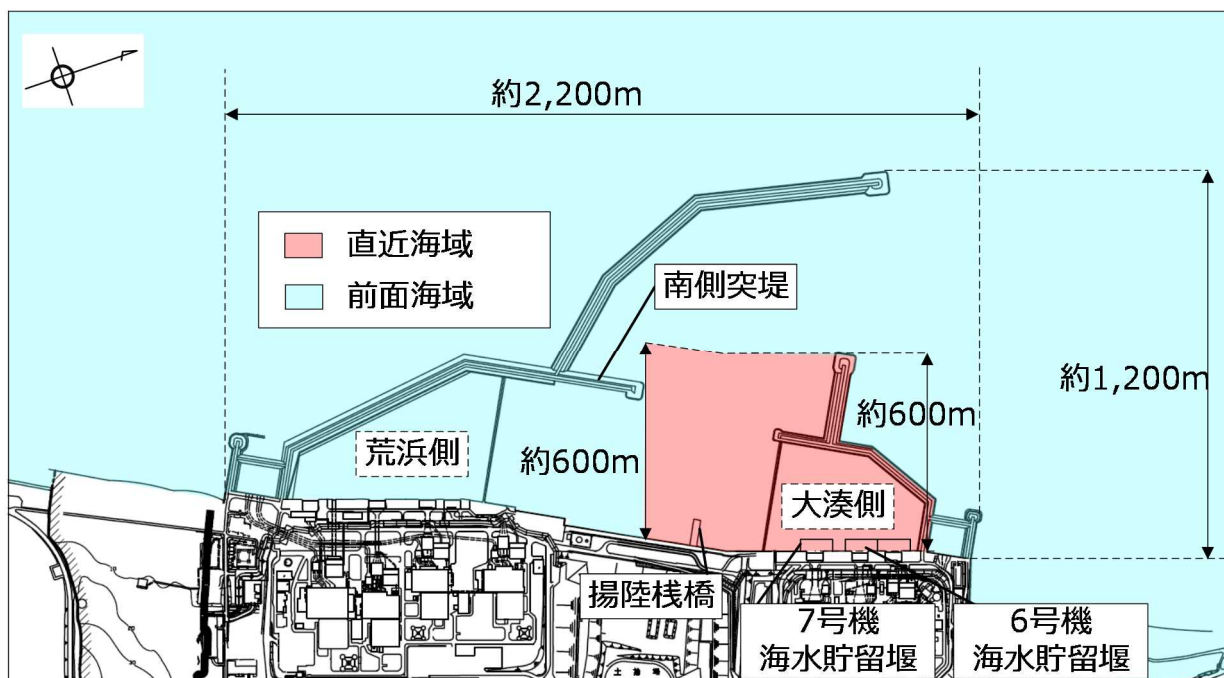


図 4.7-7 気中衝突有無の評価における「直近海域」と「前面海域」の整理

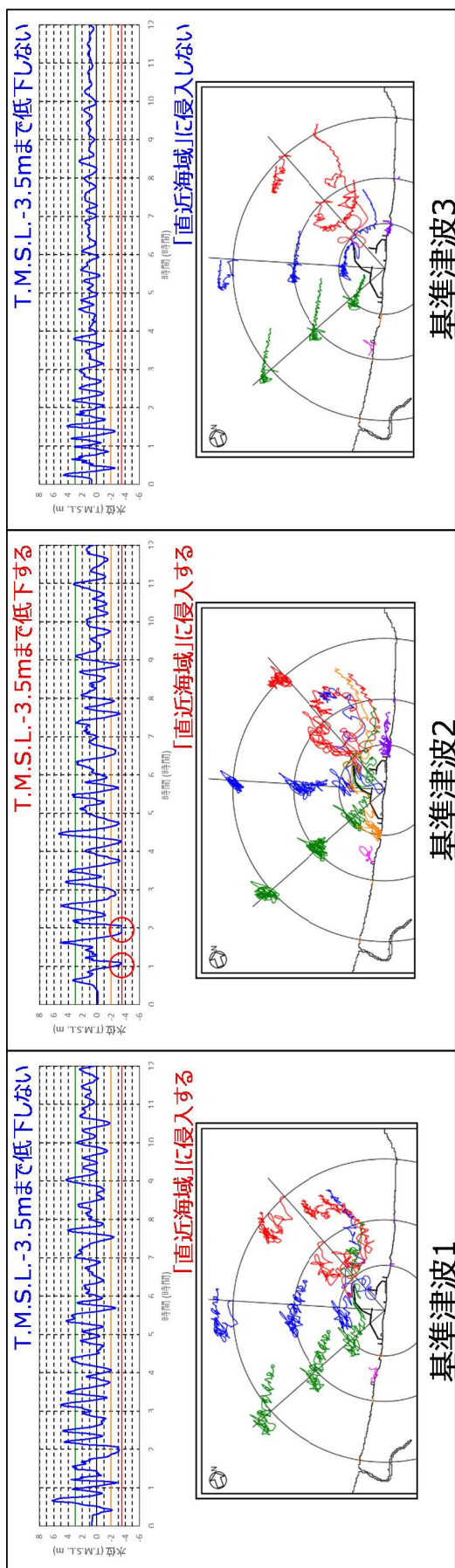


図 4.7-8 地震発生後 12 時間の発電所周辺の漂流物の挙動 (防波堤ありケース)

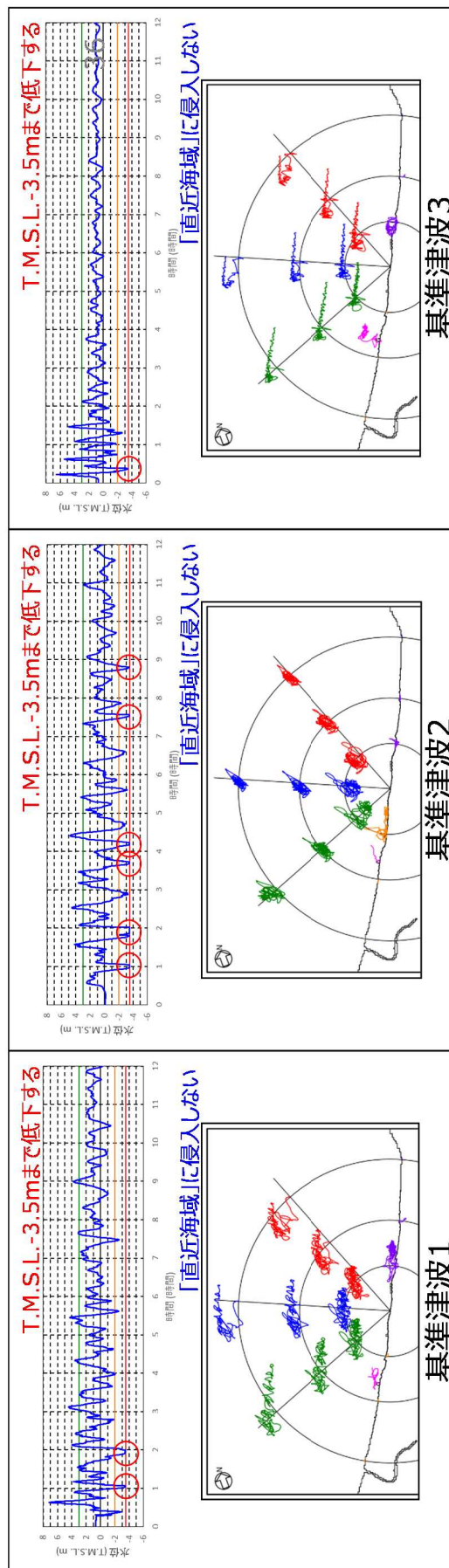


図 4.7-9 地震発生後 12 時間の発電所周辺の漂流物の挙動 (防波堤なしケース)

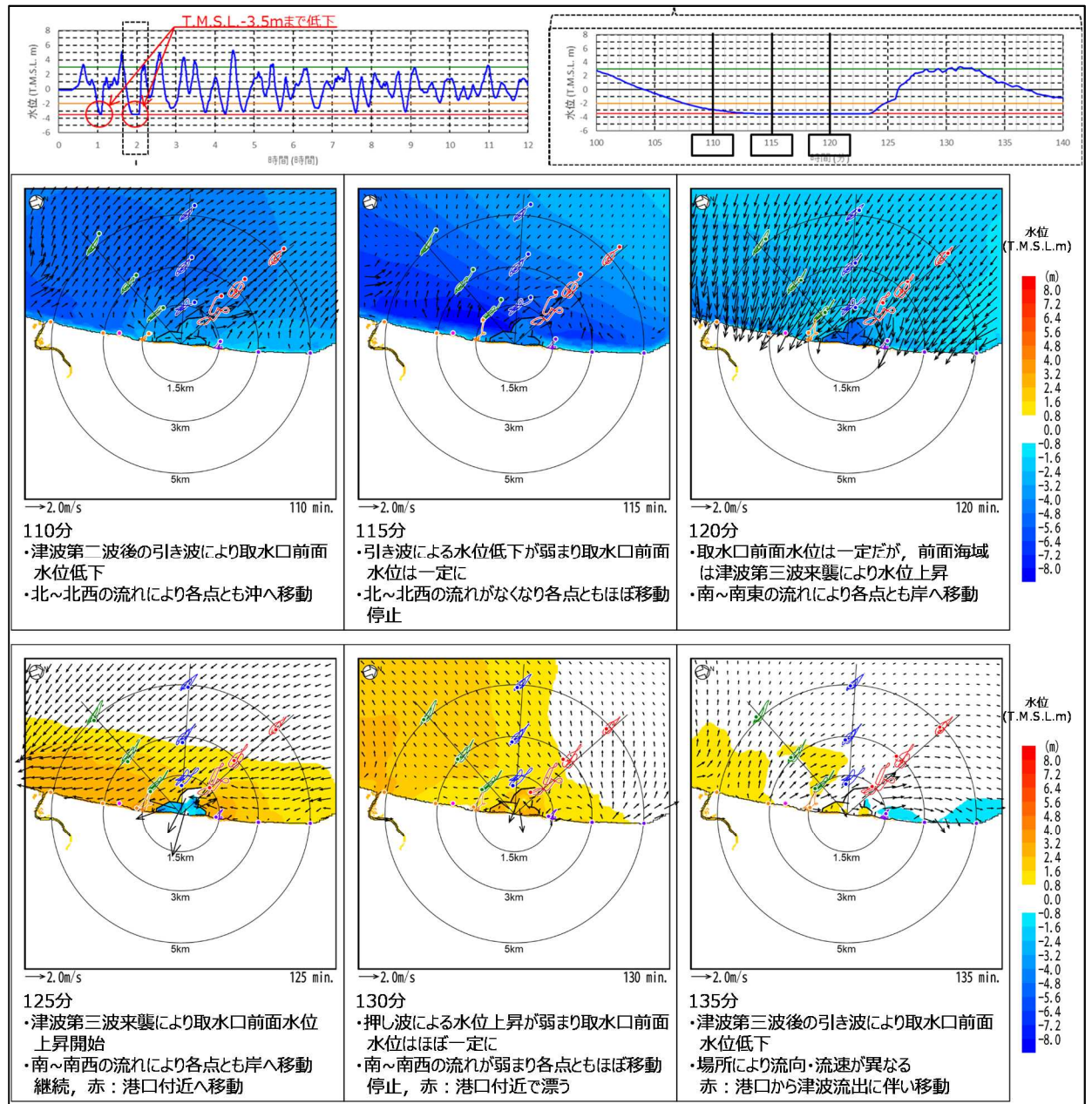


図 4.7-10 発電所周辺の漂流物の挙動に係る詳細検討 (基準津波 2 防波堤ありケース)

4.7.5.3 衝突荷重算定式の選定結果 (浮遊状態漂流物)

以上の検討を踏まえ、漂流物の存在位置及び漂流物の種類、材質等による包含関係を考慮し、具体的に衝突荷重を算定する浮遊状態の漂流物と適用式を表 4.7-5 に整理して示す。

表 4.7-5 衝突荷重算定式の選定結果 (浮遊状態の漂流物)

設置場所情報		種類	内容・名称・構造等	重量	漂流物の存在位置	包絡関係	算出対象	適用式
海域	構外	船舶	発電所近傍で航行不能となった船舶	約 15t	前面海域	—	○	道路橋示方書 (2002)
	構内	船舶	作業船 (ゴムボート)	1t 未満	直近海域	軽自動車に包絡	×	—
陸域		車両	軽自動車	1t 以下	直近海域	—	○	FEMA (2012)
		資機材	ユニットハウス	1t 未満	直近海域	軽自動車に包絡	×	—
	構内	資機材	角材, ホース, カラーコーン	数 kg	直近海域	軽自動車に包絡	×	—
		資機材	ユニットハウス	数 kg	直近海域	軽自動車に包絡	×	—
		資機材	角材, ホース, カラーコーン	数 kg	直近海域	軽自動車に包絡	×	—
		植生	保安林	約 140kg	前面海域	—	○	道路橋示方書 (2002)

4.7.5.4 その他の衝突モードに係る整理

浮遊状態での衝突とは異なった形態での衝突となる、「滑動状態での衝突」及び「直接落下による気中衝突」について、浮遊状態での衝突による荷重との包絡関係及び事象発生有無について以下のとおり検討を行った。

(1) 滑動状態での衝突について

海底を滑動するものの衝突荷重算定式に関する知見は比較的少ないが、FEMA (2019) によれば、漂流物の衝突に関して最新の ASCE/SEI 7-16 (米国土木学会基準, 2016) に従うよう記載されており、ASCE/SEI 7-16 の中で、流速 4m/s の条件下で 2,270kg の石材・コンクリート殻が海底を滑動する際の衝突荷重が例示されている。

上記を参考とし、表 4.7-2 に示す滑動状態での漂流物のうち、最も重量の大きいバキューム車 (14t) について図 4.7-11 に示すとおり滑動状態での衝突荷重を算定した結果、その荷重は 168kN となり、後述する軽自動車が浮遊状態で衝突する際の荷重 (499kN) に比べ小さいことから、滑動状態での衝突については影響が小さいものと判断した。

なお、図 4.7-11 に示す算定過程においては、保守的に車両の有効軸剛性は石材・コンクリート殻の軸剛性と同等という仮定のもと算定を実施している。したがって、車両の有効軸剛性を精緻に考慮して衝突荷重を算定した場合、荷重は 168kN よりもさらに小さくなるものと考えられる。

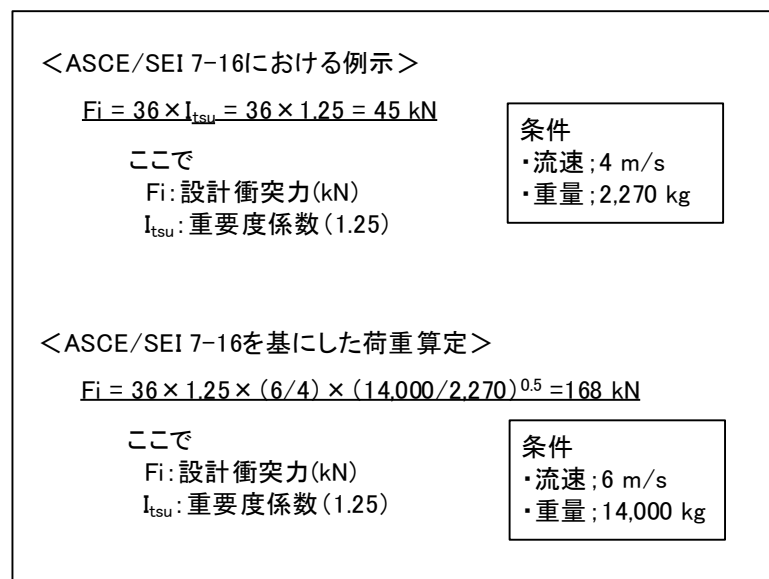


図 4.7-11 ASCE/SEI 7-16 を基にした滑動での衝突荷重算定結果

(2) 直接落下による気中衝突について

海水貯留堰の天端が露出している間に、大湊側護岸部を滑動する漂流物が海水貯留堰に向けて落下した場合、気中衝突が発生し、衝撃的な荷重が発生する可能性があるため、上記事象の発生有無について検討を行った。

図 4.7-12 に基準津波 2 の防波堤ありケースにおける地震後 95 分から 120 分における大湊側護岸部の水位時刻歴と取水口前面水位の時刻歴の関係を示す。

図 4.7-12 より、取水口前面水位が T.M.S.L. -3.5m となり、海水貯留堰が露出する時刻 (113 分頃) には既に大湊側護岸部の水位は概ね 0m となっており、漂流物の滑動は停止しているため、この際に海水貯留堰に向けて漂流物が落下する事象は発生しない。

また、大湊側護岸部で漂流物が滑動し、海域に落下する可能性がある時間帯 (概ね 104 分まで) は、取水口前面の水位が海水貯留堰の天端標高 T.M.S.L. -3.5m よりも高いため、仮にこの時点で漂流物が海域に落下した場合でも、気中衝突のような衝撃的な荷重は発生しない。なお、「基準津波 2 の防波堤あり」以外のケースに係る検討を添付資料 3 に示すが、いずれのケースも「基準津波 2 の防波堤あり」のケースと同様の傾向を示すことを確認した。

以上より、直接落下による気中衝突は発生しないものと判断した。

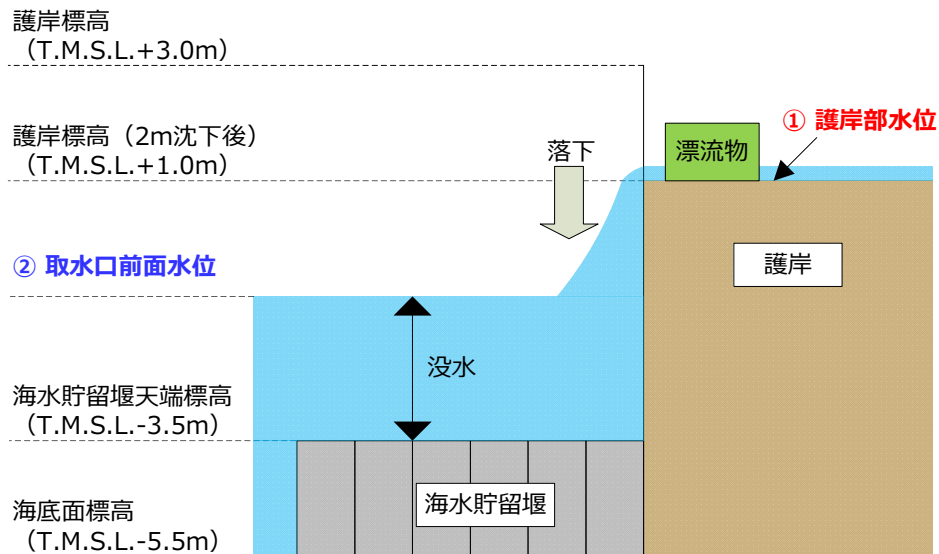
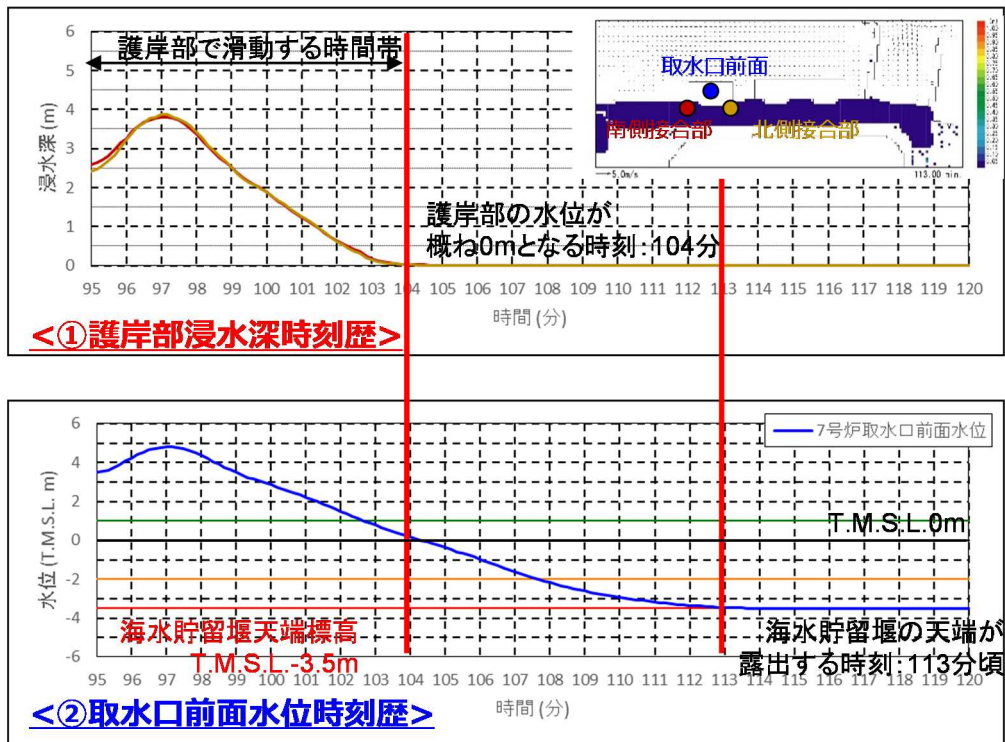


図 4.7-12 大湊側護岸部の浸水水位と取水口前面水位との関係

4.7.6 漂流物の衝突荷重算定における設計上の配慮

(1) 漂流物の衝突荷重算定で用いる流速

設定方法の詳細は「4.1 設計に用いる遡上波の流速」に示すが、漂流物の衝突速度は、大湊側港湾内全域における海水貯留堰方向の流速を評価し、その中の最大津波流速を設定する。抽出された最大津波流速は 5.64 m/s となるため、保守的に切り上げ 6.0 m/s とする。

(2) 漂流物の衝突荷重を作用させる標高

設計上最大モーメントとなり最も厳しくなる海水貯留堰の天端に漂流物の衝突荷重を作用させる。

(3) 津波荷重と漂流物の衝突荷重の組合せについて

津波荷重と漂流物の衝突荷重の組合せについては、実際に施設に作用する荷重としては、津波による最大荷重と漂流物による最大荷重が同時に作用する可能性は小さいものの、設計上の配慮として津波による最大荷重（越流直前の波力）と漂流物による最大荷重（最大流速時における漂流物の衝突荷重）の組合せを考慮する。

4.7.7 漂流物衝突荷重の算定結果

以上の整理を踏まえた漂流物衝突荷重の算定結果を表 4.7-6 に示す。（算定過程については添付資料 4 参照）

表 4.7-6 漂流物衝突荷重の算定結果

状態	種類	内容・名称	重量	漂流物の存在位置	荷重算定方法	漂流物衝突荷重 [kN]
浮遊	船舶	航行不能船舶	15t	前面海域	道路橋示方書 (2002)	89
	車両	軽自動車	1t 以下	直近海域	FEMA (2012)	499
	流木	保安林	140kg	前面海域	道路橋示方書 (2002)	1
					FEMA (2012)	(参考値*) 143
					松富ほか (1999)	(参考値*) 424
有川ほか (2010)	(参考値*) 274					
滑動	車両	バキューム車	14t	—	4.7.5.3 参照	(参考値) 168

注記* 保安林については前述のとおり「前面海域」からの漂流物と整理できるため、道路橋示方書にて衝突荷重を算定するが、基準津波発生時に、既に港湾内に流木（津波由来のものではない。）が存在する可能性を考慮し、参考として流木の重量を保安林の重量と同等と仮定し、FEMA(2012)等による算定値を記載する。なお、それらの荷重はいずれも軽自動車による荷重に包絡される。

ソリトン分裂波や砕波発生に関する検討

1. 概要

本資料では、4.7.2「衝突評価対象物（被衝突体）の選定」にて選定された海水貯留堰に考慮する漂流物の衝突荷重の算定において、漂流物（衝突物）が分裂波または砕波が発生するような波に乗った場合、漂流物の衝突荷重に影響を及ぼす可能性があることから、発電所のサイト特性を踏まえ、津波による分裂波および砕波の発生の有無を確認する。

ソリトン分裂現象は、伝播する波動の先端において、元の波動より周期の短い波が現れる現象である。ソリトン分裂した波は、本体より波高が大きく、周期が10数秒と短いため砕波現象を起こすことが多い。また、池野ら（2001年）¹⁾は「各漂流物の衝突直前の水平移動速度は、上流側と下流側の静水位差が大きくなり発生段波の波高が大きくなるとともに増加している。」と指摘しており、ソリトン分裂現象においても波高の増幅に伴い、漂流物の移動速度は大きくなると考えられる。

過去の事例では、日本海側では日本海中部地震(1983)の際に秋田県峰浜村の海岸でソリトン分裂波が発生したとされているが、柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺の海域についてはソリトン分裂波は観測されていない。また、峰浜村の海岸は海底勾配が1/200程度の遠浅海岸である²⁾点で海底勾配が1/75程度の柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺海域とは異なる。なお、北海道南西沖地震(1993)を代表とする日本海側の過去の津波地震ではソリトン分裂の発生は確認されていない。

2. 検討方針

本資料では、図4.7添1-2-1に示す検討フローに従って検討を行う。

ソリトン分裂に関しては、「防波堤の耐津波設計ガイドライン³⁾」において、津波と海底地形の特徴からその発生有無を判定する方法が示されており、本検討においても、第一ステップとして上記判定法を用いる。ガイドラインに基づく評価により、ソリトン分裂が発生する可能性がある場合や局所的に海底勾配が緩やかであることが認められる場合については、数値計算による評価を行うこととする。なお、安田ほか（2006）⁸⁾は、ソリトン分裂が発達するためには十分な伝播距離が必要であるとしている。

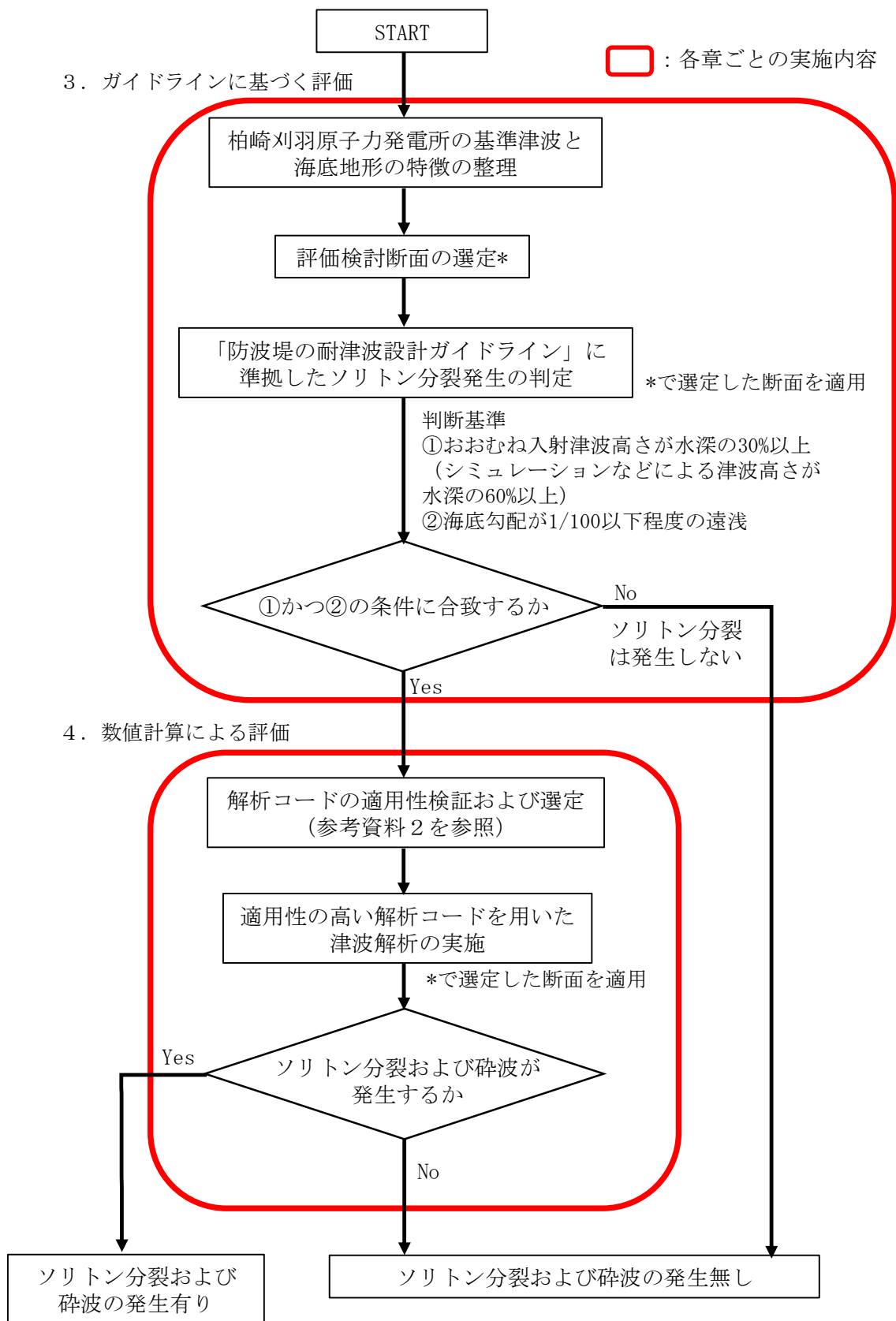


図 4.7 添 1-2-1 検討フロー

3. ガイドラインに基づく評価

3.1 検討概要

沖合から伝播してくる津波がサイト前面においてソリトン分裂波を伴うか否かの判定について「防波堤の耐津波設計ガイドライン³⁾」では、ソリトン分裂が発生する条件は、おおむね入射津波高さが水深の30%以上（シミュレーション等による津波高さが水深の60%以上）で、かつ海底勾配が1/100以下程度の遠浅である場合とされている。このことから、以下の2つの条件について当てはまるか否かを検討する。

- ① おおむね入射津波高さが水深の30%以上（シミュレーション等による津波高さが水深の60%以上）
- ② 海底勾配が1/100以下程度の遠浅

3.2 柏崎刈羽原子力発電所の基準津波の特徴

柏崎刈羽原子力発電所の基準津波は、「地震による津波」、「地すべりによる津波」、「地震による津波と海底地すべりによる津波の組合せ」の中から選定し、取水口前面および荒浜側防潮堤内敷地において最高水位を示す津波を基準津波1、取水口前面において最低水位を示す津波を基準津波2、荒浜側防潮堤前面において最高水位を示す津波を基準津波3と定義している。

基準津波1は、「地震と地すべりの組合せによる津波」のうち、日本海東縁部（2領域モデル）と海底地すべりLS-2の組合せケース、基準津波2は、「地震による津波」のうち、日本海東縁部（2領域モデル）のケース、基準津波3は、「地震と地すべりの組合せによる津波」のうち、海域の活断層（5断層連動モデル）とLS-2の組合せケースである。

なお、基準津波策定位置は、敷地前面海域の海底地形の特徴を踏まえ、施設からの反射波の影響が微小となる水深100m（敷地の沖合約7km）の地点を選定している。

3.3 柏崎刈羽原子力発電所の海底地形の特徴

本検討の対象となる柏崎刈羽原子力発電所の海底地形の平面図を図4.7添1-3.3-1に示す。当サイトの海底勾配は、敷地から基準津波策定位置までの区間（約7km）ではほぼ一定である。

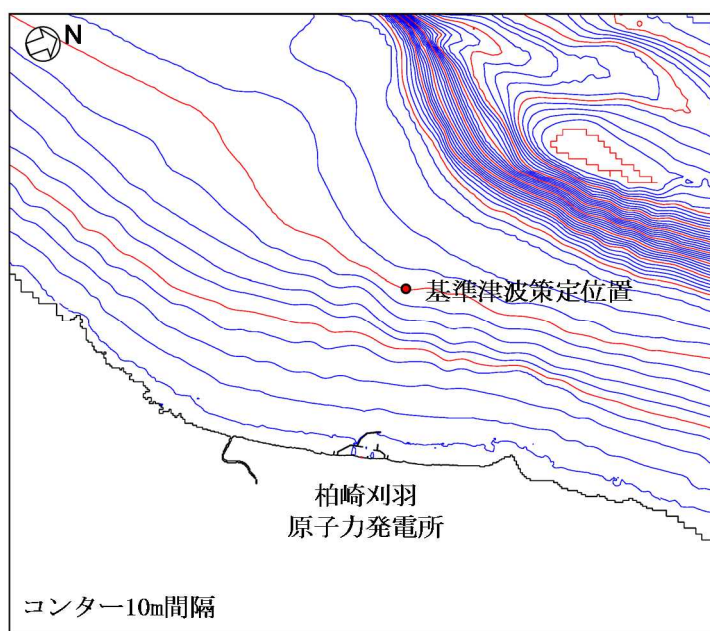


図 4.7 添 1-3.3-1 海底地形平面図

3.4 検討断面の選定

ソリトン分裂発生の有無の検討に用いる評価対象断面は、津波が等深線に直交して進行する性質および当サイトの海底勾配の特徴を考慮し、図 4.7 添 1-3.5-1 に示す基準津波策定位置から等深線に概ね直交して敷地に至る断面を、柏崎刈羽原子力発電所全体の代表的な断面とした。断面の海底地盤高さは「設置変更許可申請書」第 5 条：津波による損傷の防止（以下、「5 条まとめ資料」という。）の津波シミュレーションで用いた地形モデルを基に設定している。なお、5 条まとめ資料では海域は一般財団法人 日本水路協会(2011)、一般財団法人 日本水路協会(2008~2011)、深淺測量等による地形データを用いている。

3.5 ソリトン分裂発生の判定結果

条件①を確認するため、5 条まとめ資料で実施した基準津波 1 から 3 を対象とした津波シミュレーションの結果を引用した。このとき、前面海域のうち最も津波高さが大きくなる 7 号機取水口前面に着目して、津波高さと水深の関係を整理した結果を表 4.7 添 1-3.5-1 に示す。同表より、津波シミュレーションによる入射津波高さは水深の 60%以上であり、①の条件に合致する。

条件②の海底勾配については、「3.4 検討断面の選定」で選定した代表的な断面について検討したところ、図 4.7 添 1-3.5-1 に示す敷地周辺の海底勾配において、基準津波策定位置から護岸位置までの平均的な海底勾配は約 1/75 であることを確認した。しかしながら、基準津波策定位置から護岸までの区間において、局所的に海底勾配が 1/100 を下回る箇所があることから、②の条件に合致しないとはいえない。

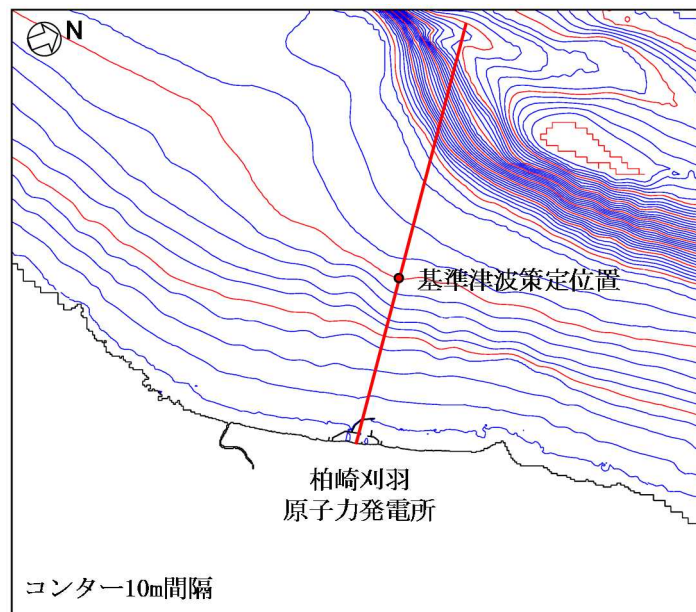
過去の事例や文献では、日本海側では日本海中部地震（1983）時に、秋田県峰浜村の海底勾配 1/200 程度の遠浅海岸で、ソリトン分裂が発生したとされているが、柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺海域では観測されていない。また、安田ほか(2006)⁸⁾は、ソリトン分裂が発達するためには十分な伝播距離が必要であるとしている。

以上のことから、過去の事例や文献ではソリトン分裂発生の可能性は低いと考えられるものの、ガイドラインに基づく評価では局所的に海底勾配が緩やかであり、ソリトン分裂発生の可能性を完全に否定できないため、数値計算による評価を実施することとした。

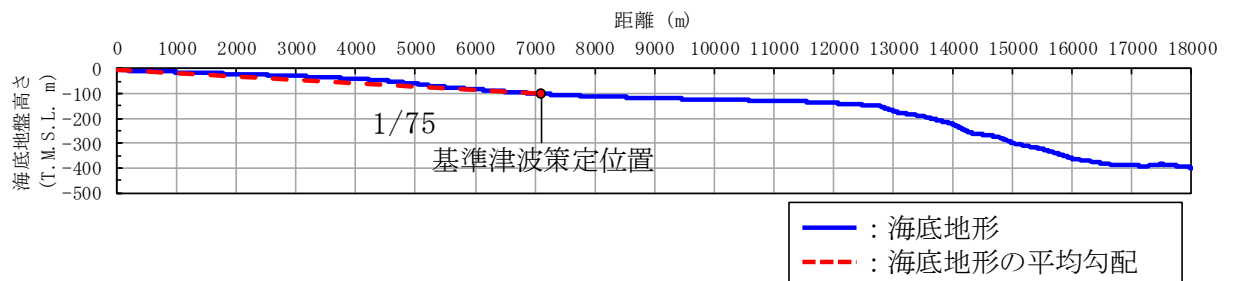
表 4.7 添 1-3.5-1 7号機取水口前面における津波高さと水深の関係

	① 海底地盤高さ	② 潮位*	③ シミュレーション による津波水位	④ 水深 (②-①)	⑤ シミュレーション による津波高さ (③-②)	⑤/④
基準津波 1	T. M. S. L. -5.5m	T. M. S. L. 0.65m	T. M. S. L. 7.2m	6.15m	6.55m	107%
基準津波 2	T. M. S. L. -5.5m	T. M. S. L. -0.12m	T. M. S. L. 5.2m	5.38m	5.32m	99%
基準津波 3	T. M. S. L. -5.5m	T. M. S. L. 0.65m	T. M. S. L. 6.6m	6.15m	5.95m	97%

注記* : 5条まとめ資料と同様に潮位のばらつきを考慮



(1) 平面図



(2) 断面図

図 4.7 添 1-3.5-1 敷地前面の海底勾配

4. 数値計算による評価

4.1 概要

「3. ガイドラインに基づく評価」に示したとおり、発電所前面の海底地形条件が基準津波策定位置から護岸までの区間において、局所的に1/100を下回る海底勾配箇所があることを踏まえ、本項では数値計算による評価を実施する。

4.2 判断基準

(1) ソリトン分裂の波形

「原子力土木委員会 津波評価部会 委員会報告⁴⁾」では、図4.7添1-4.2-2に示す大陸棚を模擬した大型造波水路を用いた水理模型実験の結果と1次元数値計算の結果を比較しており、実験で発生するソリトン分裂を数値計算によって良好に再現している。実験の詳細については参考資料3「1次元解析によるソリトン分裂に関する検討実績」に示す。また、本実験においてソリトン分裂が発生したときの波形は、「原子力発電所の津波評価技術2016⁵⁾」において図4.7添1-4.2-3のとおり示されている。同図のように遡上過程で周期の長い波形に周期の短い波形が重なる挙動を示す場合は、ソリトン分裂が発生していると判断する。なお、同図に示す各グラフの横軸(時間軸)の表示範囲は、各観測点でソリトン分裂の発生が確認できる時間で設定している。

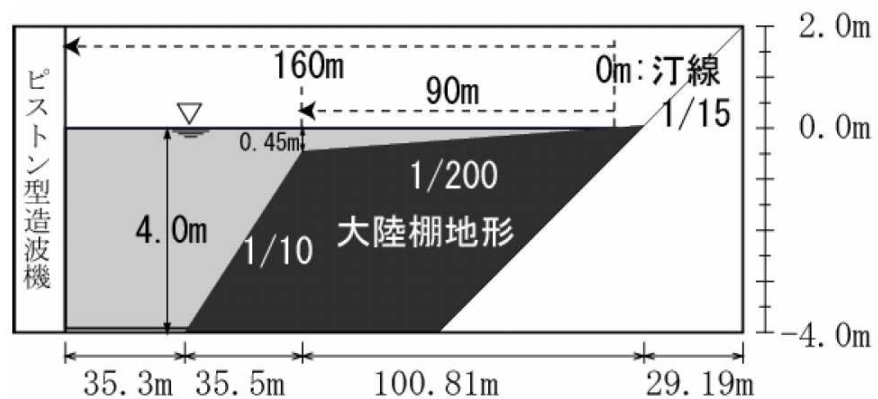


図4.7添1-4.2-2 実験水路の概要(原子力土木委員会 津波評価部会 委員会報告⁴⁾)

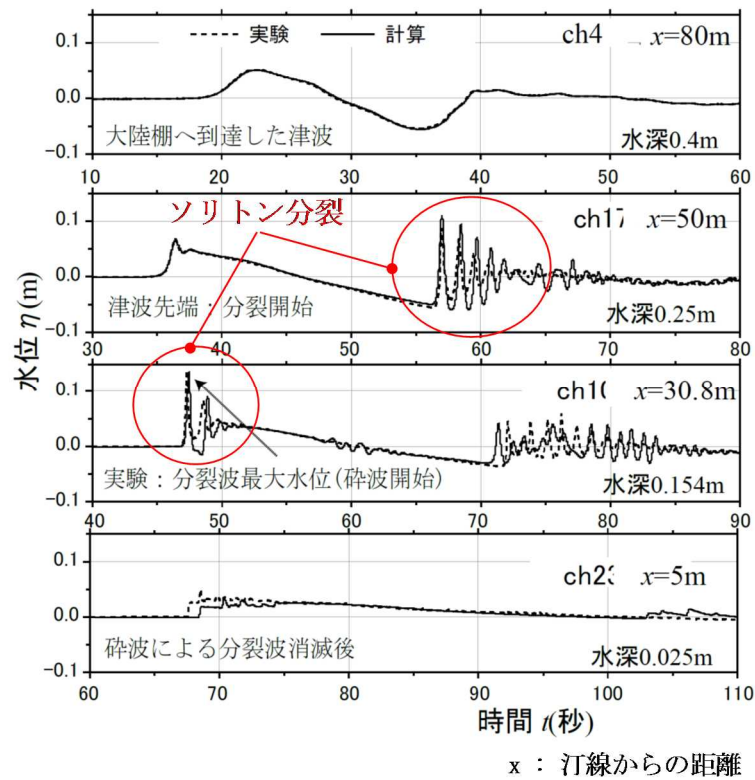


図 4.7 添 1-4.2-3 ソリトン分裂波形の例 (原子力発電所の津波評価技術 2016⁵⁾に加筆)

(2) 砕波発生の有無

図 4.7 添 1-4.2-3 では、切り立った段波形状の波が砕波していることが示されている。砕波の発生有無については、護岸方向に進行する津波に、砕波に至るような段波形状の波形が見られるかどうかで確認できる。また、「松山ら(2005)⁶⁾」では、砕波限界の水面勾配を 30 度から 40 度としているため、今回の数値計算においても水面勾配 30° を砕波の発生有無を判断する参考値とする。

4.3 検討方針

ソリトン分裂および砕波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。

参考資料2に示すとおり、代表的な解析コード（「BSNSQ」、「OpenFORM」、「CADMAS-SURF 2D」）を用いて、まずソリトン分裂および砕波の発生の再現性を検証するとともに、柏崎刈羽原子力発電所における基準津波を用いた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について検討した。

今回の評価対象となる海水貯留堰は海面下に設置されており、引波時に貯留機能を確保するための設備であるため、基準津波によって押波と引波が複数回繰り返した場合における検討が必要である。

このため、押波と引波が繰り返し到達した場合においても、護岸からの反射波等による影響が小さく、ソリトン分裂および砕波の発生有無を判断することのできる「BSNSQ」を用いて検討することとする。

なお、参考資料4「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」に解析コードの検証および妥当性確認結果を示す。

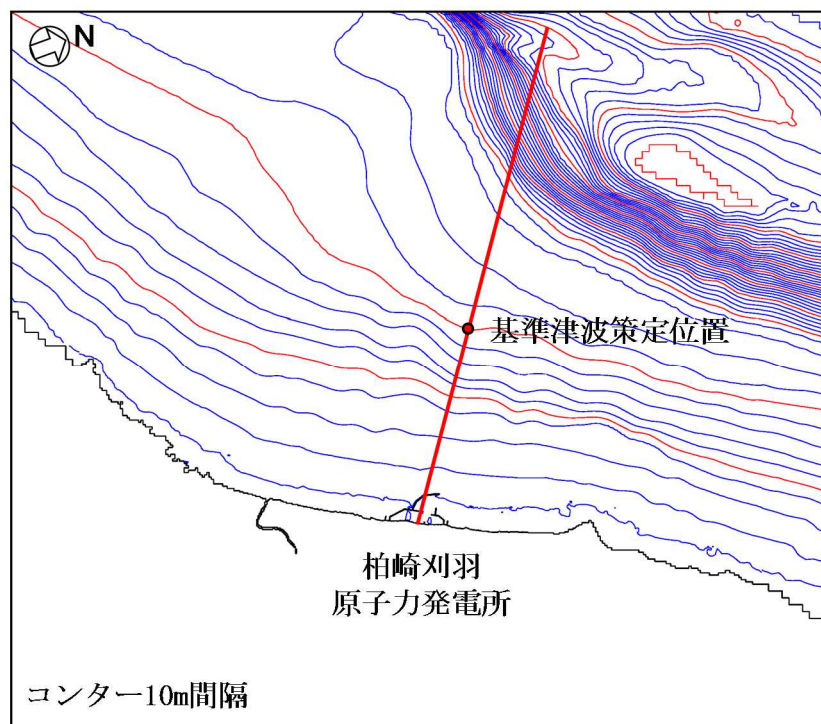
4.4 数値解析による検討

(1) 解析モデル

本検討では、ソリトン分裂波および砕波が表現可能な解析コード「BSNSQ」を使用する。

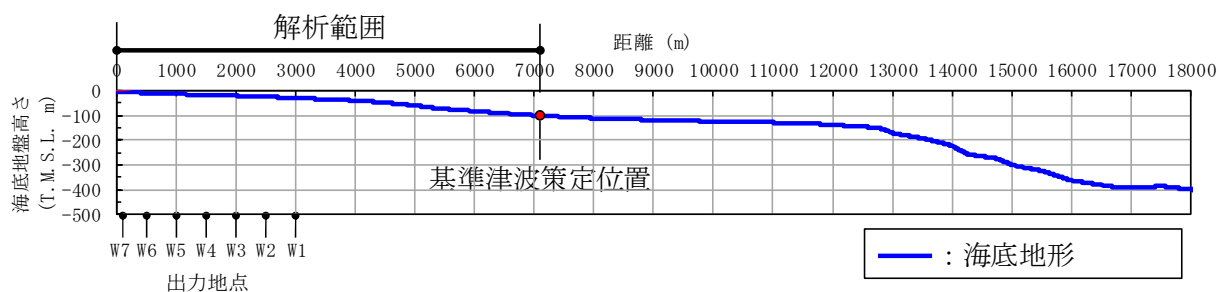
解析モデルにおいては、「3.4 検討断面の選定」で示したとおり、基準津波策定位置を通り等深線と直交する直線の断面をモデル化した。計算格子間隔は「津波浸水想定の設定の手引き⁷⁾」によると「最小計算格子間隔は10m程度より小さくすることを目安とする」との記載があることから、5条まとめ資料の津波シミュレーションの最小格子サイズと同じ5mとした。なお、基準津波策定位置から護岸までのモデル化においては、一様に最小格子サイズ5mとした。

また、ソリトン分裂および砕波の発生有無を検討する上では、防波堤をモデル化しないことにより、港湾内の水位上昇が大きくなると考えられるため、障害物となる防波堤がない状態をモデル化した。また、安田ら(2006)⁸⁾は、ソリトン分裂波は水平な海底上を伝播するにつれて波高が高くなるとしていることから、波高の増幅を保守的に評価するため、港湾内の海底地盤高さ(T.M.S.L.-5.5m)よりも浅い地形については、一定水深とした。1次元モデルによる検討断面の位置を図4.7添1-4.4-1に、1次元モデルを図4.7添1-4.4-2に示す。なお、沖合から護岸に向かって進行する津波の波形の変化を確認するため、図4.7添1-4.4-2および表4.7添1-4.4-1に示すとおり、局所的に海底勾配が1/100を下回る箇所のある沖合3kmから護岸までの範囲で、0.5km間隔の地点(W1からW6)に海水貯留堰設置地点(W7)を加えた7か所で津波波形を出力する。

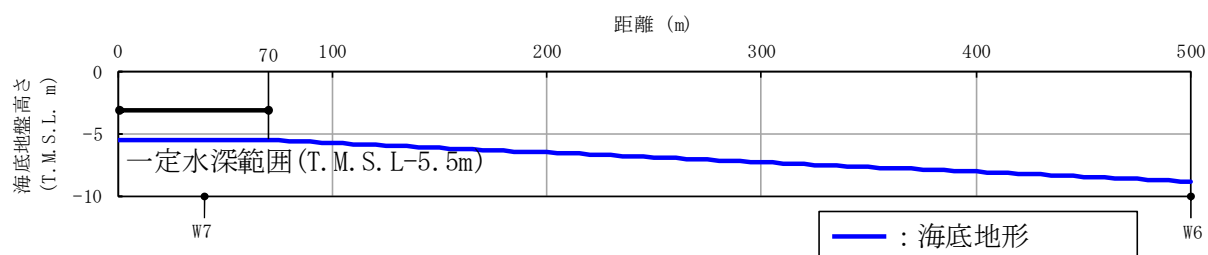


広域

図 4.7 添 1-4.4-1 検討断面の位置



全範囲



拡大

図 4.7 添 1-4.4-2 解析モデル

表 4.7 添 1-4.4-1 津波波形の出力位置

出力地点	護岸からの距離(km)
W1	3.0
W2	2.5
W3	2.0
W4	1.5
W5	1.0
W6	0.5
W7	0.04 (貯留堰設置位置)

(2) 解析条件

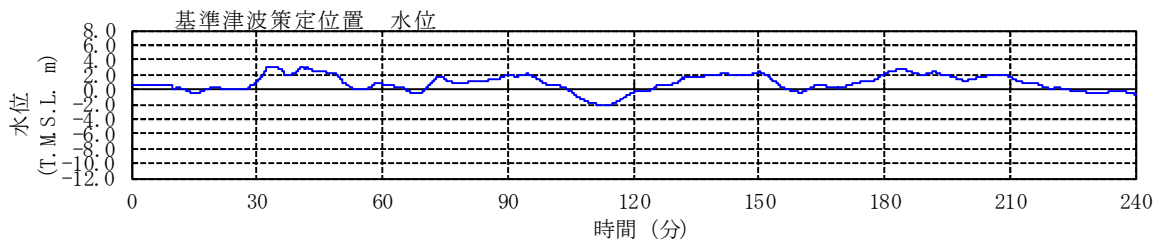
解析条件を表 4.7 添 1-4.4-2 に示す。

表 4.7 添 1-4.4-2 解析条件

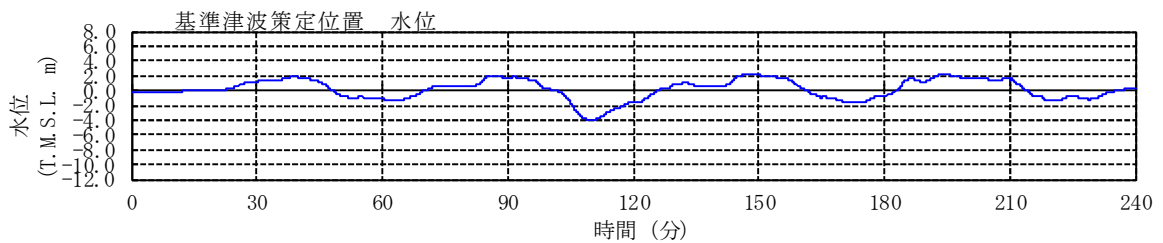
モデル化	基準津波策定位置～護岸 (防波堤はモデル化せず, 港湾内の T.M.S.L. -5.5m 以浅は, 一定水深)
計算格子間隔	5m
計算時間間隔	0.05 秒
潮位条件	朔望平均満潮位・干潮位に潮位のばらつきを考慮 基準津波 1 : T.M.S.L. 0.65m 基準津波 2 : T.M.S.L. -0.12m 基準津波 3 : T.M.S.L. 0.65m
境界条件	ソリトン分裂および砕波の発生有無を検討する上では, 海域での水位変動量が重要となることや, 陸域での護岸, 大湊側防潮堤や中央土捨場等の敷地内の現地形を踏まえ, 護岸で完全反射とした。
摩擦係数	マンニングの粗度係数 ($n=0.03\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$) * 設置変更許可申請書では, 当該発電所の津波評価を実施するにあたり, 事前に歴史津波の痕跡高の再現解析によって解析手法や地形モデル, 解析パラメータの妥当性を検証している。その際, マンニングの粗度係数の適正値を $n=0.03\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ とした。
計算時間	4 時間

(3) 入力波形

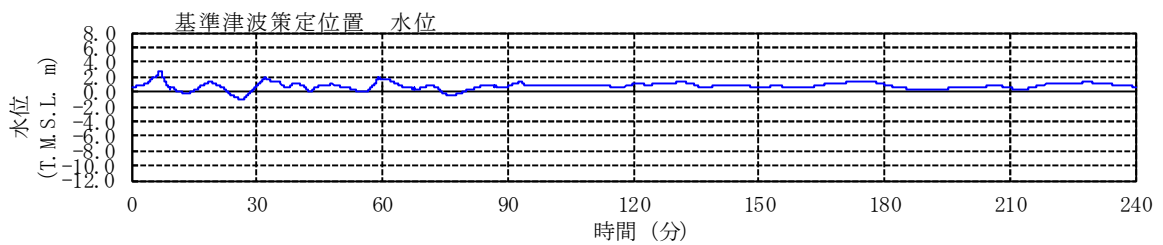
入力波形は設置変更許可申請書に示した基準津波 1 から 3 を対象とした。また、基準津波策定位置を入力位置とした。基準津波策定位置における入力波形を図 4.7 添 1-4.4-3 に示す。



基準津波 1



基準津波 2



基準津波 3

図 4.7 添 1-4.4-3 入力波形

(4) 解析結果

解析の結果として、沖合 3km から護岸まで 0.5km 間隔の地点 (W1 から W6) に海水貯留堰設置地点 (W7) を加えた 7 か所の地点における水位の時刻歴波形を出力した。本検討では海水貯留堰を評価対象としていることから、引波により海水貯留堰が露出した後の押波に着目してソリトン分裂の発生有無を確認した。また、「津波の辞典(平成 19 年 11 月)⁹⁾」において、ソリトン分裂は波が切り立ってきた箇所が発生すると示されていることから、基準津波ごとに水位時刻歴波形において波が切り立っているように見える時間帯についても、ソリトン分裂発生の有無を確認した。全出力点の水位時刻歴グラフについては参考資料 1「1 次元津波水位解析によるソリトン分裂および砕波の発生有無の確認」(以下、参考資料 1 という。)に示す。

さらに、水面勾配から砕波発生の有無を確認するため、水位の空間分布を出力した。ここで空間分布とは、ある時刻の波形の断面図を示したものである。なお、各基準津波の空間分布の詳細については参考資料 1 に示す。

a. 基準津波 1

基準津波 1 の出力点ごとの水位時刻歴波形を図 4.7 添 1-4.4-4 に示す。同図に示す波形の中で、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、海水貯留堰位置 (W7) で水位が海水貯留堰天端高さ (T. M. S. L-3.5m) を下回り、かつ、水面勾配が大きい 60 分から 70 分の時間範囲についてソリトン分裂および砕波の発生有無を確認した。着目時間範囲を図 4.7 添 1-4.4-5、着目時間範囲を拡大した水位時刻歴波形を図 4.7 添 1-4.4-6 に示す。また、水位の空間分布 (全景) の時間変化を図 4.7 添 1-4.4-7 に、水面勾配が最大となる時点の水位の空間分布および水面勾配を図 4.7 添 1-4.4-8 から図 4.7 添 1-4.4-11、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 添 1-4.4-12 に示す。ここで、図 4.7 添 1-4.4-10、図 4.7 添 1-4.4-11 に示す水面勾配は護岸で反射した波が沖合に向かうときのものである。なお、その他の着目時間における検討結果は参考資料 1 に示す。

算出した水位時刻歴波形では、「4.2 判断基準」で示したソリトン分裂と考えられるような波形は見られない。また、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。さらに、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 0.41° と十分に小さいことから、砕波も発生しないと判断した。

以上より、基準津波 1 のケースではソリトン分裂および砕波は発生しないことを確認した。

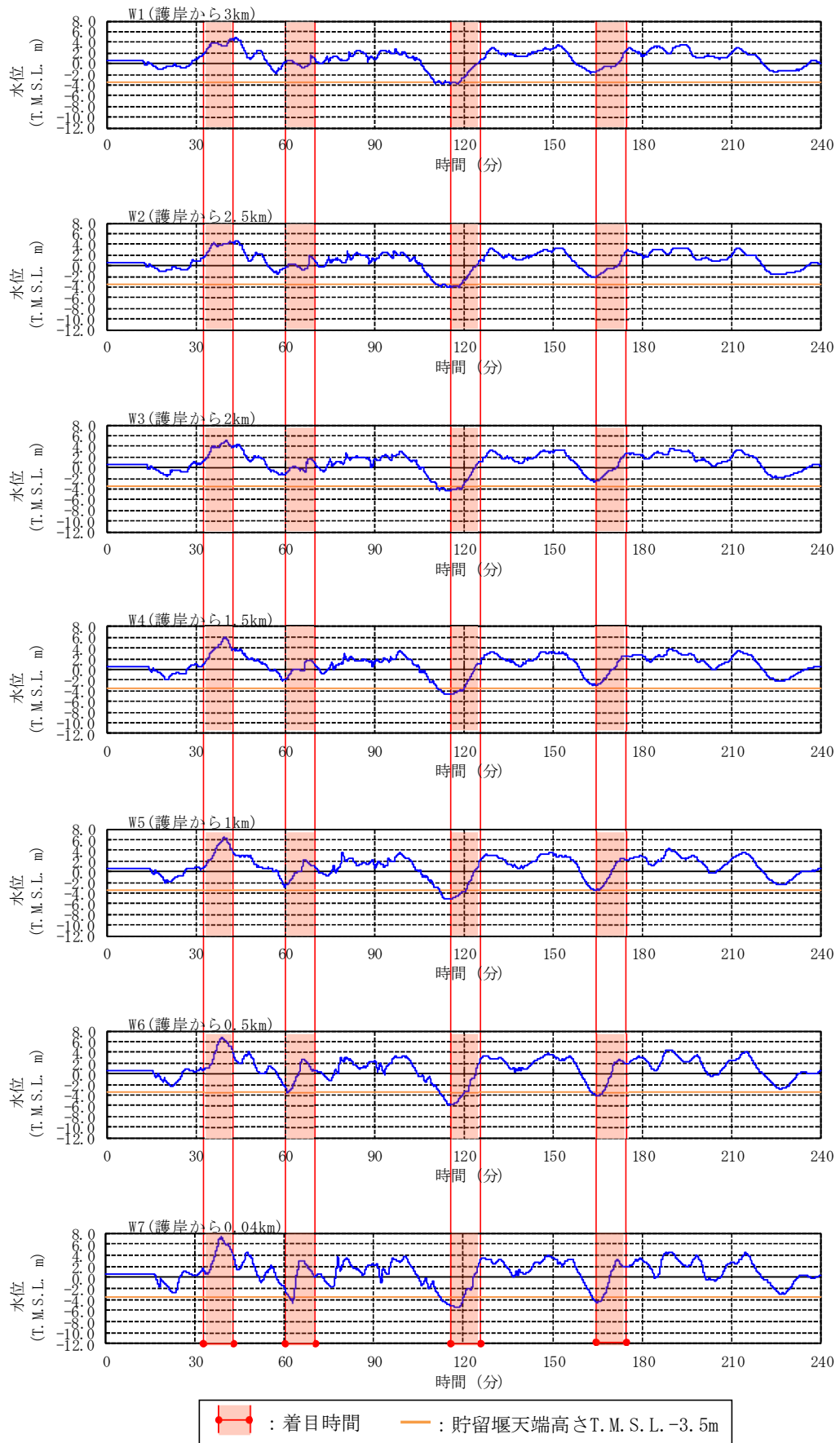


図 4.7 添 1-4.4-4 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [0-240 分]

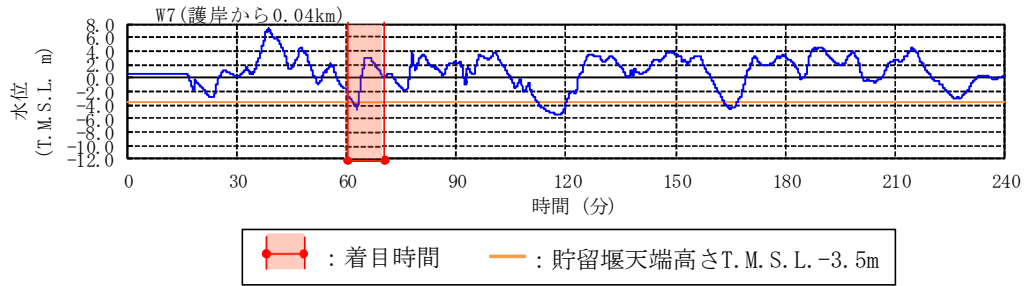


図 4.7 添 1-4.4-5 水位時刻歴波形の着目時間範囲 (基準津波 1)

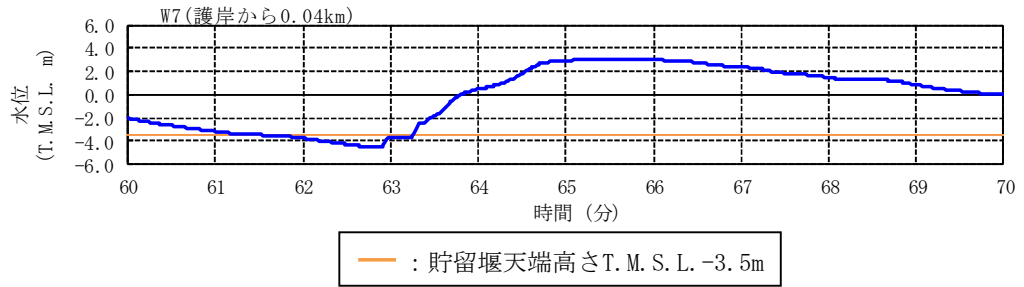


図 4.7 添 1-4.4-6 水位時刻歴波形 (基準津波 1) [60-70 分を拡大]

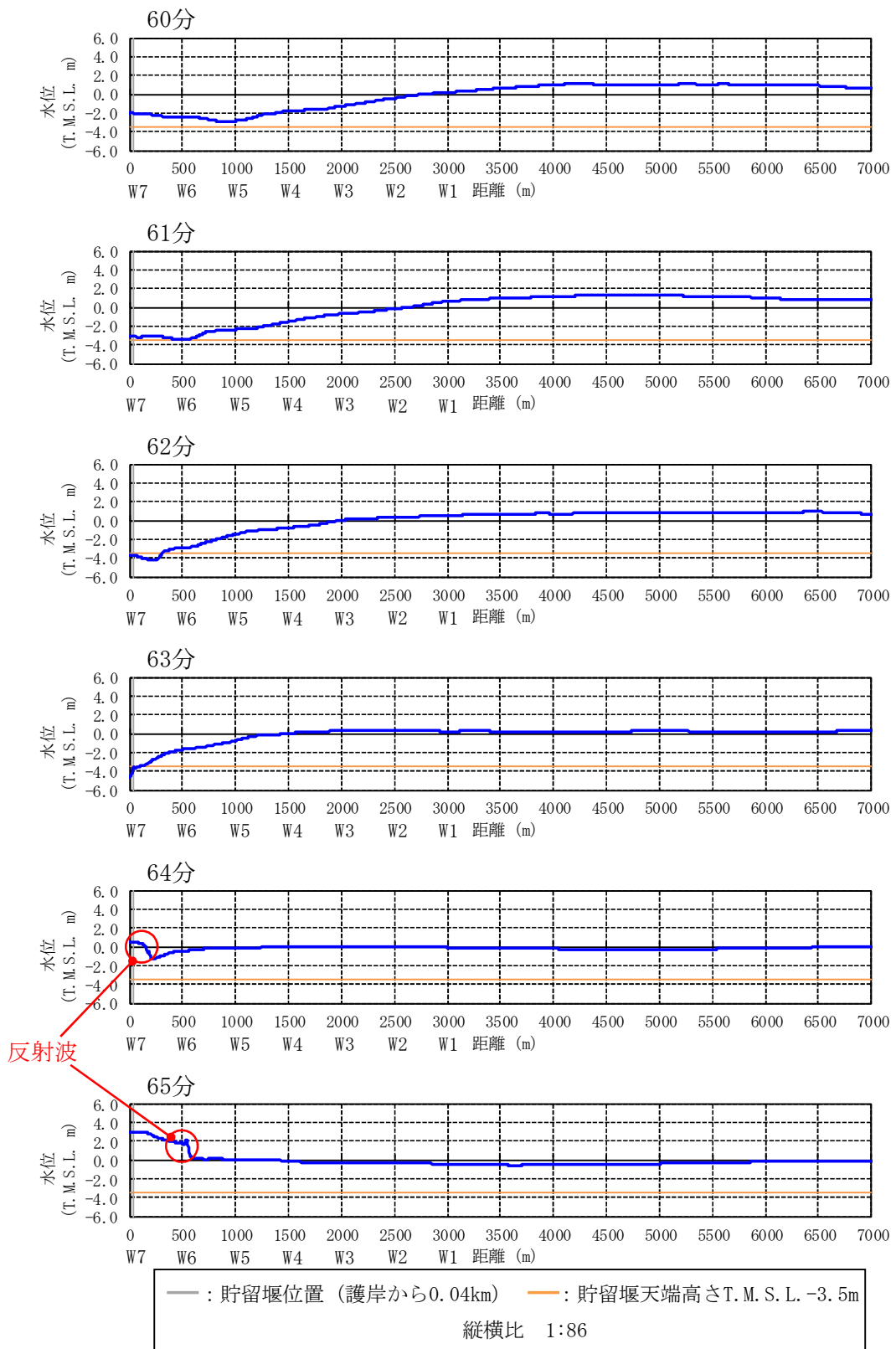


図 4.7 添 1-4.4-7 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [60-65 分]

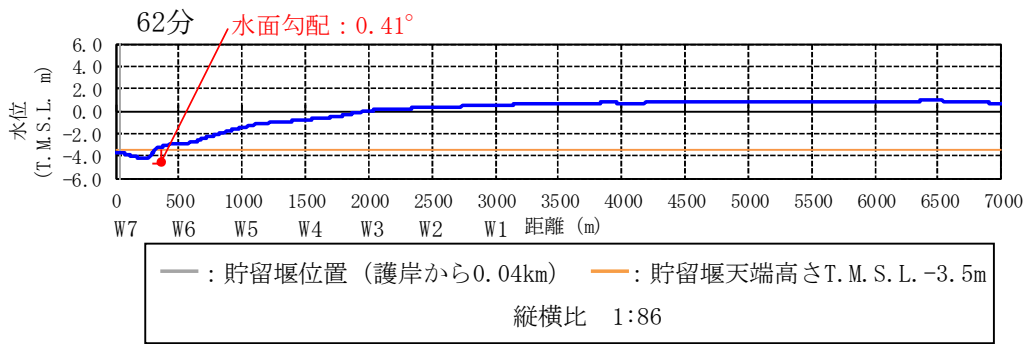


図 4.7 添 1-4.4-8 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 1, 62 分時点)

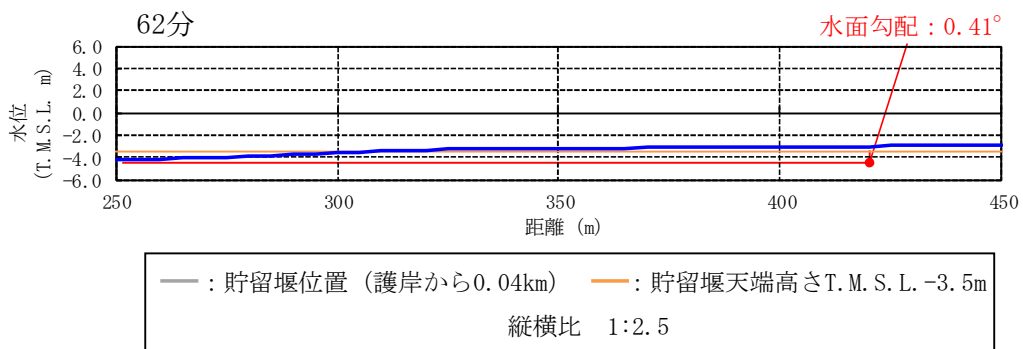


図 4.7 添 1-4.4-9 水位の空間分布 (基準津波 1, 62 分時点) [250-450m を拡大]

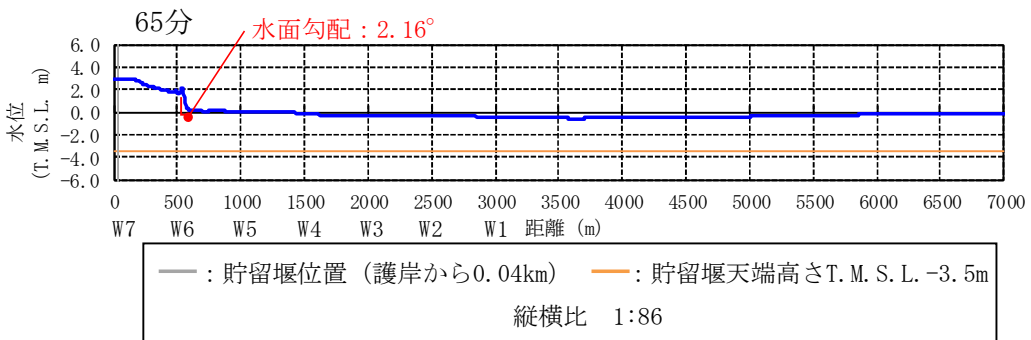


図 4.7 添 1-4.4-10 水位の空間分布と水面勾配 (基準津波 1, 65 分時点)

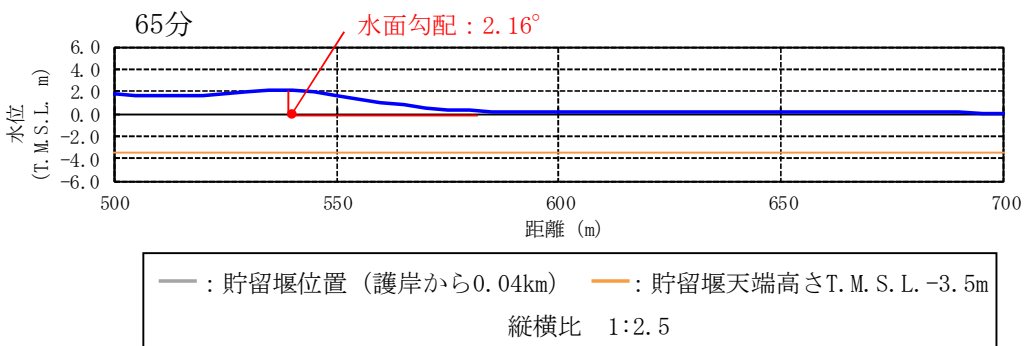


図 4.7 添 1-4.4-11 水位の空間分布 (基準津波 1, 65 分時点) [500-700m を拡大]

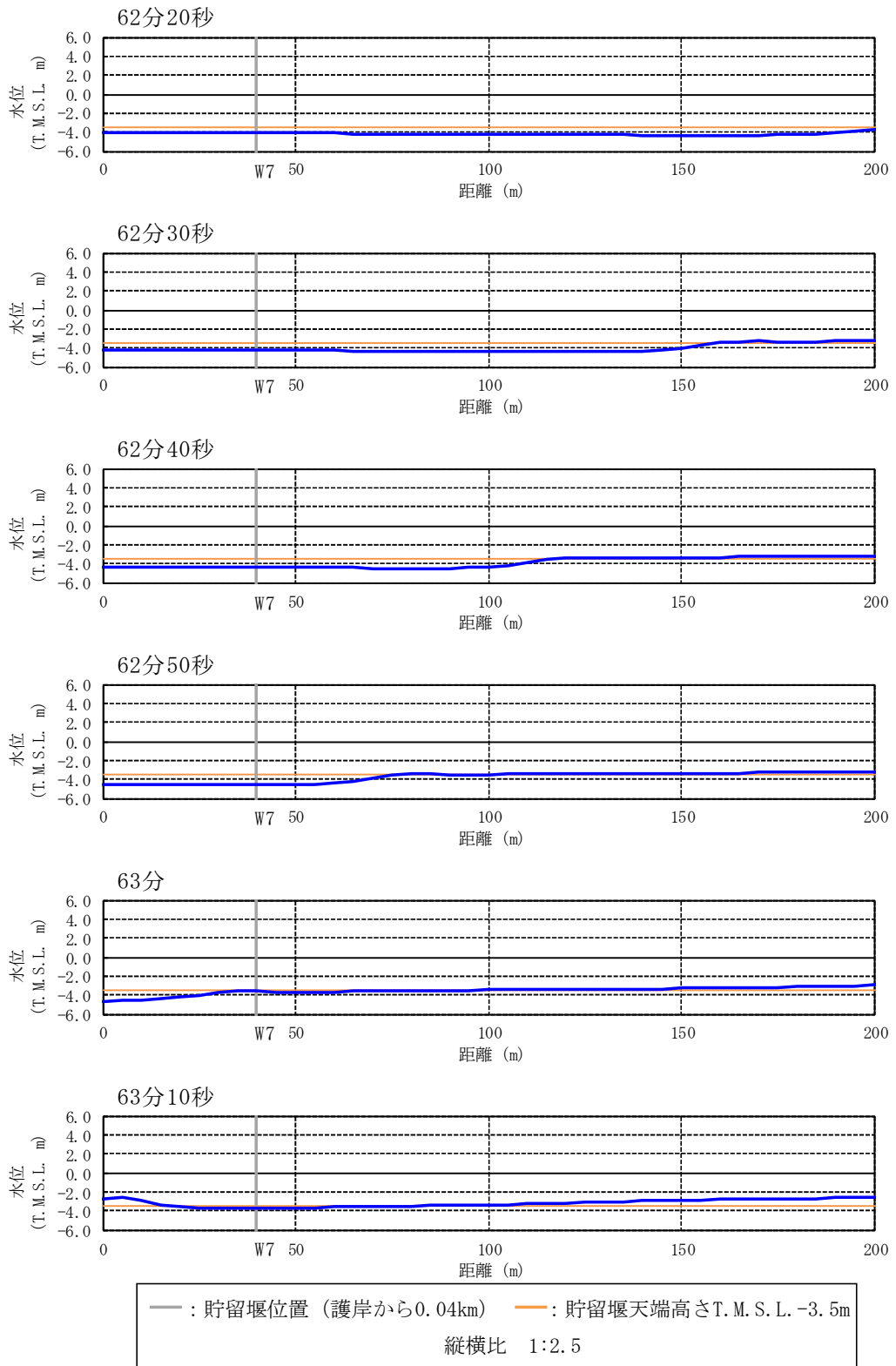


図 4.7 添 1-4.4-12 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1)

[62分20秒-63分10秒, 0-200mを拡大]

b. 基準津波 2

基準津波 2 の出力点ごとの水位時刻歴波形を図 4.7 添 1-4.4-13 に示す。基準津波 1 のときと同様に、波が切り立っている時間帯に着目し、海水貯留堰位置(W7)で水位が海水貯留堰天端高さ(T.M.S.L-3.5m)を下回り、かつ、水面勾配が大きい 112 分から 122 分の時間範囲についてソリトン分裂および砕波の発生有無を確認した。着目時間範囲を図 4.7 添 1-4.4-14、着目時間範囲を拡大した水位時刻歴波形を図 4.7 添 1-4.4-15 に示す。また、水位の空間分布(全景)の時間変化を図 4.7 添 1-4.4-16 に、水面勾配が最大となる時点の水位の空間分布および水面勾配を図 4.7 添 1-4.4-17 から図 4.7 添 1-4.4-20、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 添 1-4.4-21 に示す。ここで、図 4.7 添 1-4.4-19、図 4.7 添 1-4.4-20 に示す水面勾配は護岸で反射した波が沖合に向かうときのものである。なお、その他の着目時間における検討結果は参考資料 1 に示す。

算出した水位時刻歴波形では、「4.2 判断基準」で示したソリトン分裂と考えられるような波形は見られない。また、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。さらに、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 2.57° と十分に小さいことから、砕波も発生しないと判断した。

以上より、基準津波 2 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。

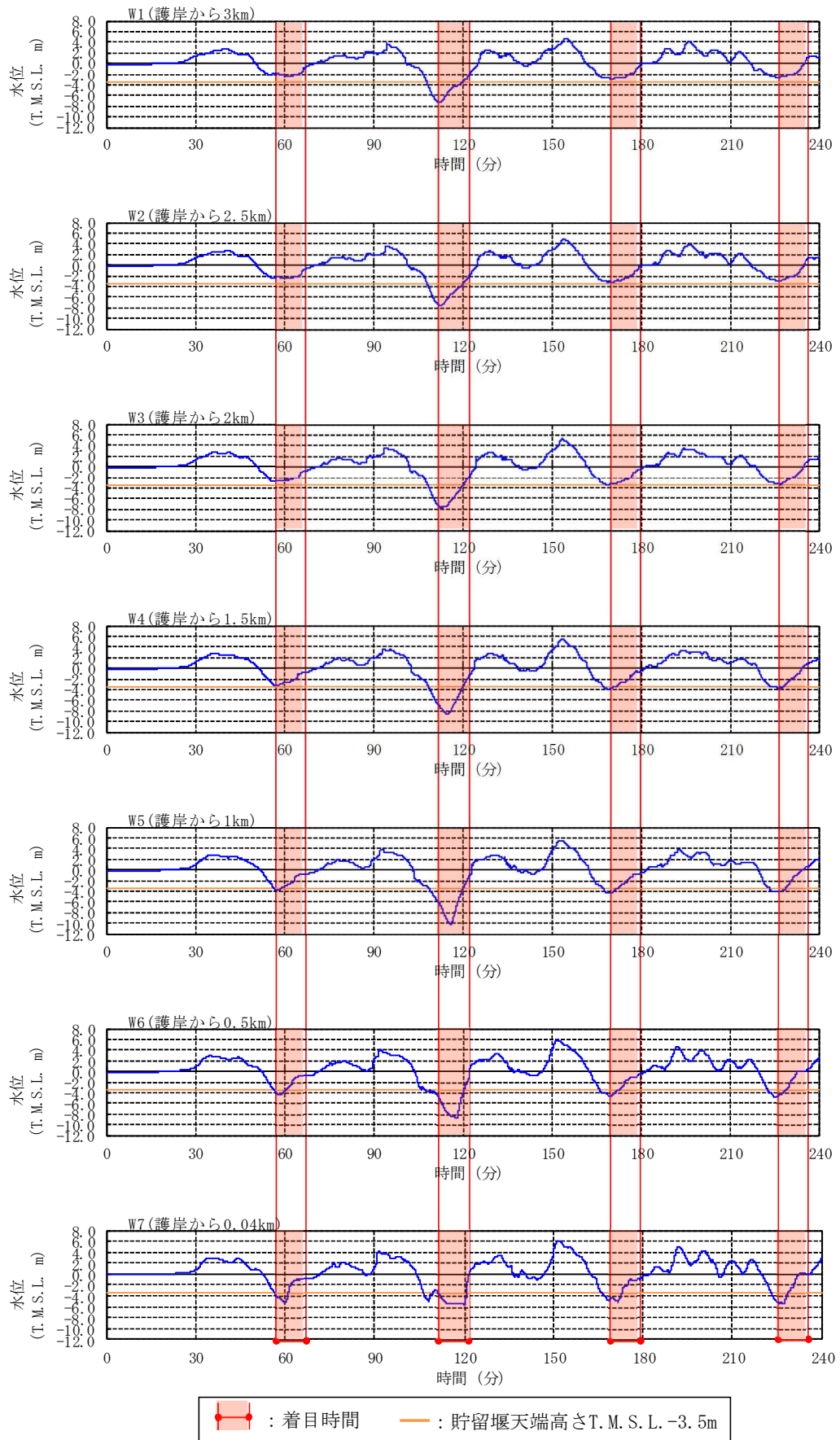


図 4.7 添 1-4.4-13 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [0-240 分]

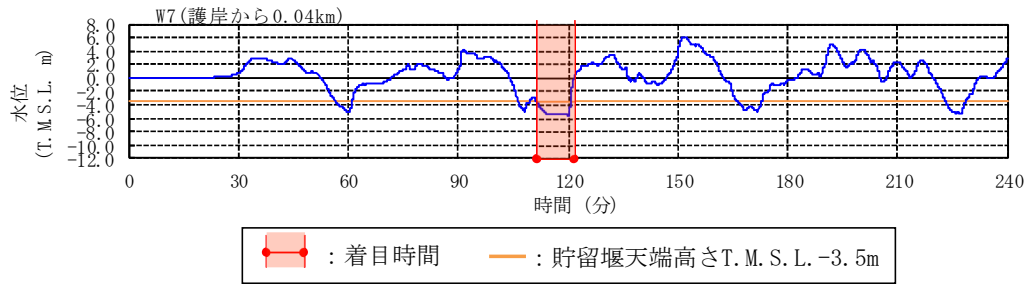


図 4.7 添 1-4.4-14 水位時刻歴波形の着目時間範囲 (基準津波 2)

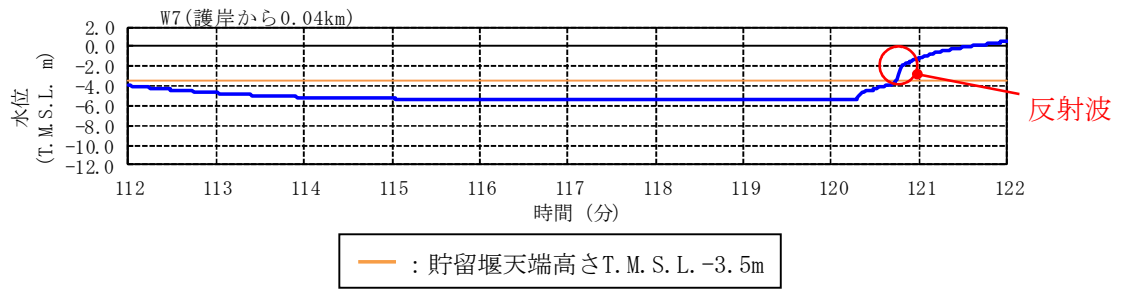


図 4.7 添 1-4.4-15 水位時刻歴波形 (基準津波 2) [112-122 分を拡大]

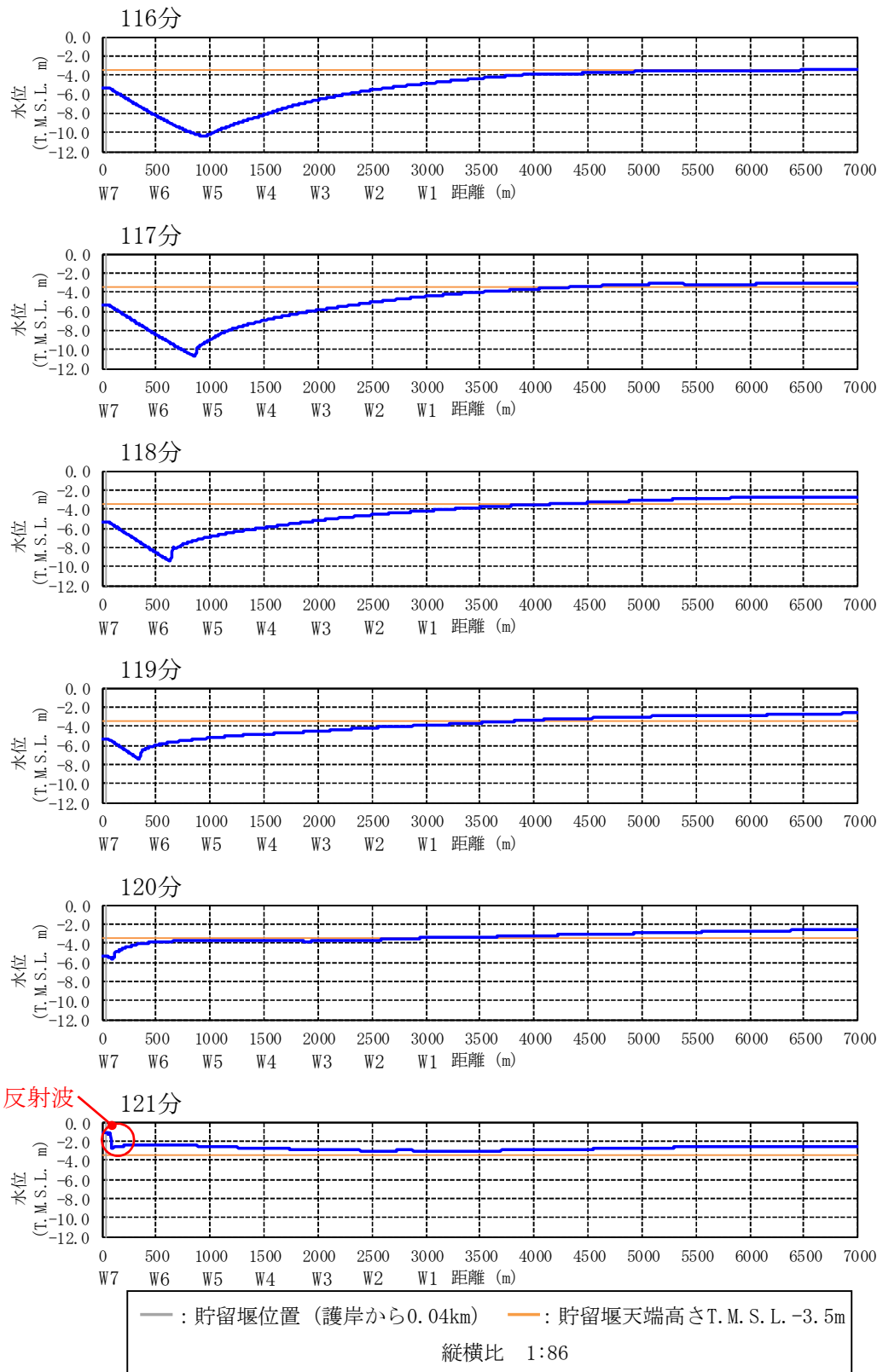


図 4.7 添 1-4.4-16 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [116-121 分]

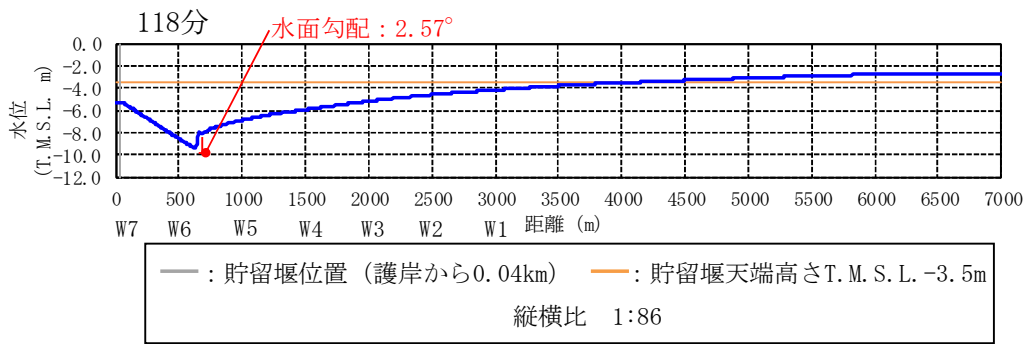


図 4.7 添 1-4.4-17 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 2, 118 分時点)

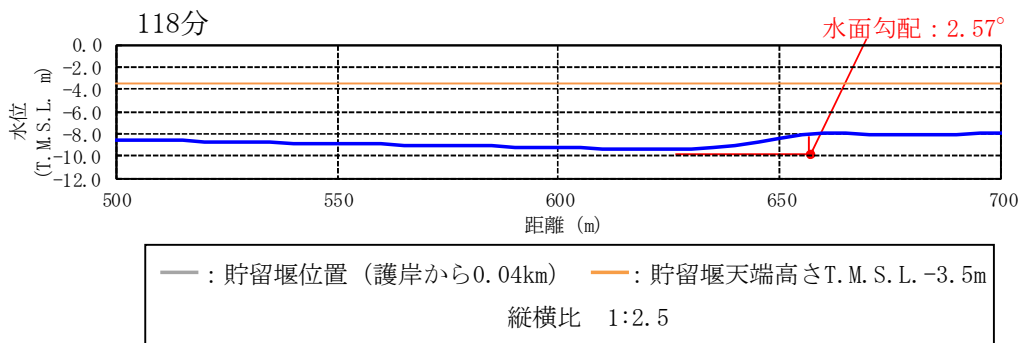


図 4.7 添 1-4.4-18 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 2, 118 分時点)
[500-700m を拡大]

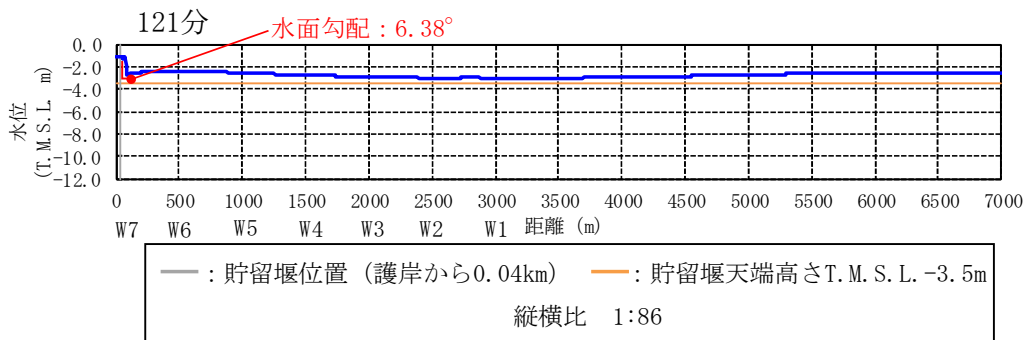


図 4.7 添 1-4.4-19 水位の空間分布と水面勾配 (基準津波 2, 121 分時点)

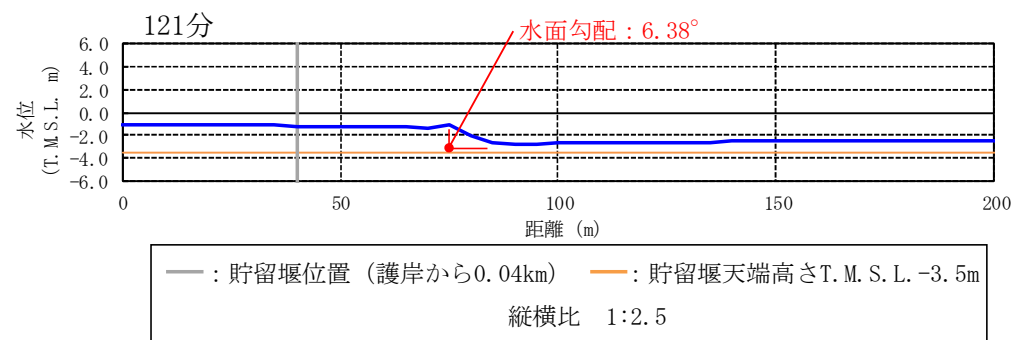


図 4.7 添 1-4.4-20 水位の空間分布 (基準津波 2, 121 分時点) [0-200m を拡大]

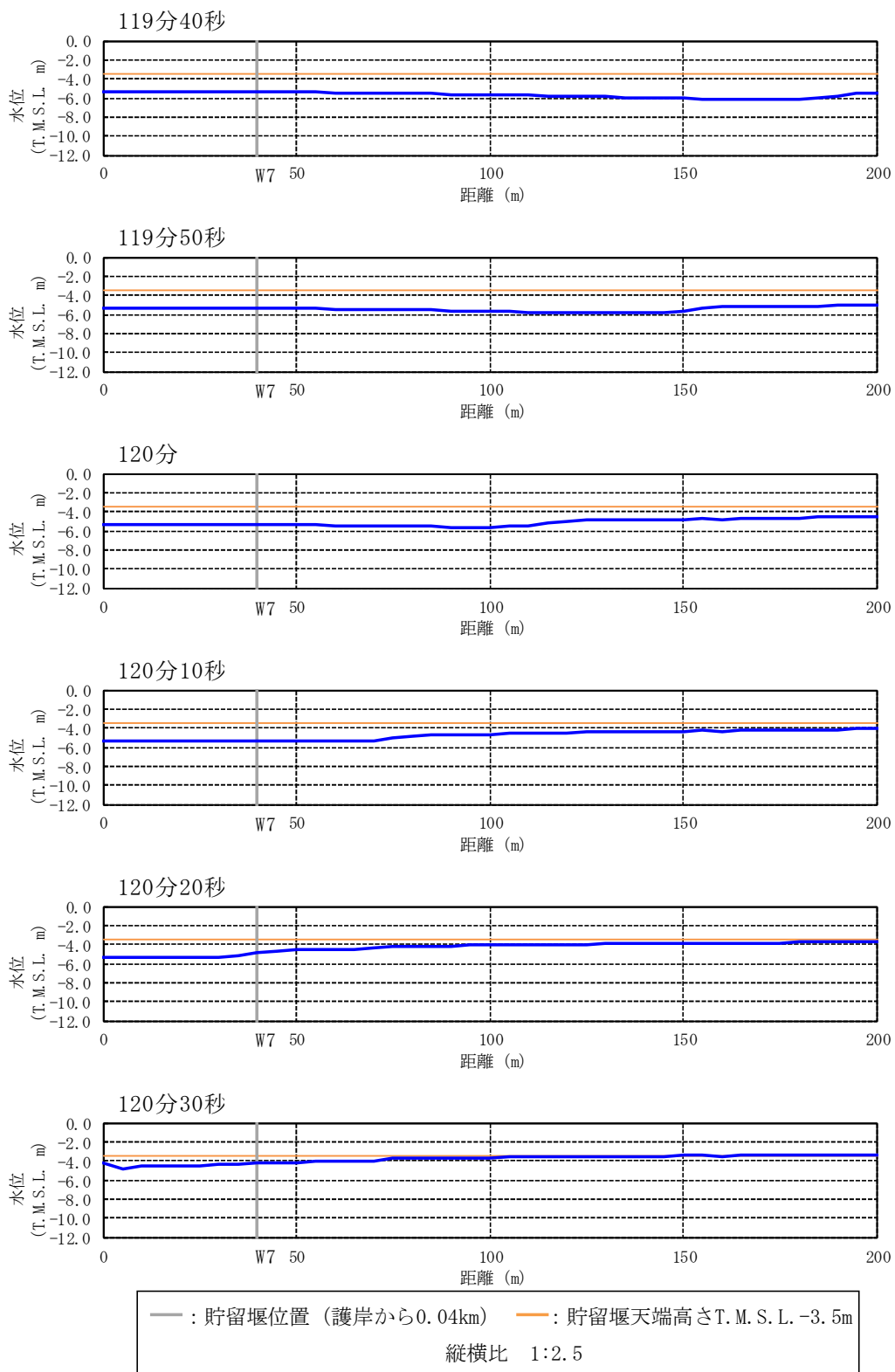


図 4.7 添 1-4.4-21 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2)
[119 分 40 秒-120 分 30 秒, 0-200m を拡大]

c. 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 添 1-4.4-22 に示す。基準津波 1, 2 と同様に、波が切り立っている時間帯に着目し、海水貯留堰位置 (W7) で水位が海水貯留堰天端高さ (T. M. S. L-3.5m) を下回り、かつ、水面勾配が大きい 48 分から 58 分の時間範囲についてソリトン分裂および碎波の発生有無を確認した。着目時間範囲を図 4.7 添 1-4.4-23, 着目時間範囲を拡大した水位時刻歴波形を図 4.7 添 1-4.4-24 に示す。また、水位の空間分布 (全景) の時間変化を図 4.7 添 1-4.4-25 に、水面勾配が最大となる時点の水位の空間分布および水面勾配を図 4.7 添 1-4.4-26 から図 4.7 添 1-4.4-29, 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 添 1-4.4-30 に示す。ここで、図 4.7 添 1-4.4-28, 図 4.7 添 1-4.4-29 に示す水面勾配は護岸で反射した波が沖合に向かうときのものである。なお、その他の着目時間における検討結果は参考資料 1 に示す。

算出した水位時刻歴波形では、「4.2 判断基準」で示したソリトン分裂と考えられるような波形は見られない。また、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。さらに、水位時刻歴波形や空間分布の時間変化からは碎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° と十分に小さいことから、碎波も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碎波は発生しないことを確認した。

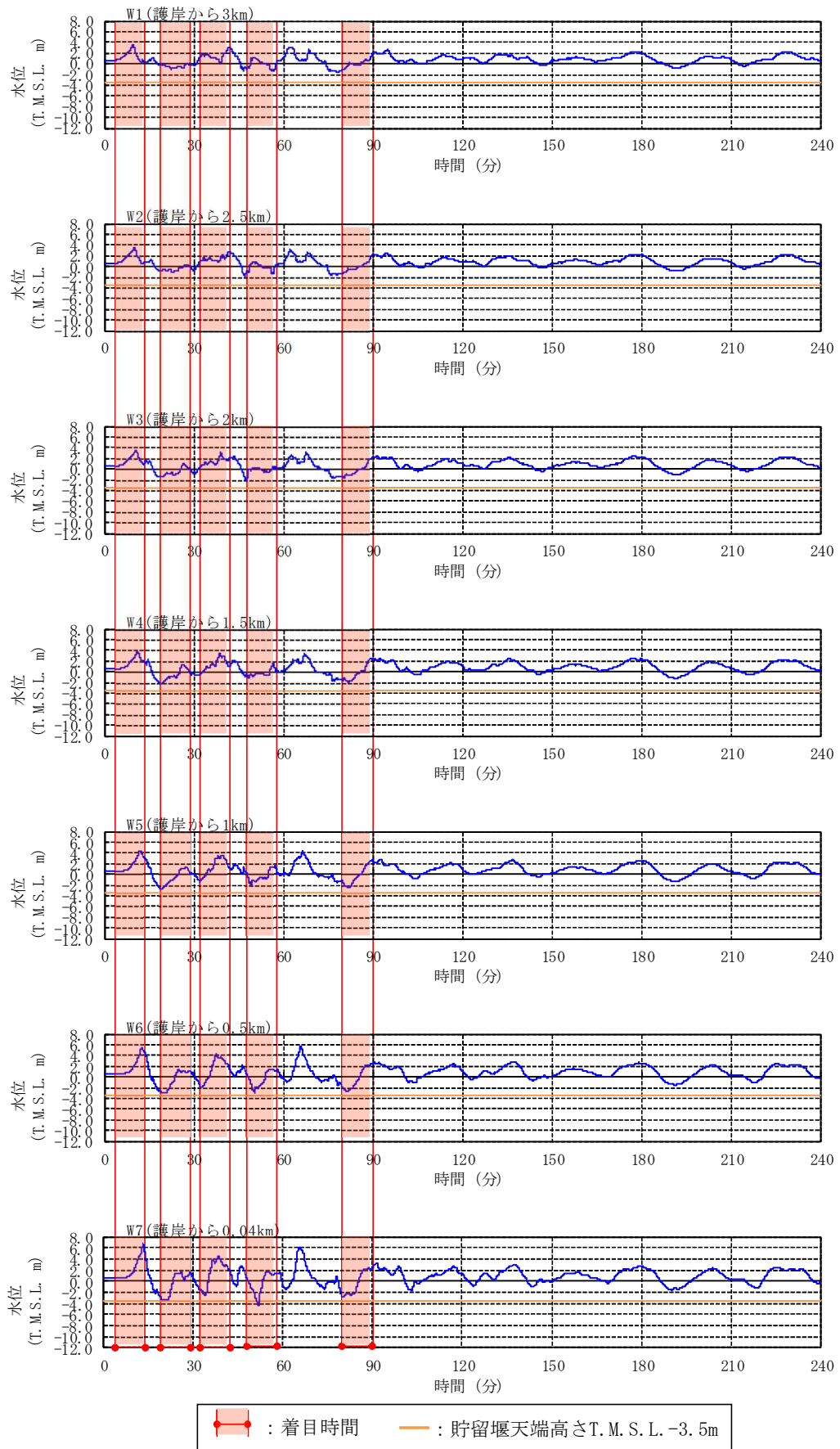


図 4.7 添 1-4.4-22 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [0-240 分]

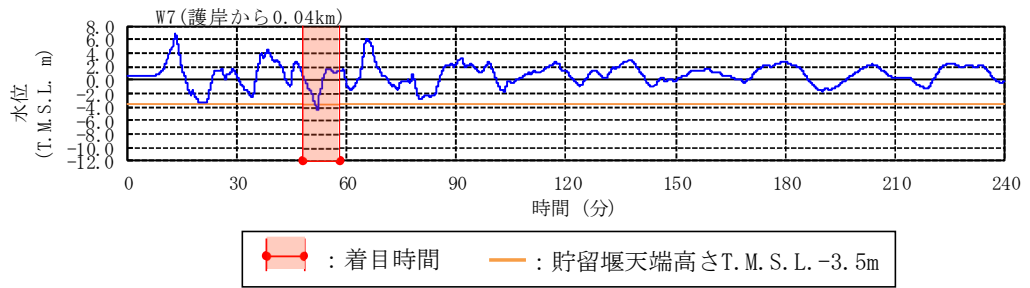


図 4.7 添 1-4.4-23 水位時刻歴波形の着目時間範囲 (基準津波 3)

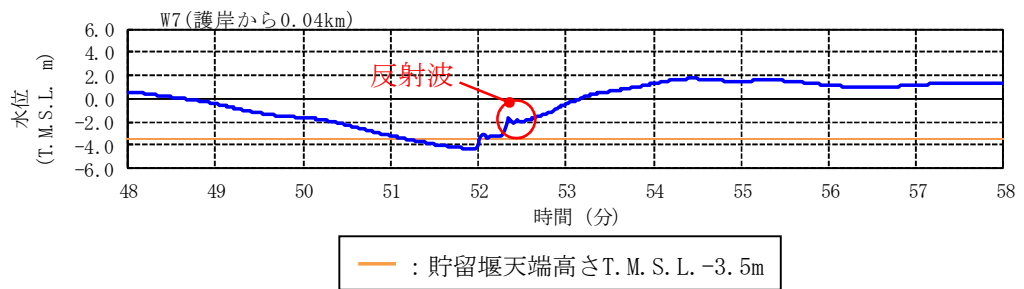


図 4.7 添 1-4.4-24 水位時刻歴波形 (基準津波 3) [48-58 分を拡大]

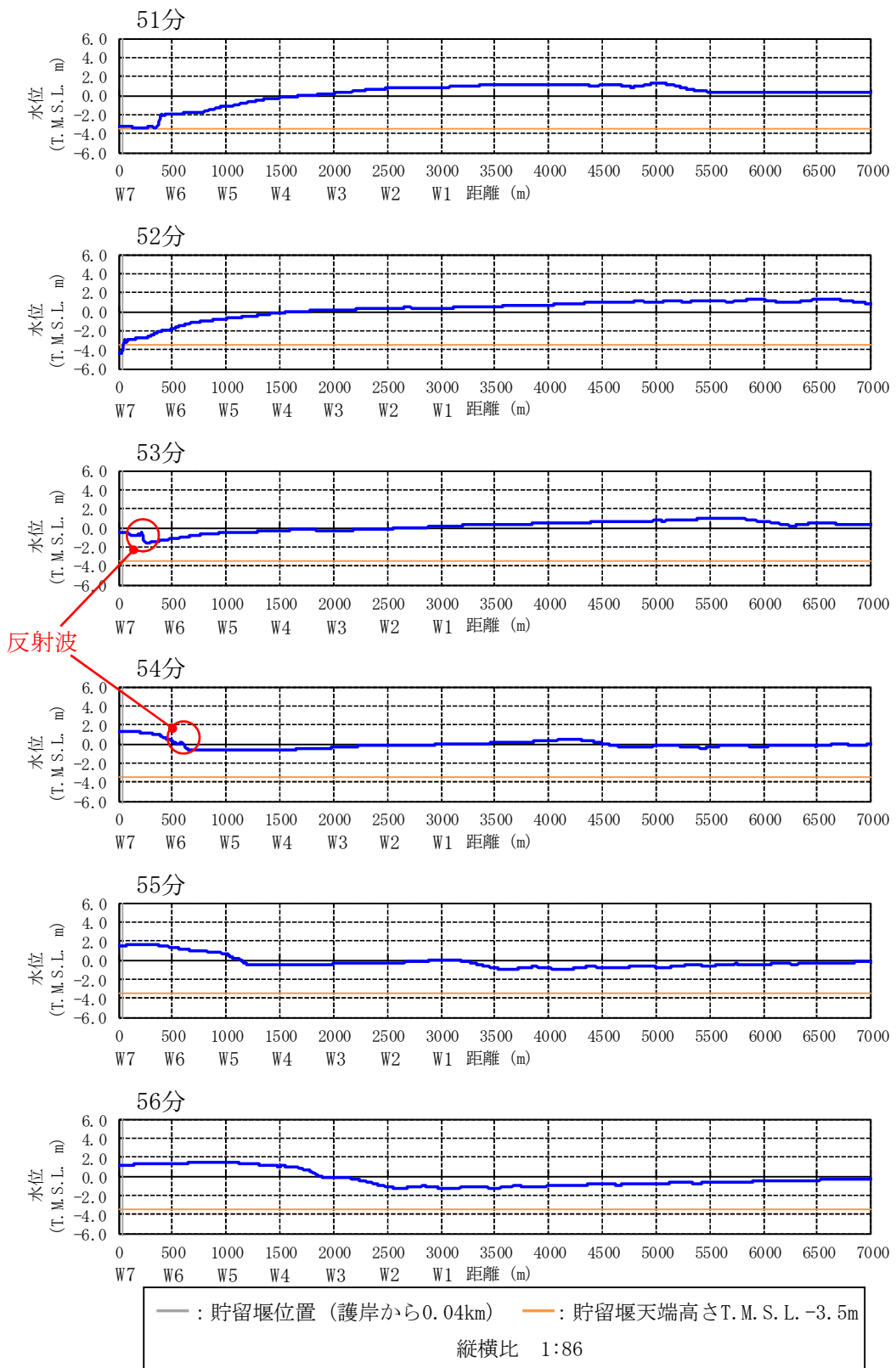


図 4.7 添 1-4.4-25 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分]

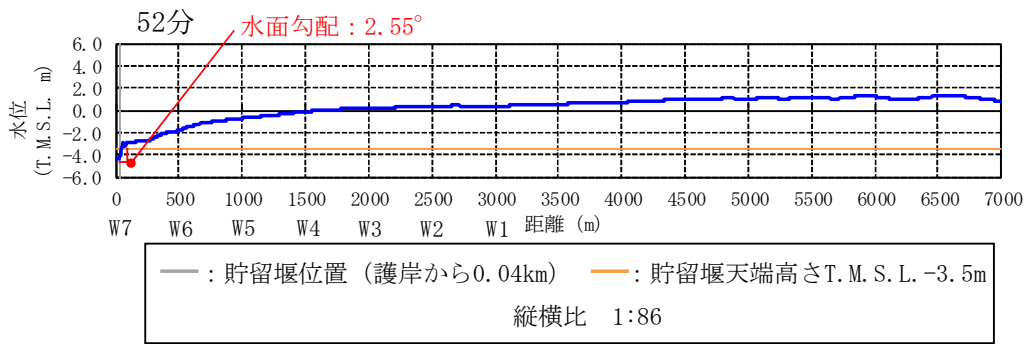


図 4.7 添 1-4.4-26 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 3, 52 分時点)

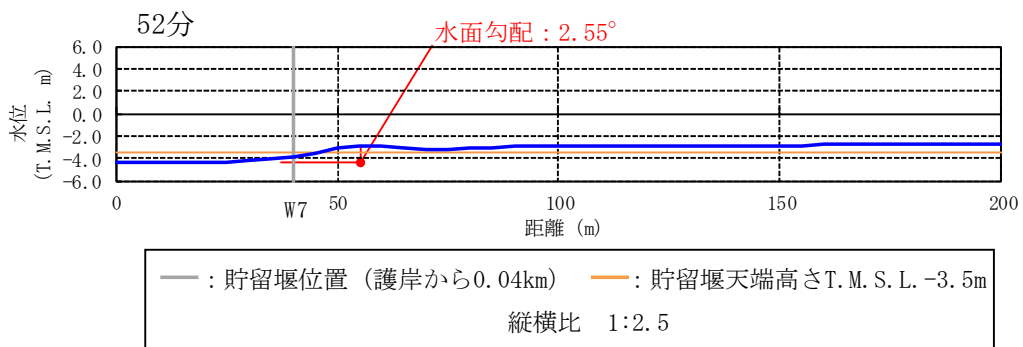


図 4.7 添 1-4.4-27 水位の空間分布 (基準津波 3, 52 分時点) [0-200m を拡大]

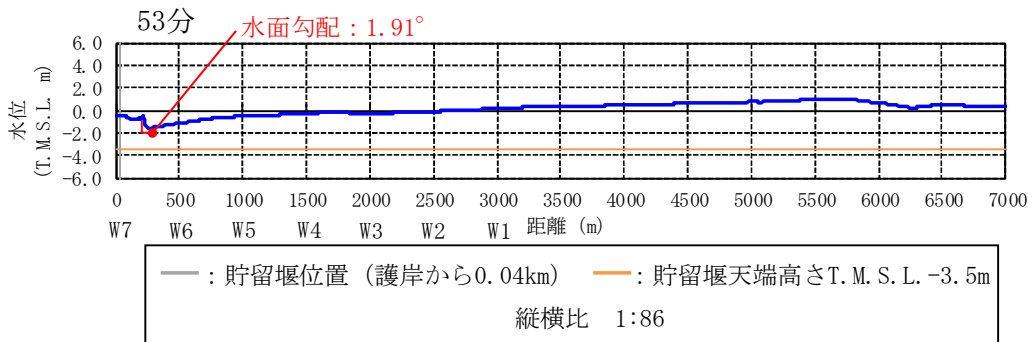


図 4.7 添 1-4.4-28 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 3, 53 分時点)

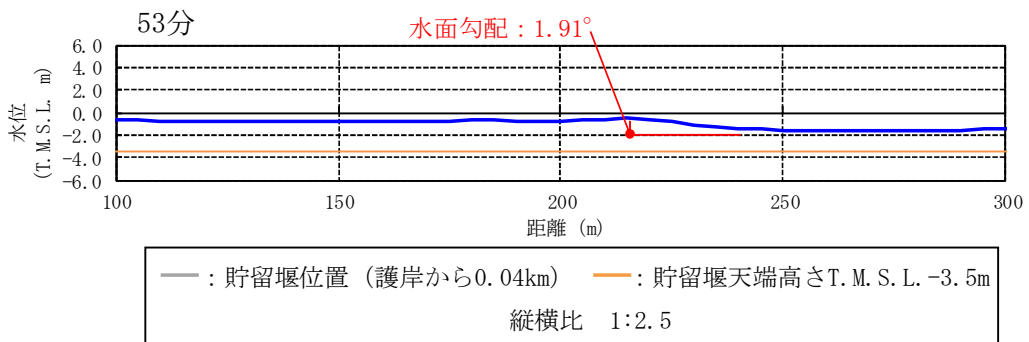


図 4.7 添 1-4.4-29 水位の空間分布 (基準津波 3, 53 分時点) [100-300m を拡大]

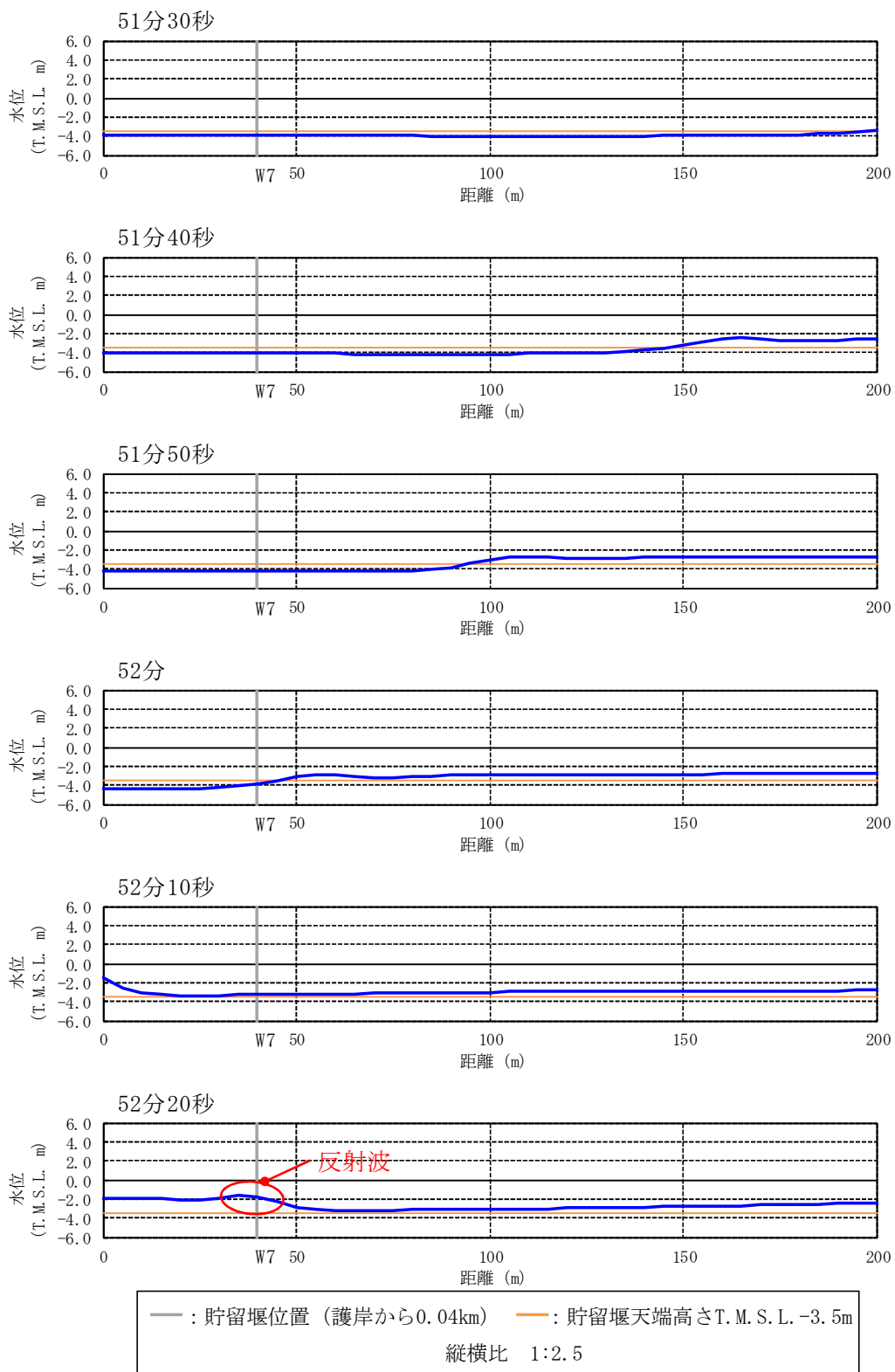


図 4.7 添 1-4.4-30 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3)

[51 分 30 秒-52 分 20 秒, 0-200m を拡大]

4.5 分裂波発生に関する検討まとめ

本資料では、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。「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に基づくソリトン分裂発生有無の判定では、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、数値計算による評価を実施した。

数値計算は、当該サイトに対して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およ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° と十分に小さいことが確認できた。

また、過去の事例からも、日本海側では日本海中部地震(1983)の際に秋田県峰浜村の海岸でソリトン分裂波が発生したとされているが、柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺海域の海底地形の特徴とは異なっており、その他に当該サイト周辺海域で過去にソリトン分裂波が観測された事例もない。

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。

5. 参考文献

- 1) 池野正明・森信人・田中寛好：砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集 第 48 卷，pp. 846-850，2001
- 2) 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 回海岸工学講演会論文集，pp. 233-236，1984
- 3) 「防波堤の耐津波設計ガイドライン」国土交通省，2013 年 9 月
- 4) 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
- 5) 「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
- 6) 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 卷，pp. 241-245，2005
- 7) 「津波浸水想定の設定の手引き」国土交通省水管理・国土保全局海岸室，2012 年 10 月
- 8) 安田誠宏・高山知司・山本博紀：ソリトン分裂津波の変形と波力特性に関する実験的研究，海岸工学論文集 第 53 卷，pp. 256-260，2006
- 9) 「津波の辞典」朝倉書店，2007 年 11 月

1 次元津波水位解析によるソリトン分裂および砕波の発生有無の確認

1. 解析結果

1 次元解析の結果として、沖合 3km から護岸まで 0.5km 間隔の地点 (W1 から W6) に海水貯留堰設置地点 (W7) を加えた 7 か所の地点における水位の時刻歴波形を出力した。「津波の辞典 (平成 19 年 11 月)¹⁾」において、ソリトン分裂は波が切り立ってきた箇所で発生すると示されている。そこで本検討では、基準津波ごとに水位時刻歴波形において波が切り立っているように見える時間帯に着目し、ソリトン分裂および砕波発生の有無を確認した。さらに、水面勾配から砕波発生の有無を確認するため、水位の空間分布を出力した。

1.1 基準津波 1

基準津波 1 の出力点ごとの水位時刻歴波形を図 4.7 参 1-1 に示す。同図に示す波形の中で、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 1-2 から図 4.7 参 1-5 に示す。また、水位の空間分布 (全景) の時間変化を図 4.7 参 1-6 から図 4.7 参 1-10 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 1-11 から図 4.7 参 1-14 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 0.41° と十分に小さいことから、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 2.16° 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。

なお、図 4.7 参 1-3 において短周期の波が発生していることが確認できるが、護岸から離れるにつれて到達時刻が遅くなっていることから、これは護岸からの反射波が沖合に向かって進行する過程で発生したものであり、敷地に向かって進行する分裂波とは異なるものである。また、図 4.7 参 1-8 に示すとおり短周期の波の水面勾配は最大で 1.21° と十分に小さく砕波していないと判断した。

以上より、基準津波 1 のケースでは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

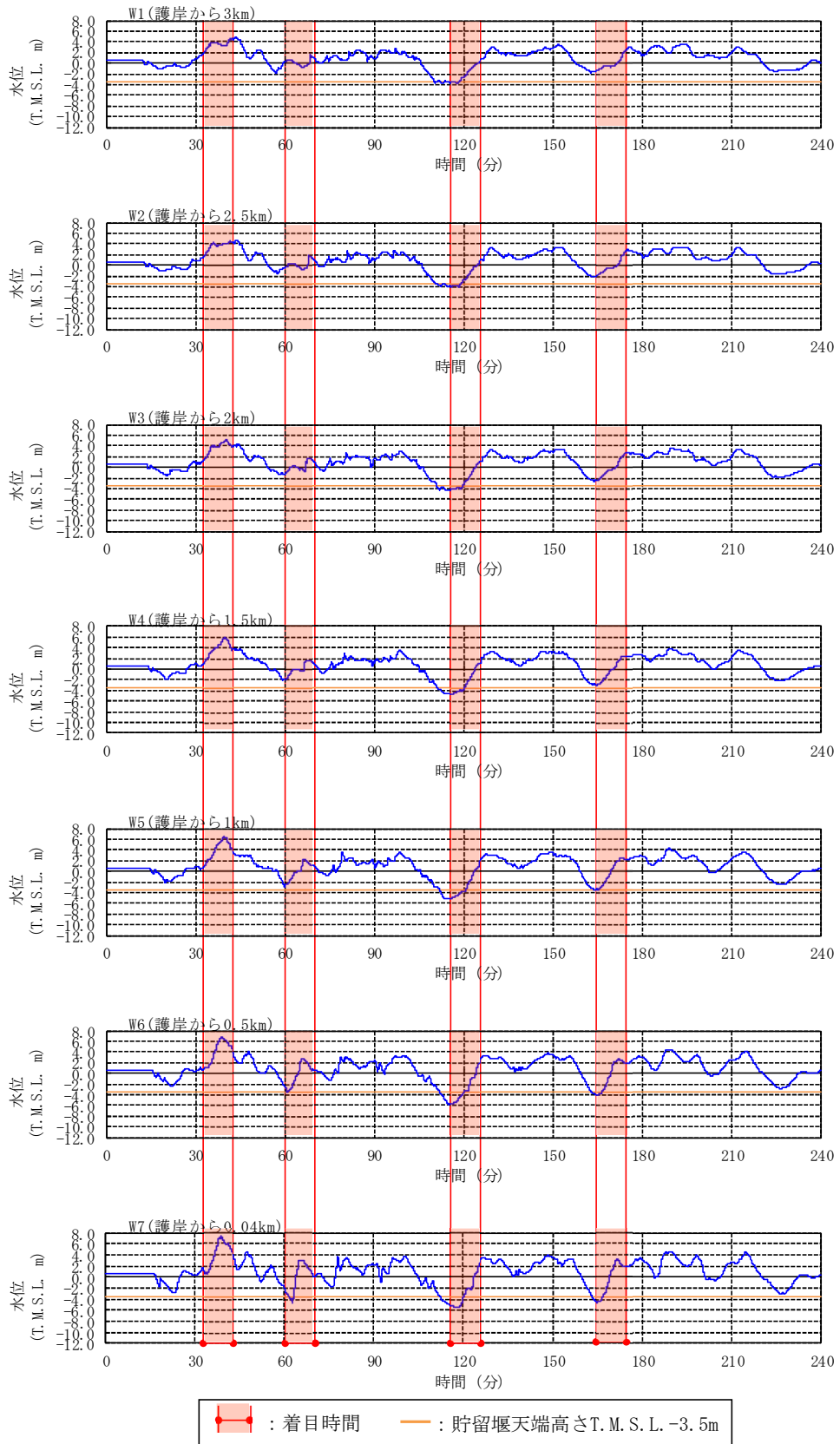


図 4.7 参 1-1 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [0-240 分]

b. 水位時刻歴波形(着目時間の拡大)

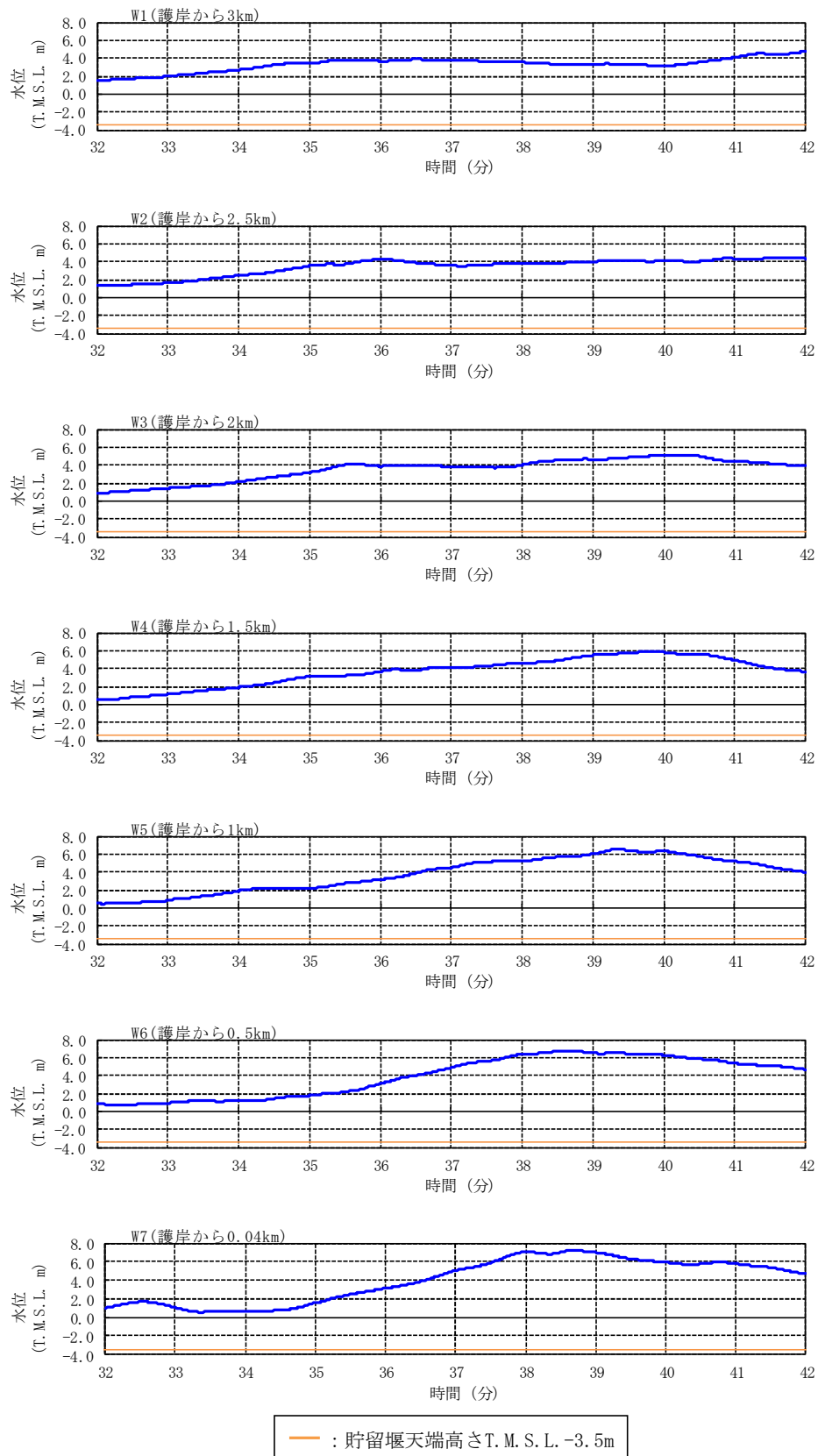


図 4.7 参 1-2 出力点ごとの水位時刻歴波形(基準津波 1) [32-42 分を拡大]

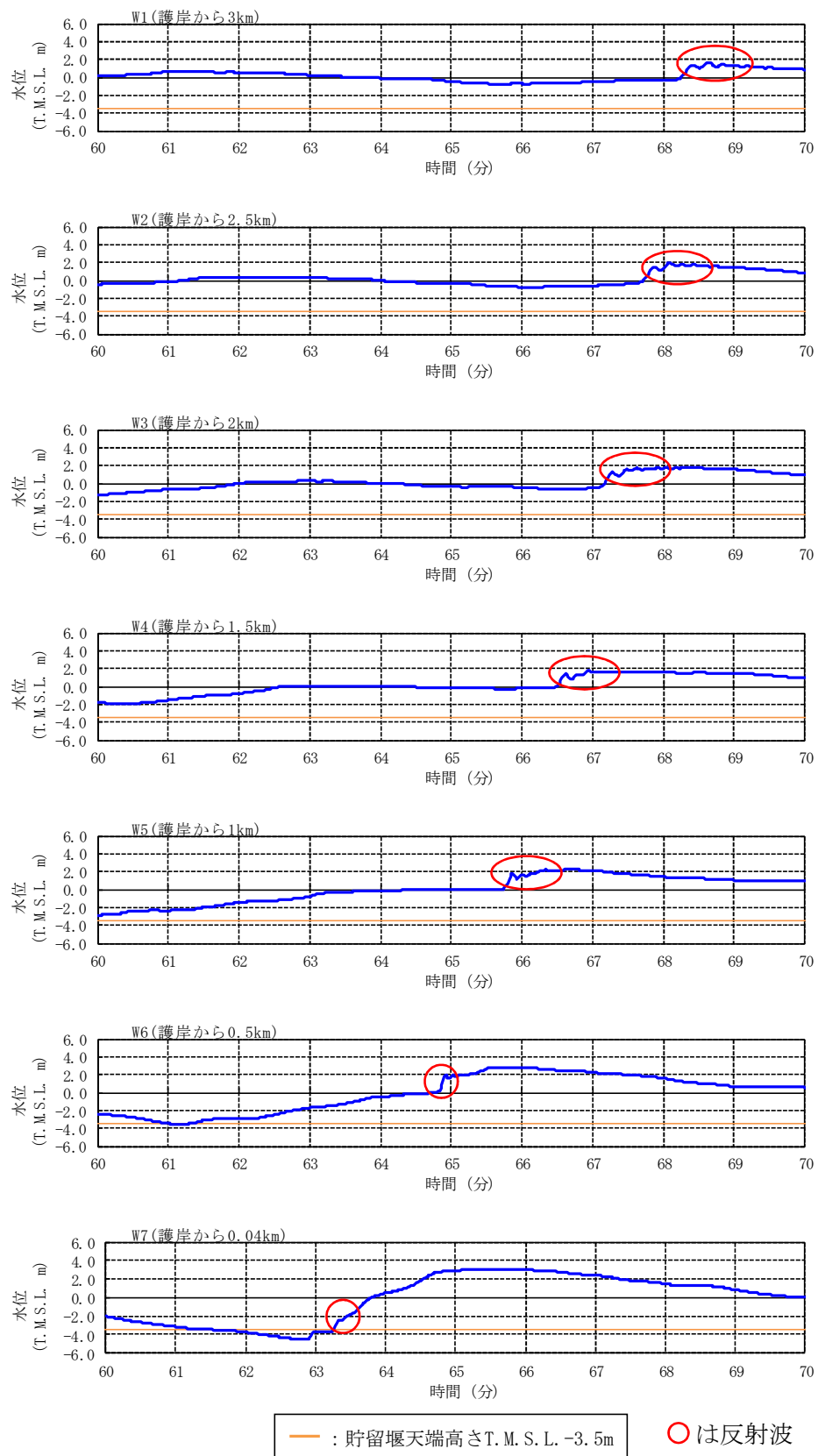


図 4.7 参 1-3 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [60-70 分を拡大]

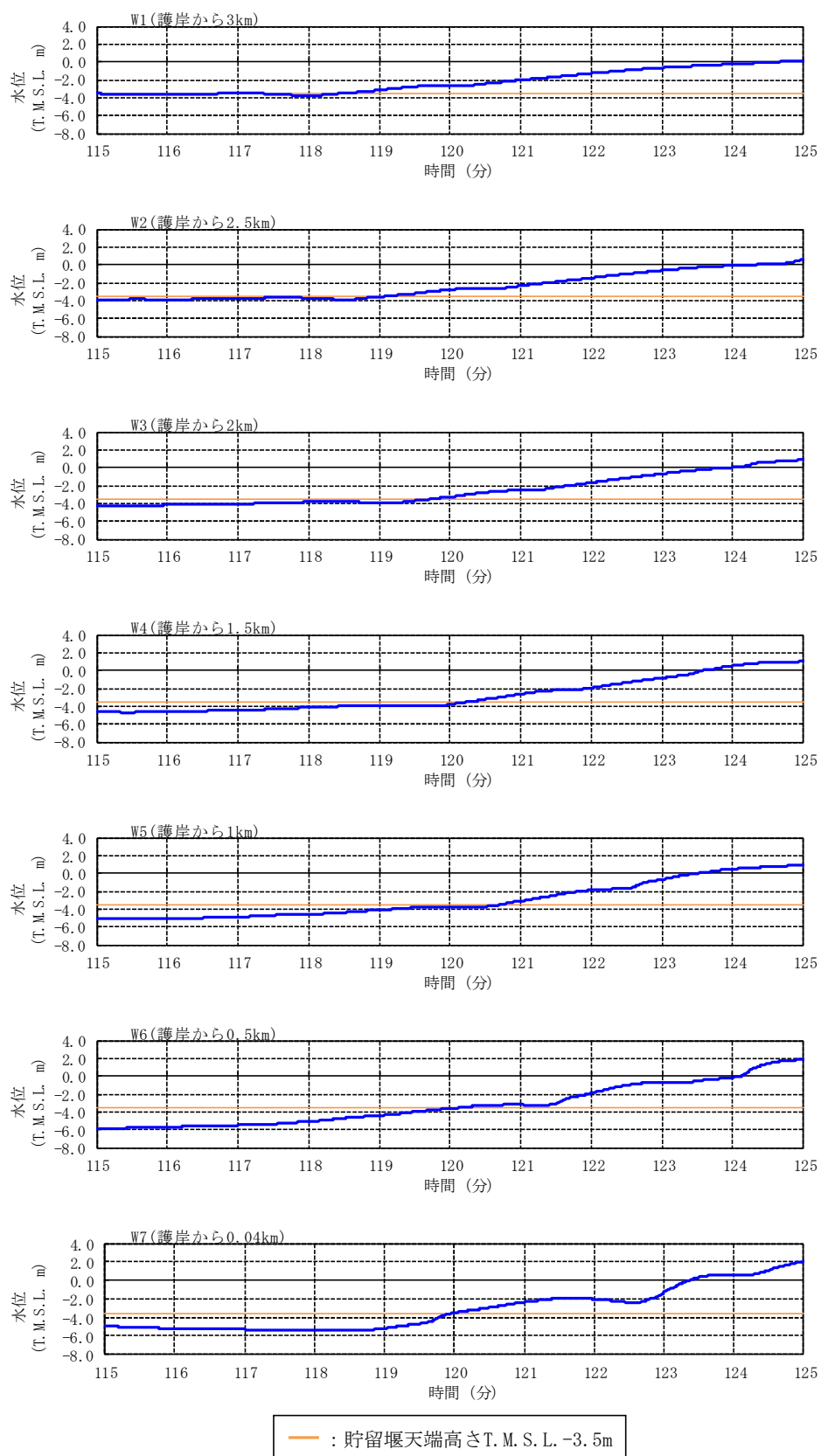


図 4.7 参 1-4 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [115-125 分を拡大]

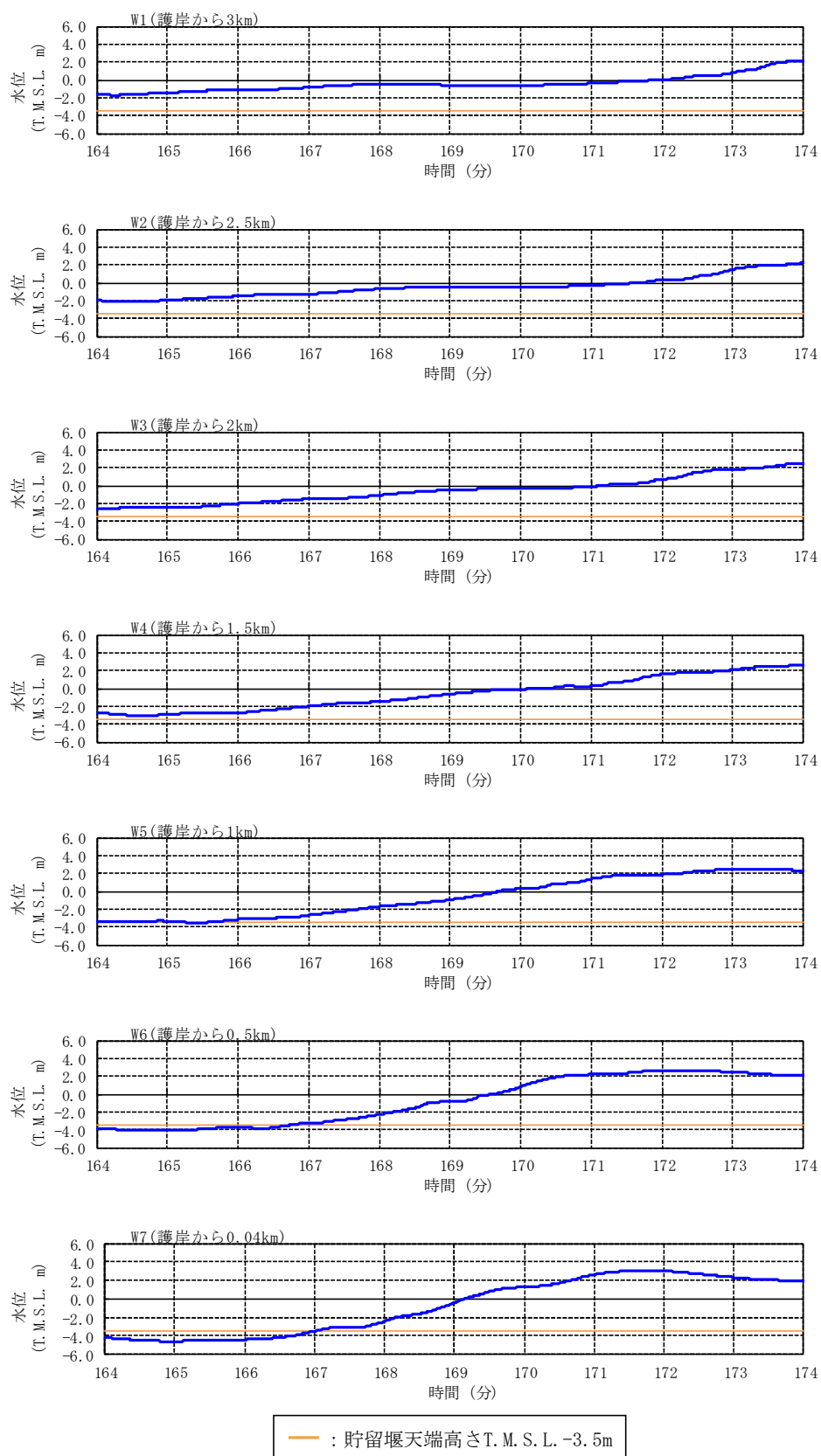


図 4.7 参 1-5 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [164-174 分を拡大]

c. 着目時間別の水位の空間分布
 (1) 全景

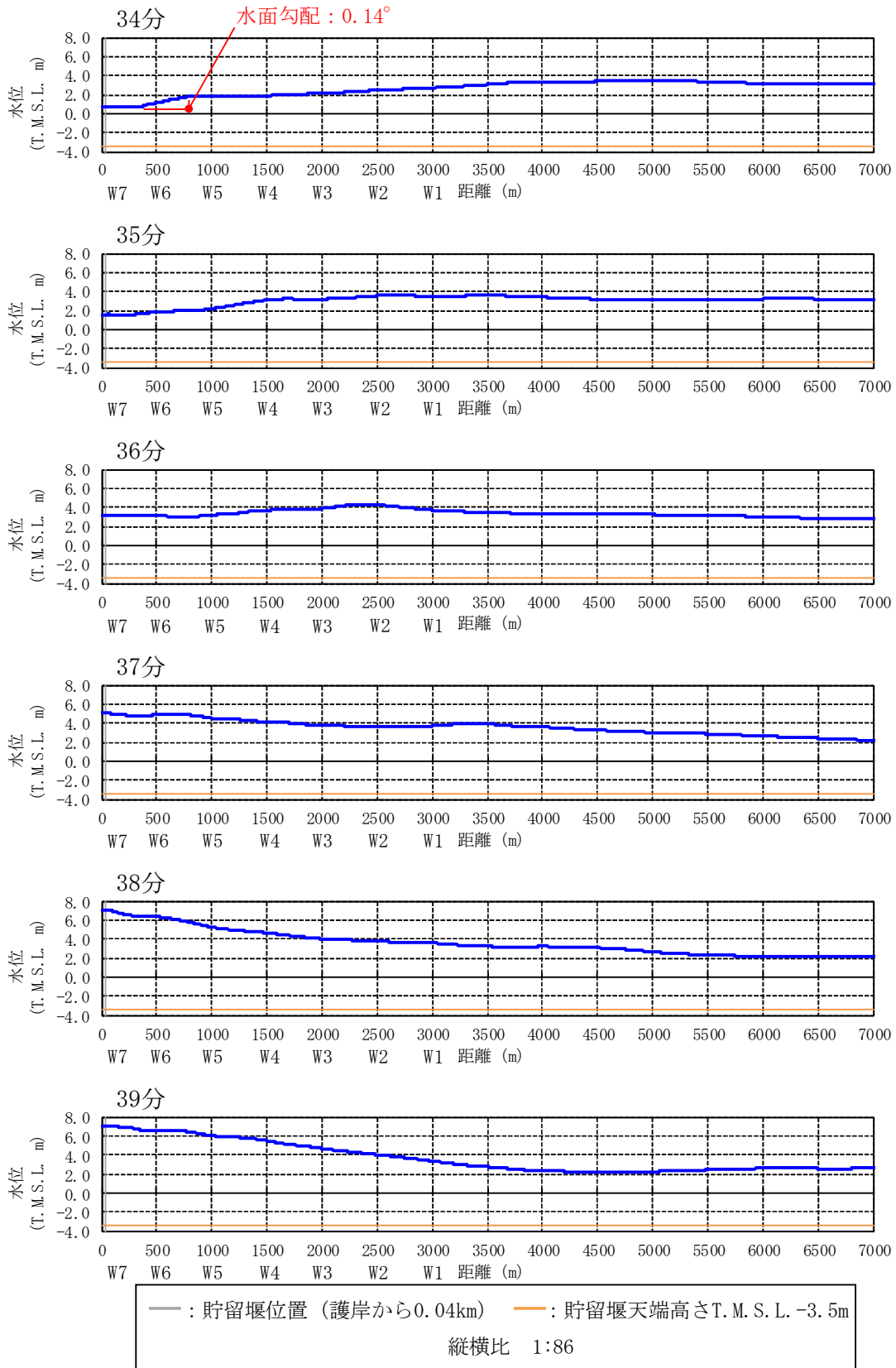


図 4.7 参 1-6 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [34-39 分]

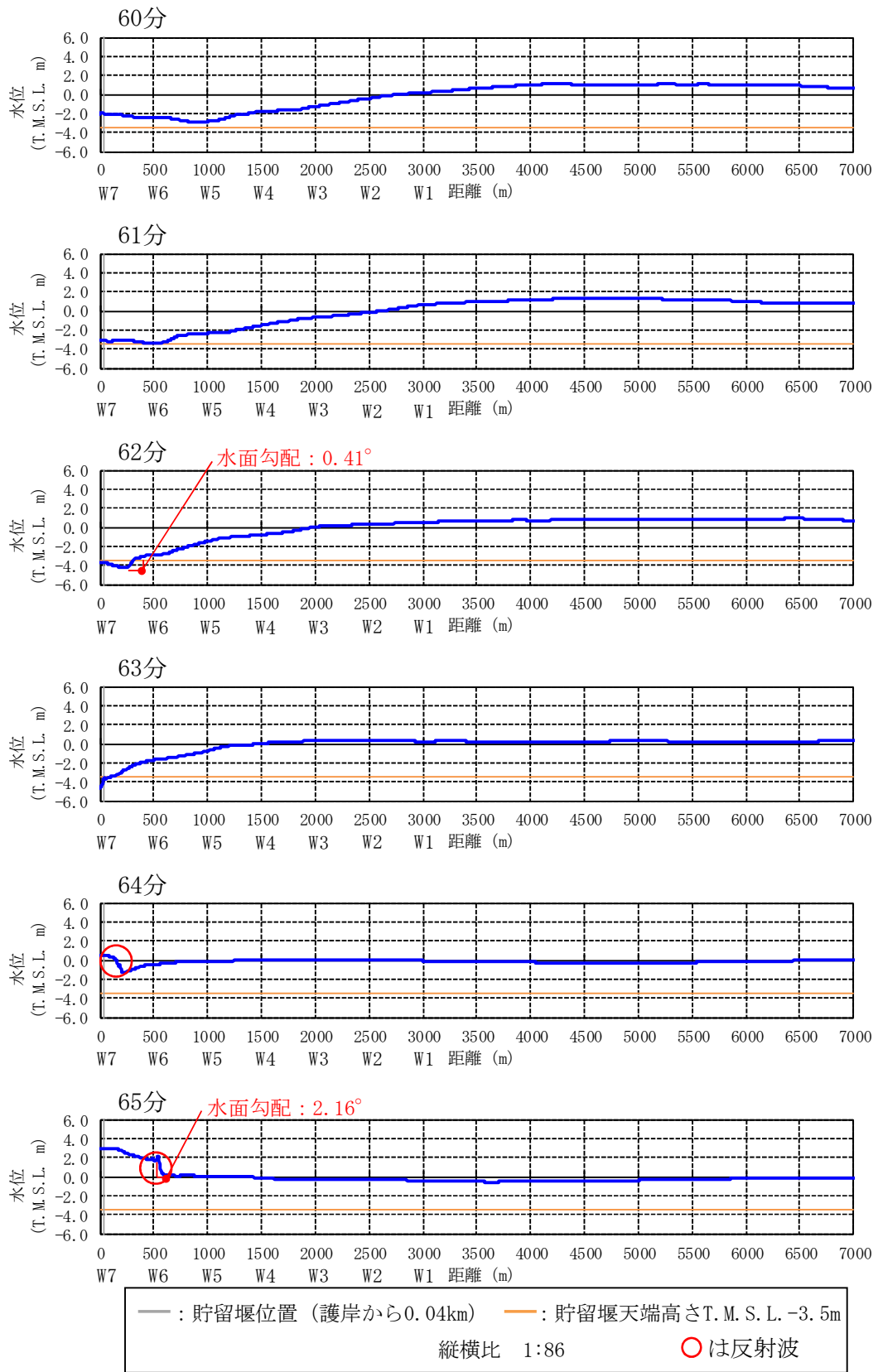


図 4.7 参 1-7 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [60-65 分]

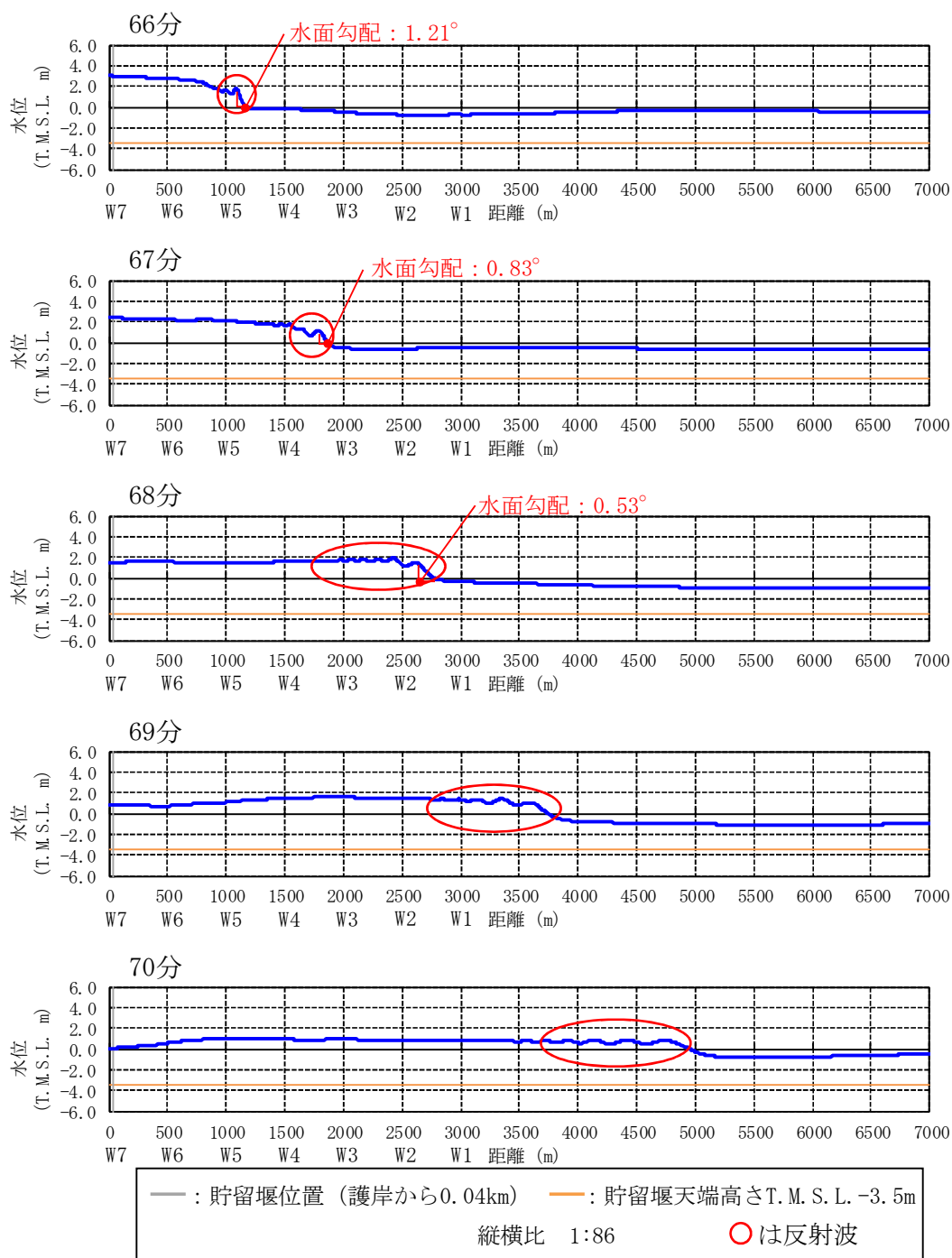


図 4.7 参 1-8 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [66-70 分]

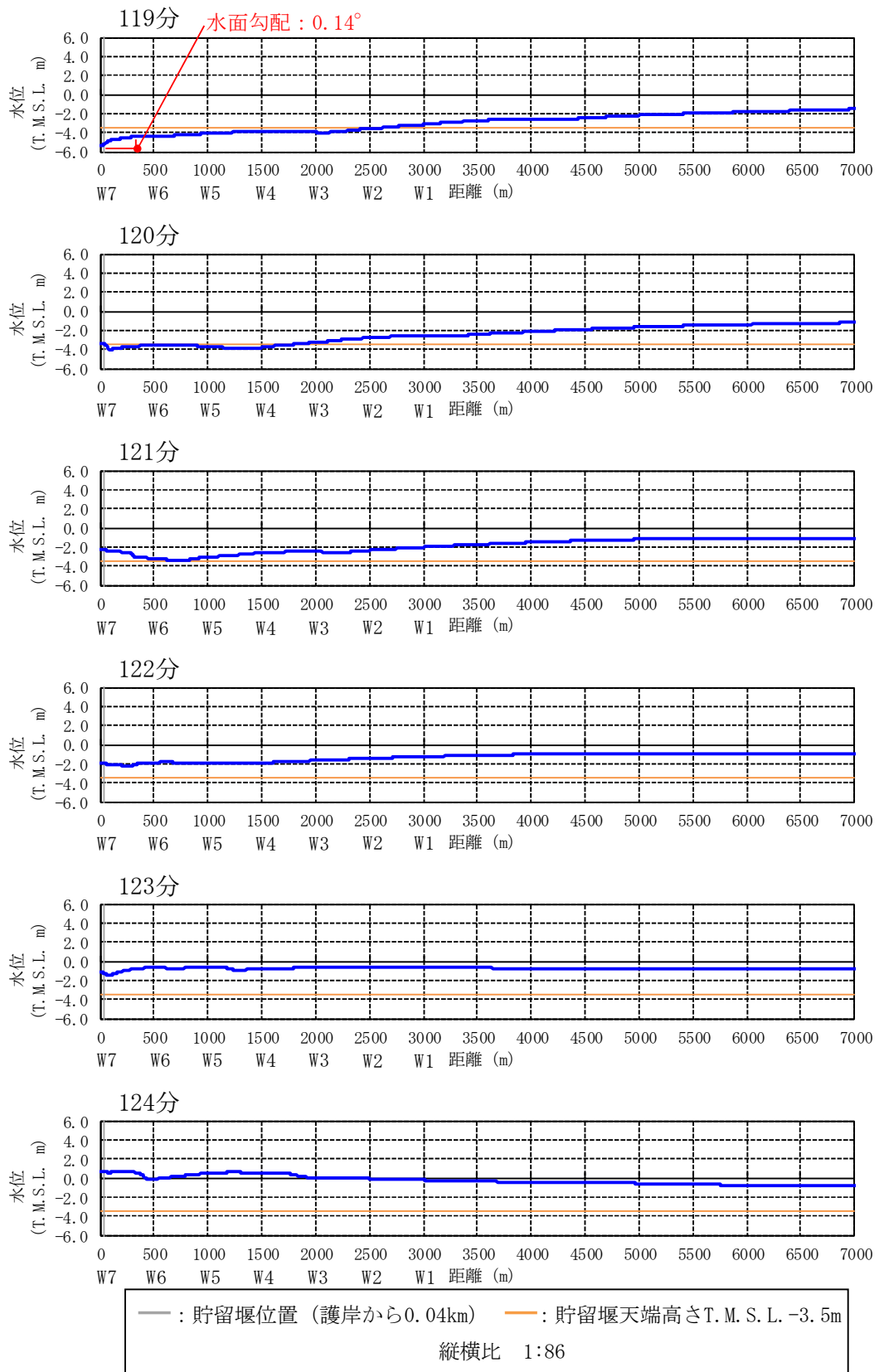


図 4.7 参 1-9 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [119-124 分]

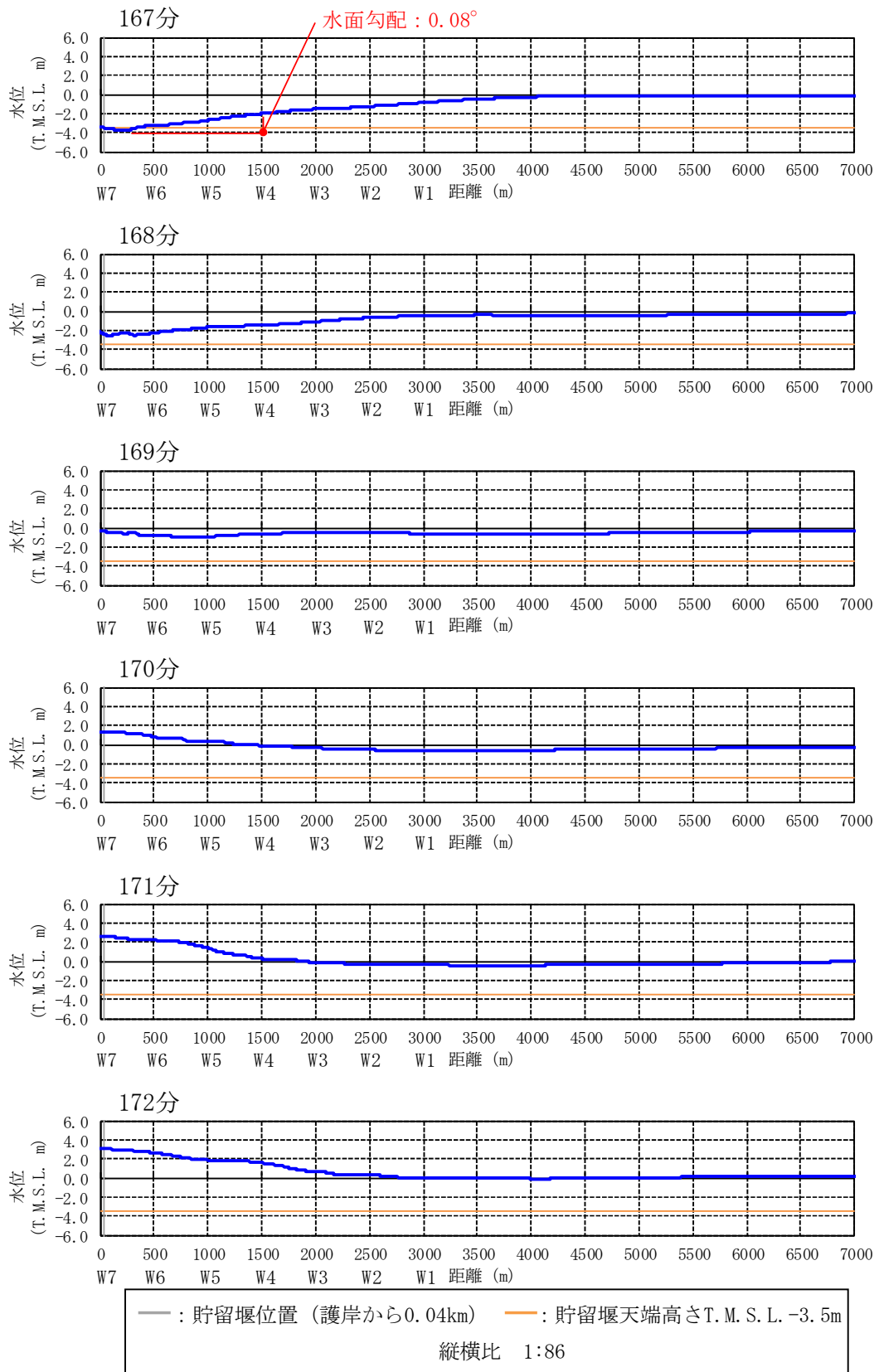


図 4.7 参 1-10 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [167-172 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

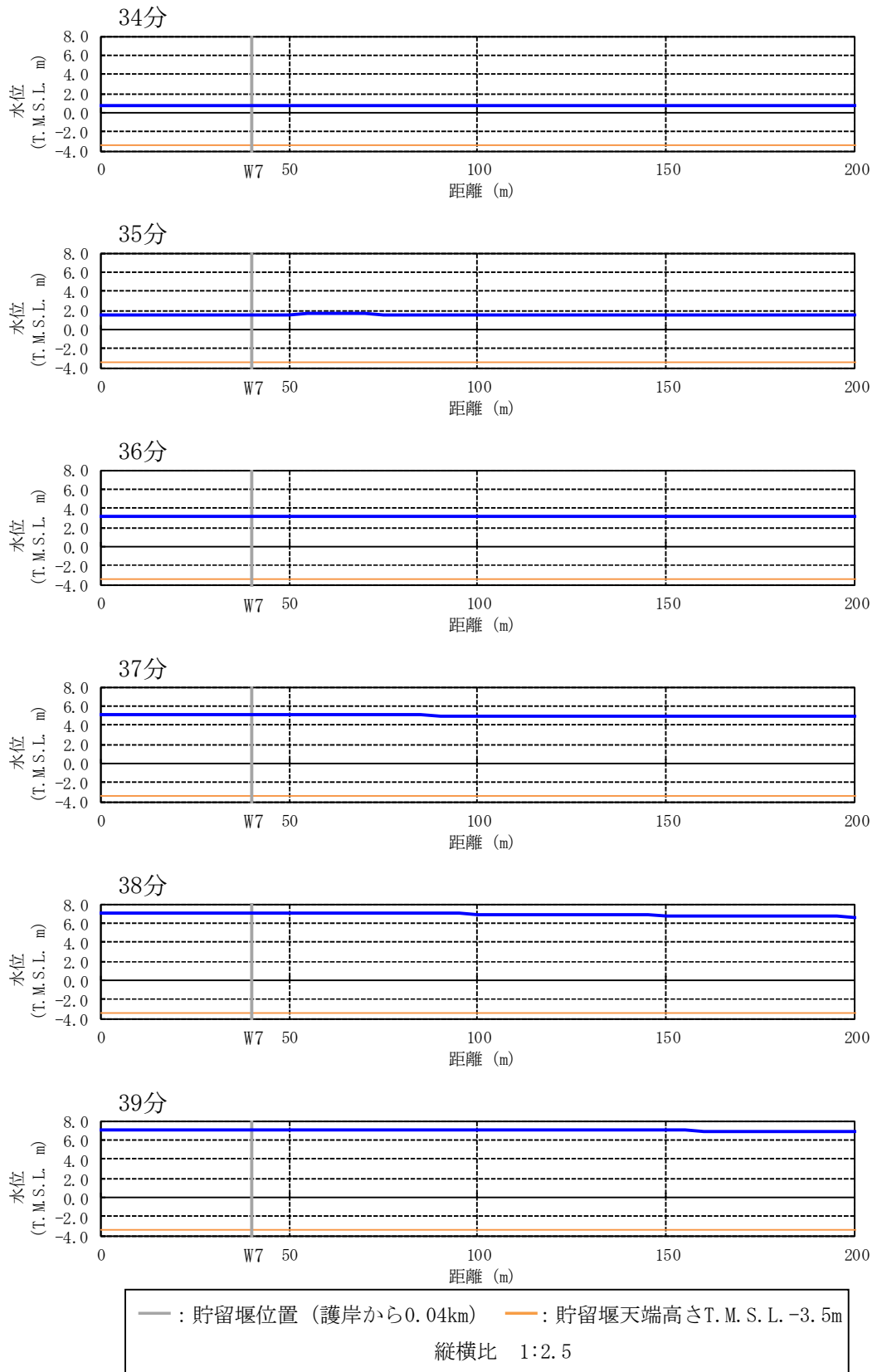


図 4.7 参 1-11 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [34-39 分, 0-200m を拡大]

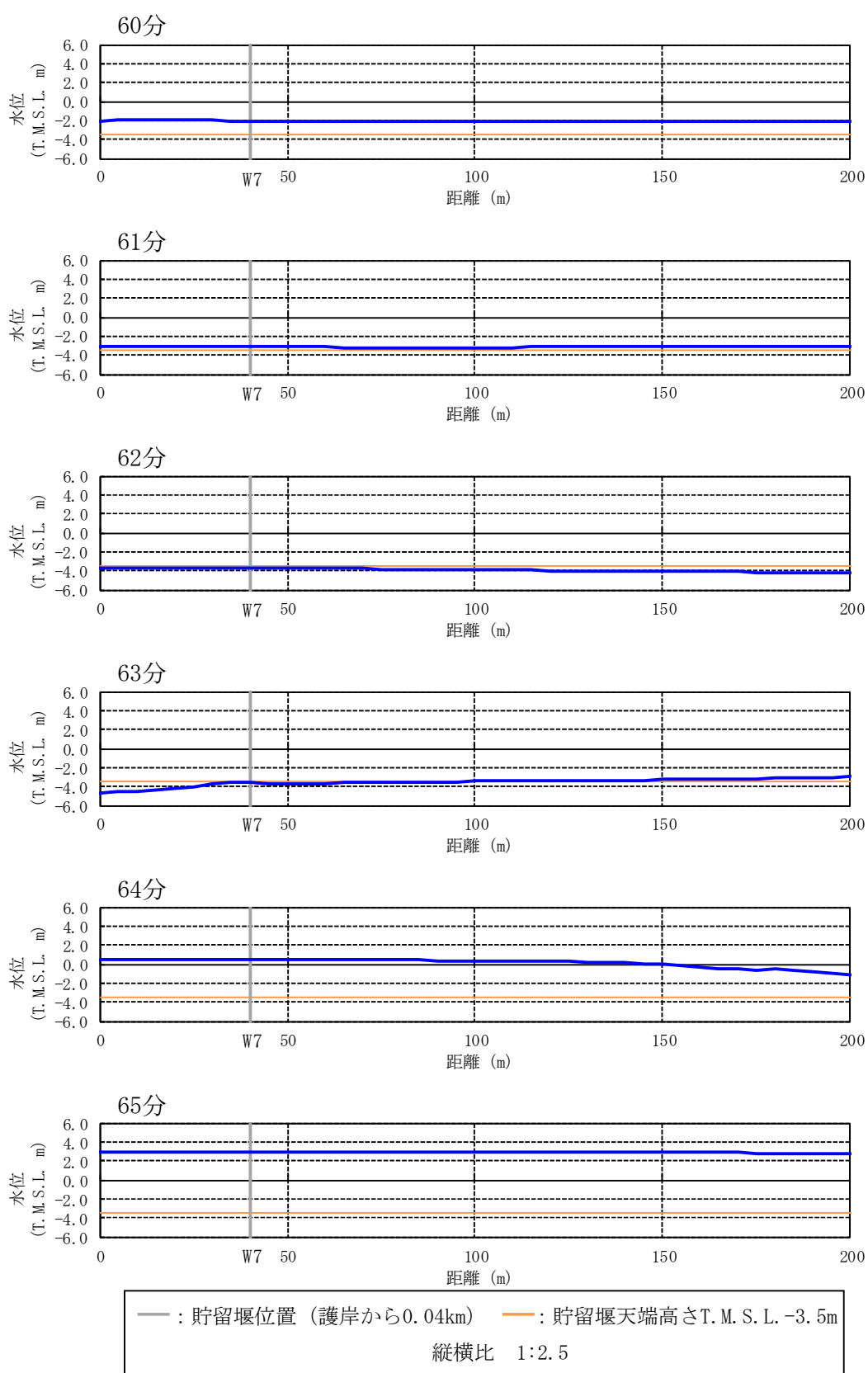


図 4.7 参 1-12 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [60-65 分, 0-200m を拡大]

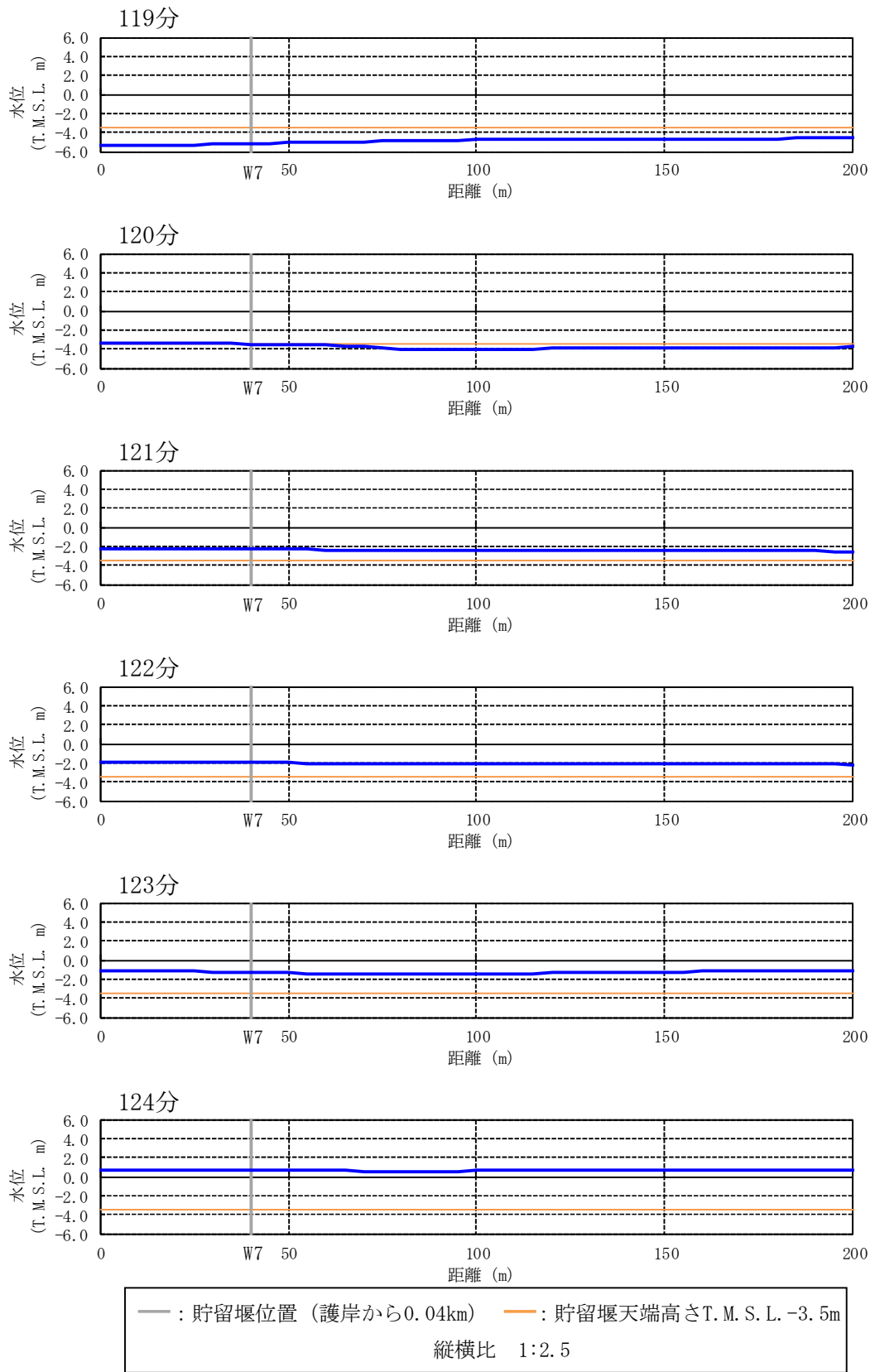


図 4.7 参 1-13 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [119-124 分, 0-200m を拡大]

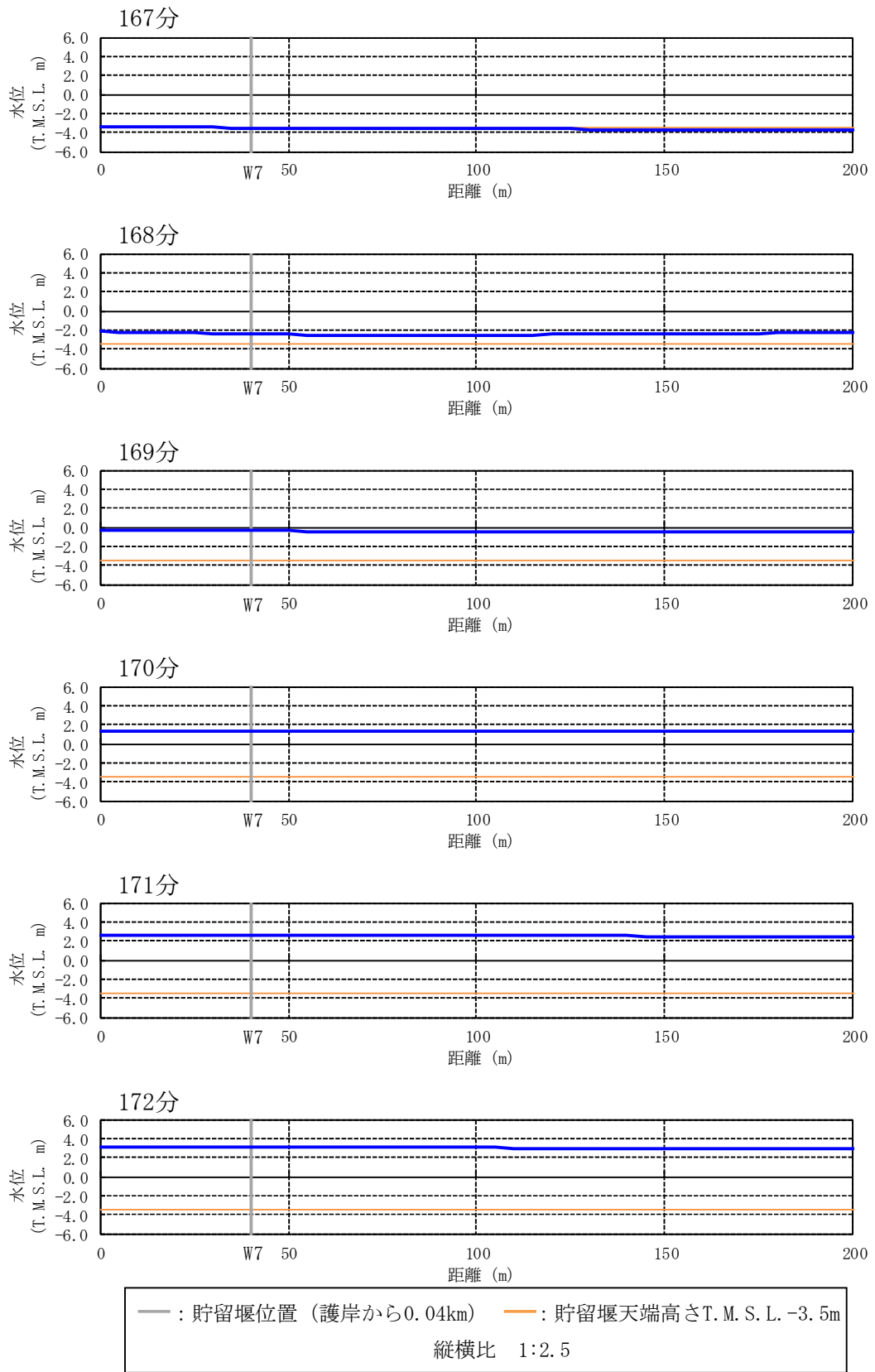


図 4.7 参 1-14 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [167-172 分, 0-200m を拡大]

1.2 基準津波 2

基準津波 2 の出力点ごとの水位時刻歴波形を図 4.7 参 1-15 に示す。基準津波 1 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 1-16 から図 4.7 参 1-17 に示す。また、水位の空間分布（全景）の時間変化を図 4.7 参 1-20 から図 4.7 参 1-23 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 1-24 から図 4.7 参 1-27 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 2.57° 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 6.38° 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 2 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

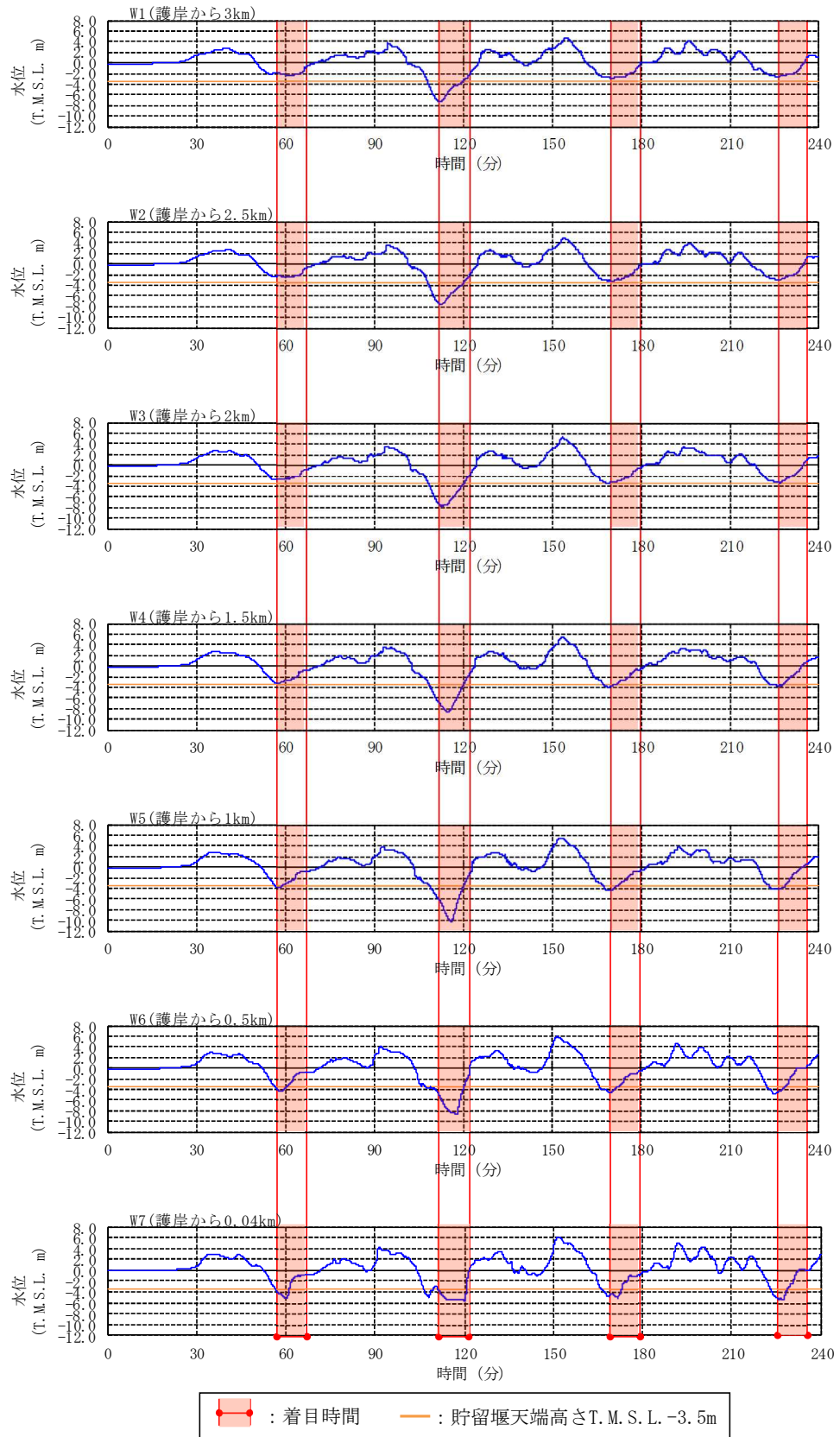


図 4.7 参 1-15 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [0-240 分]

b. 水位時刻歴波形(着目時間の拡大)

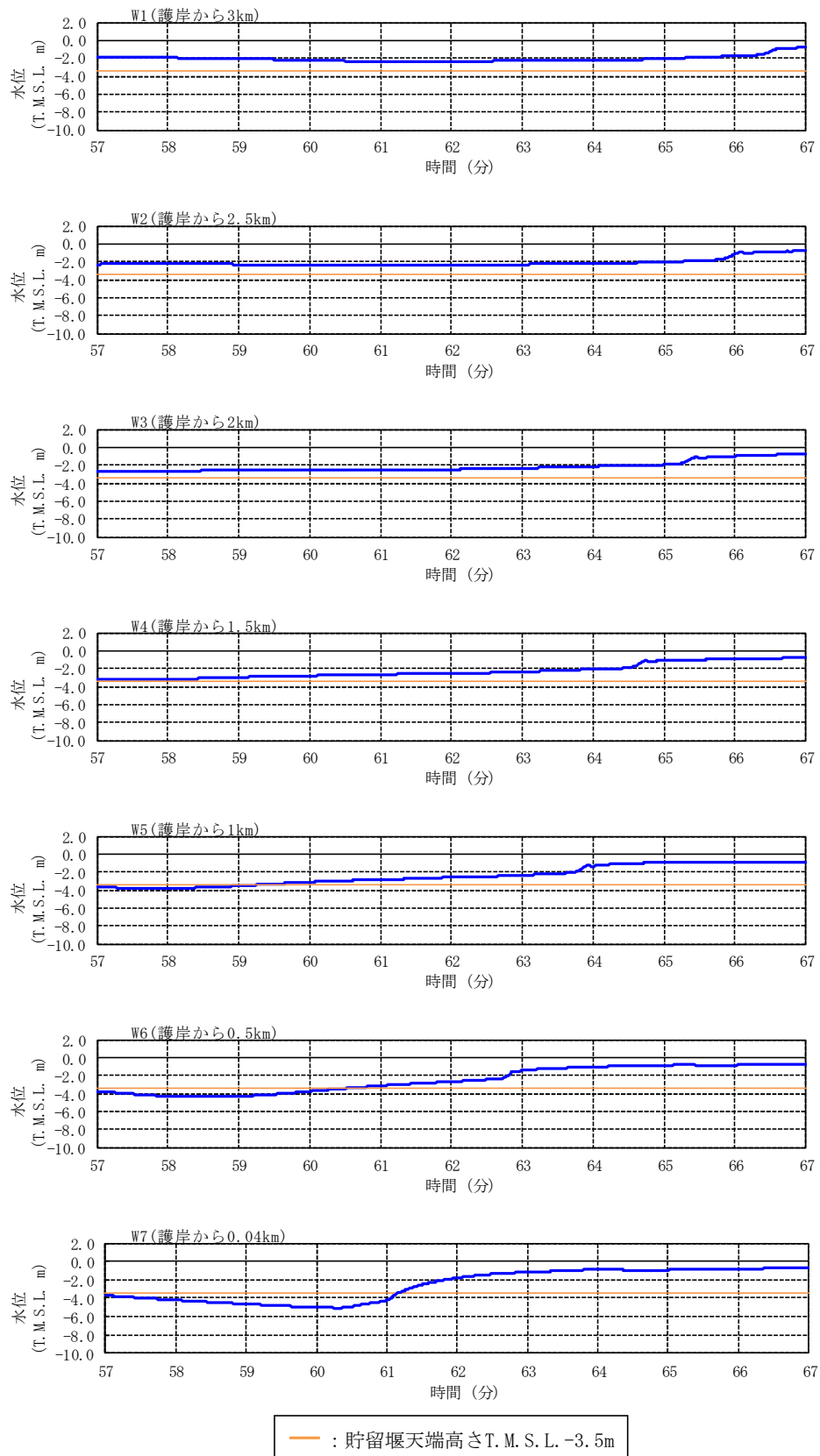


図 4.7 参 1-16 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [57-67 分を拡大]

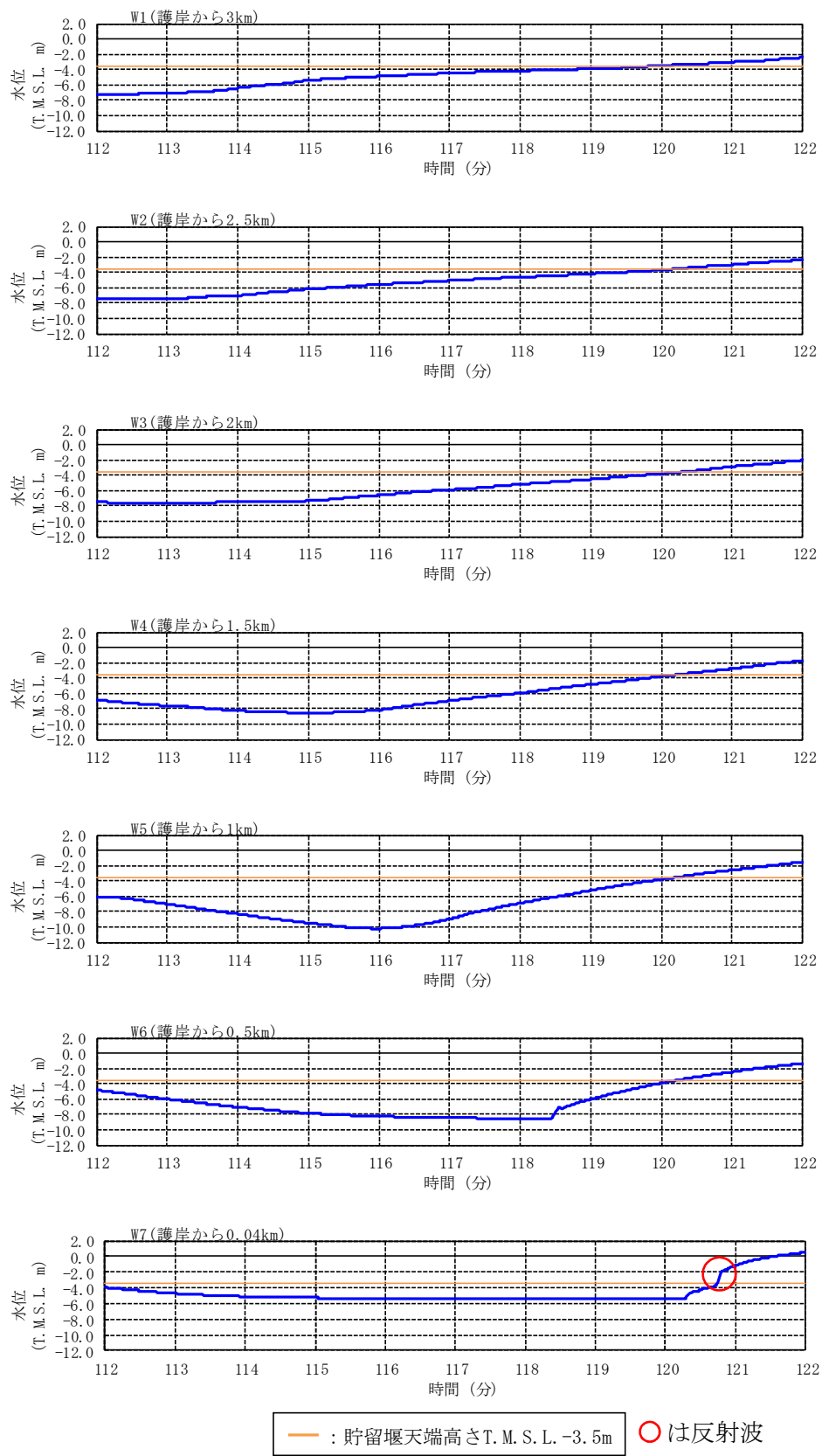


図 4.7 参 1-17 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [112-122 分を拡大]

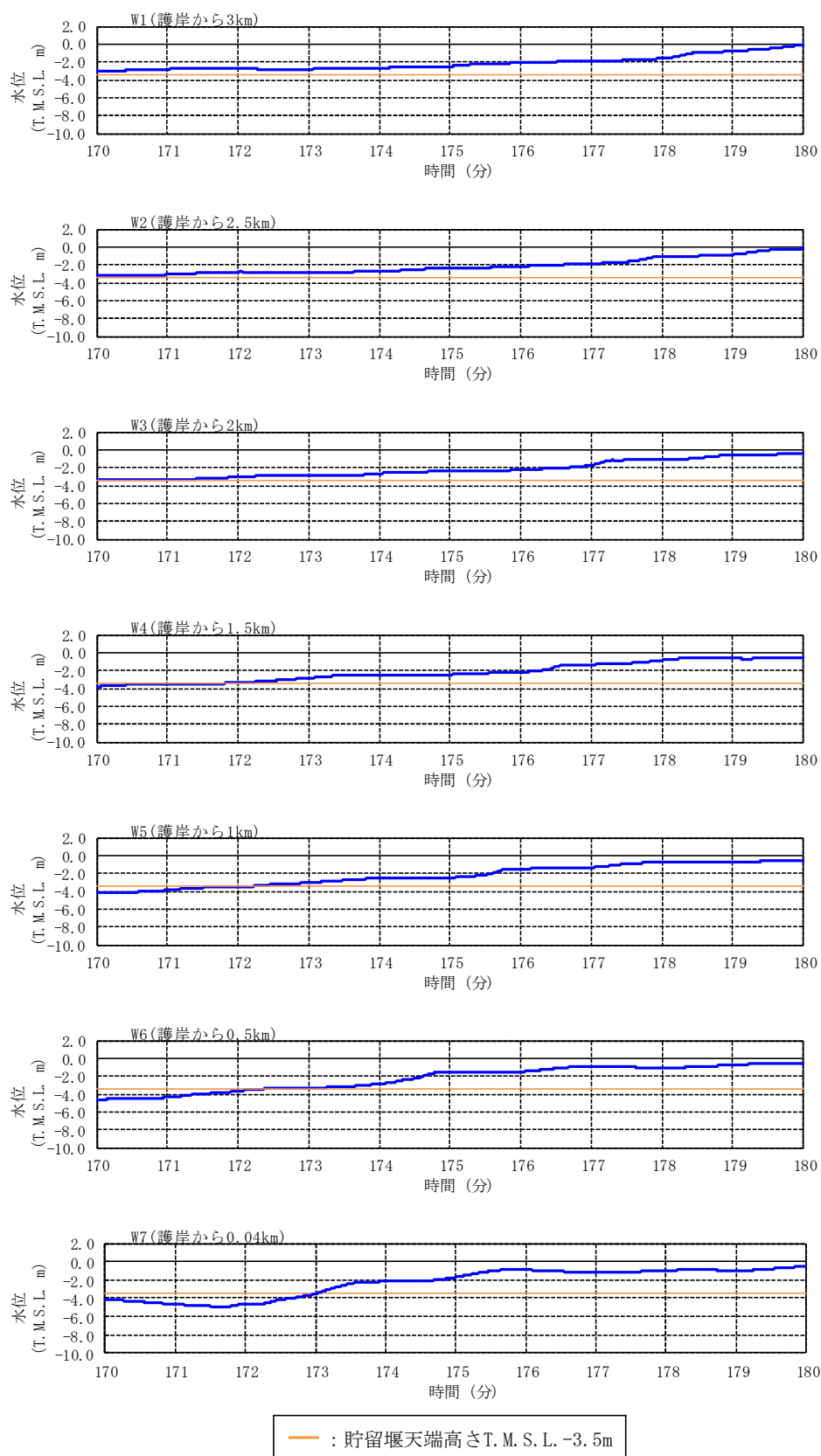


図 4.7 参 1-18 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [170-180 分を拡大]

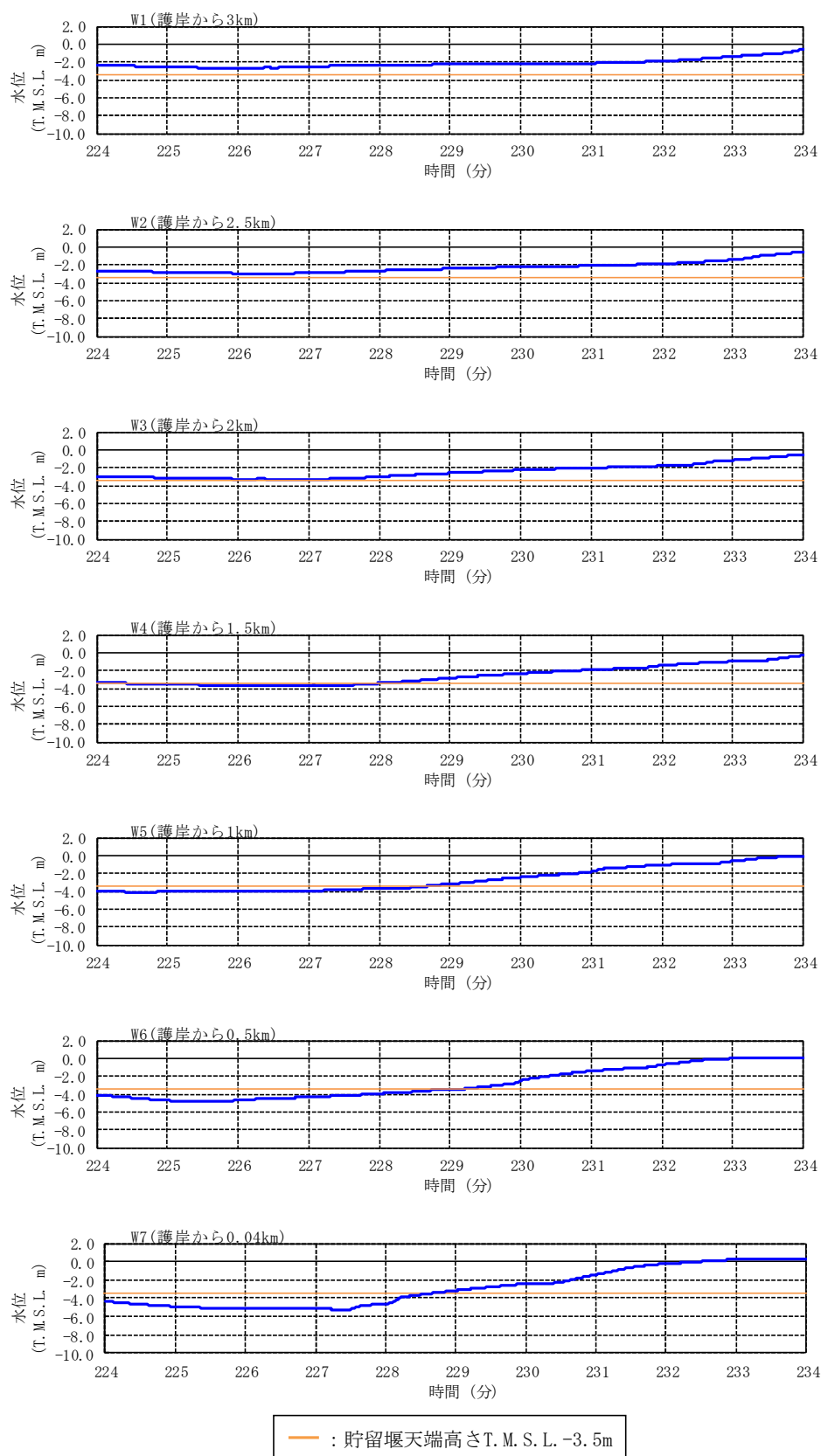


図 4.7 参 1-19 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [224-234 分を拡大]

c. 着目時間別の水位の空間分布
 (1) 全景

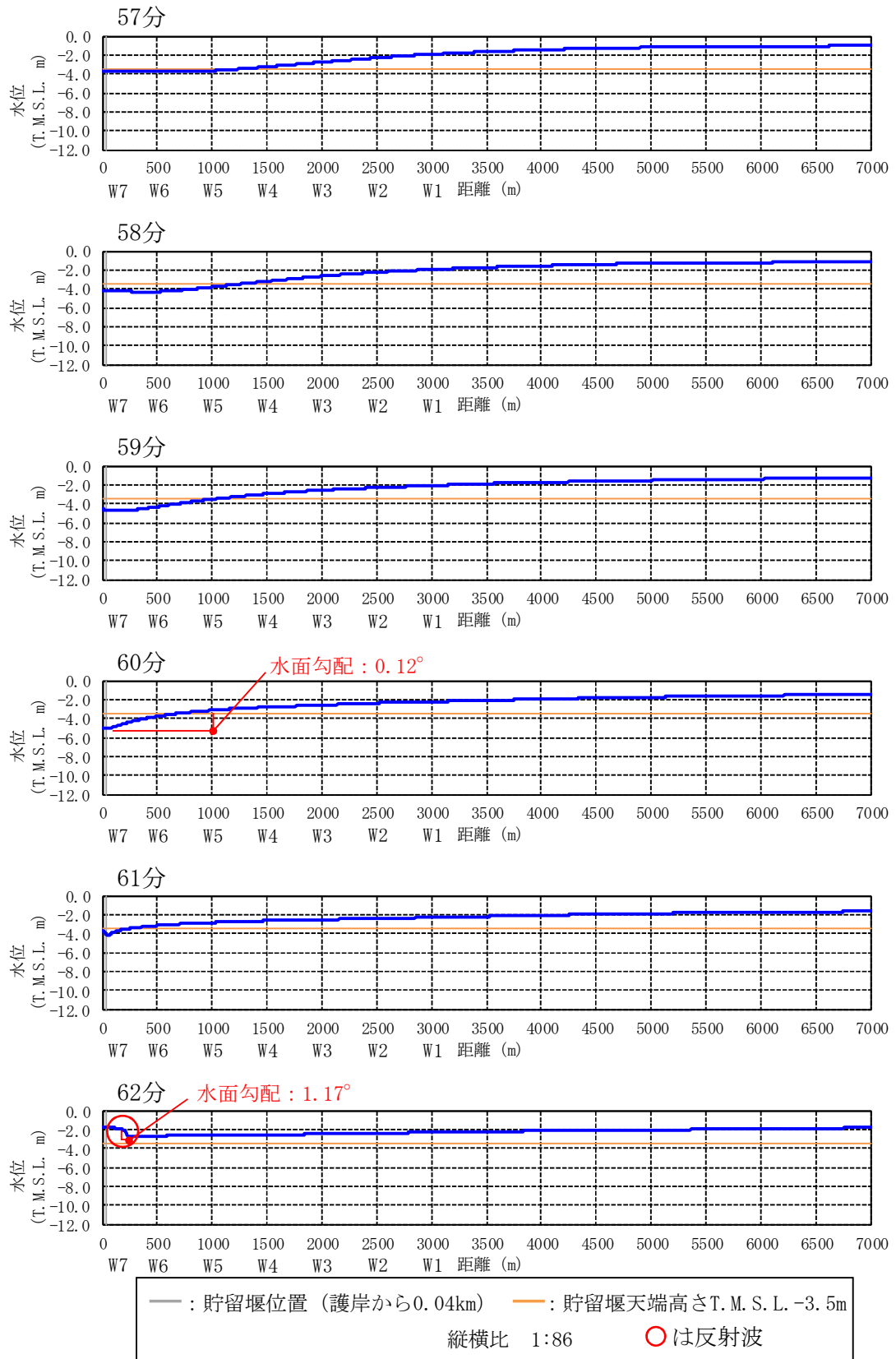


図 4.7 参 1-20 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [57-62 分]

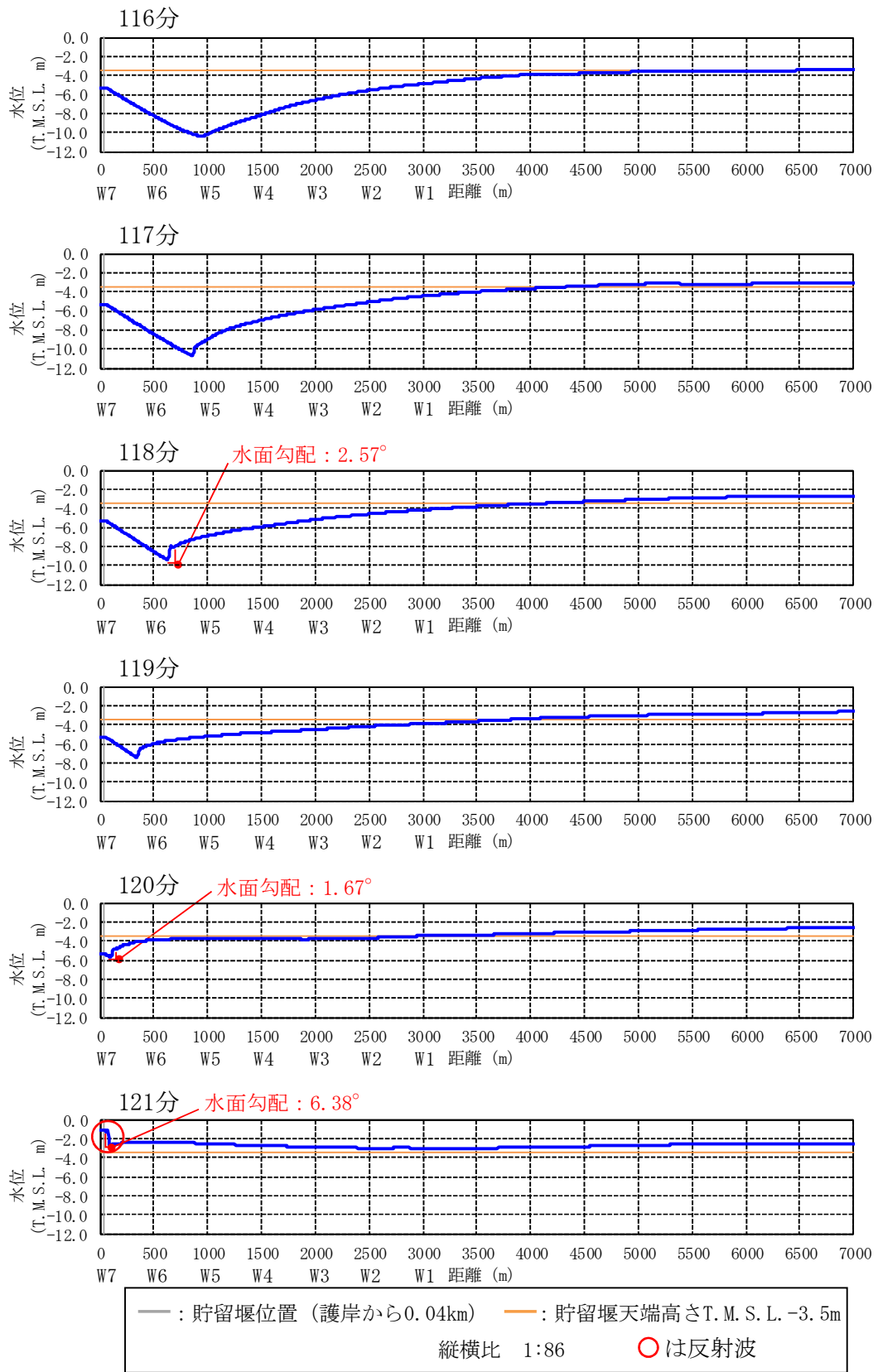


図 4.7 参 1-21 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [115-120 分]

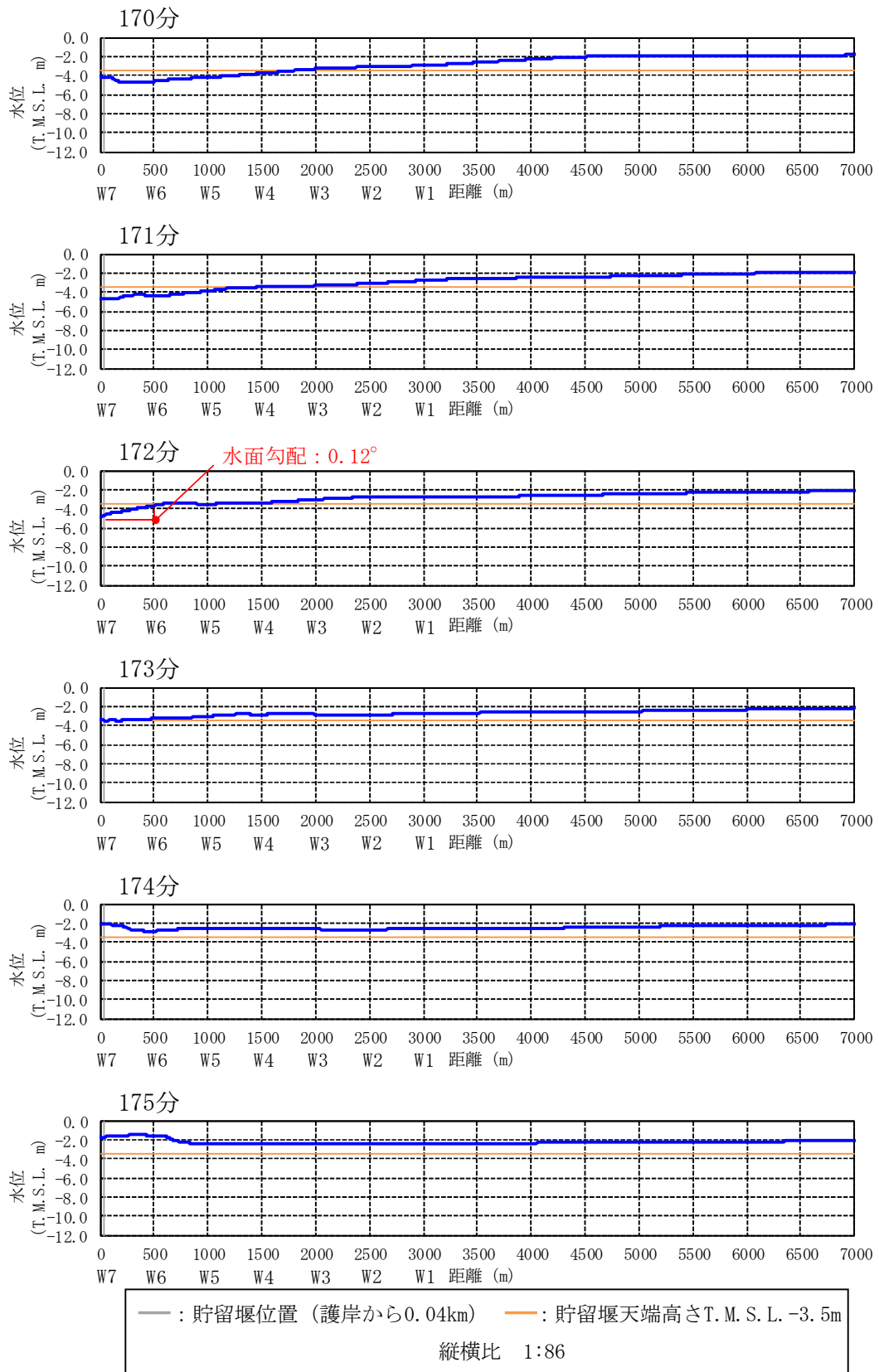


図 4.7 参 1-22 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [170-175 分]

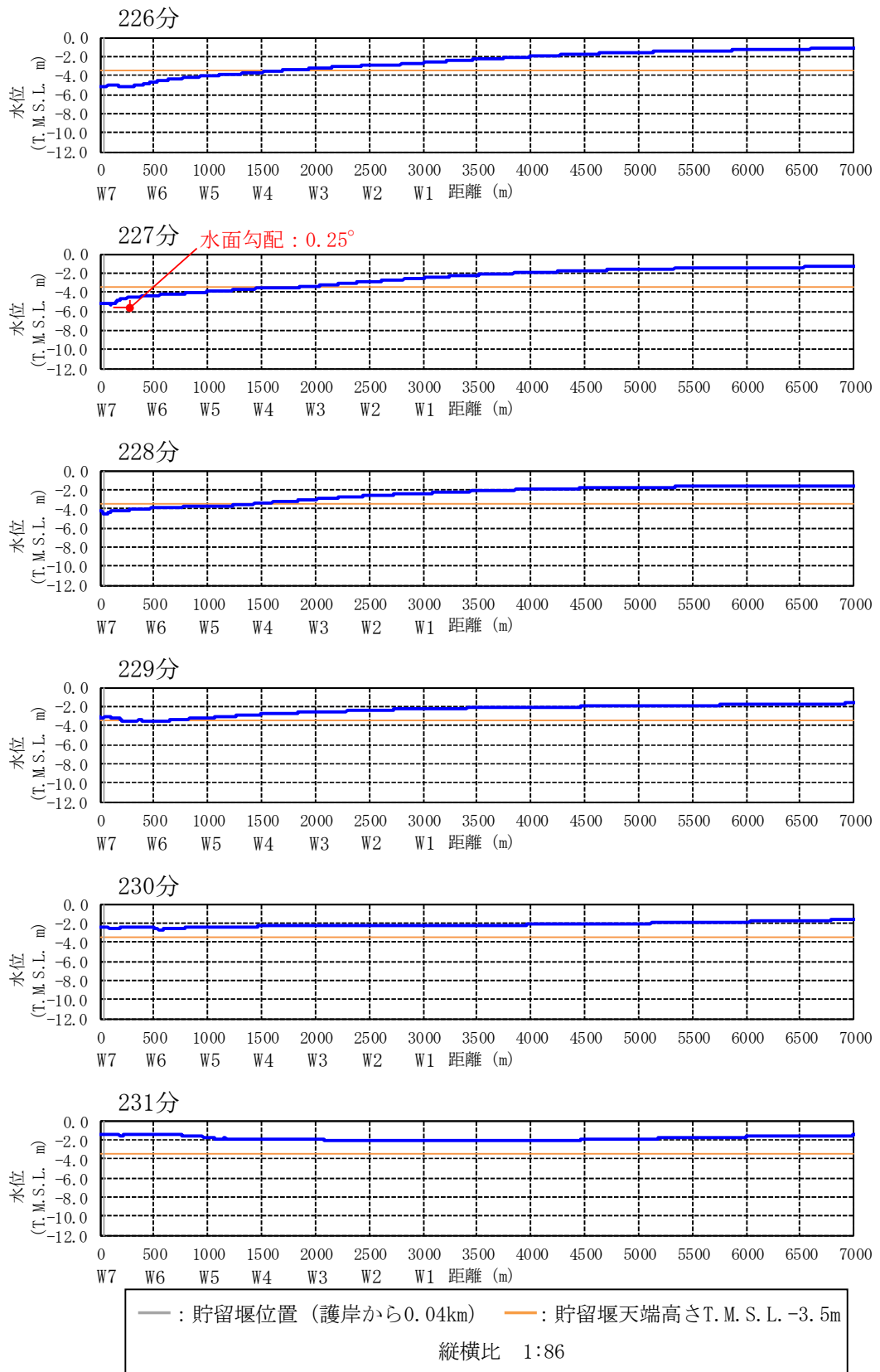


図 4.7 参 1-23 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [226-231 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

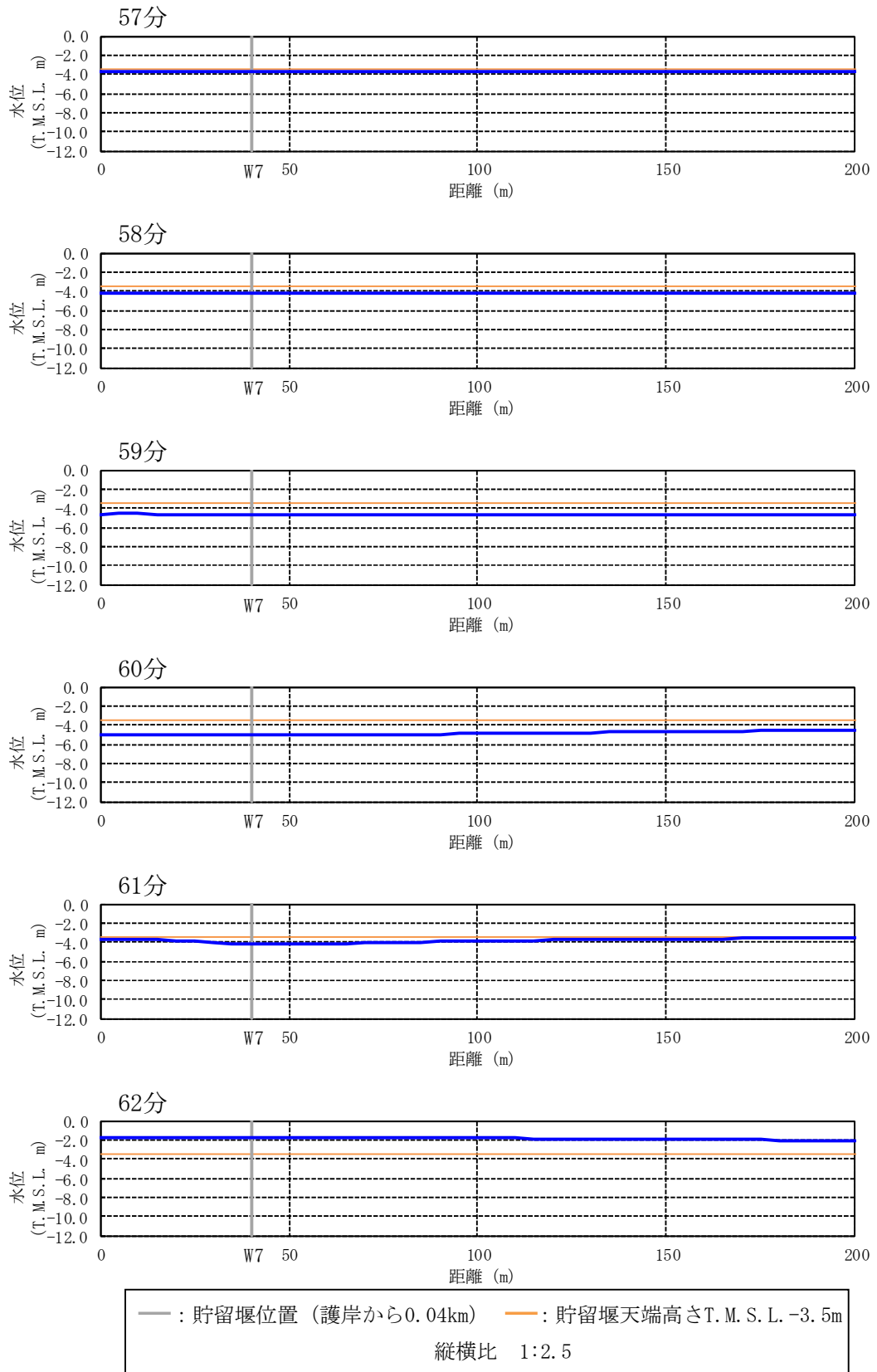


図 4.7 参 1-24 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [57-62 分, 0-200m を拡大]

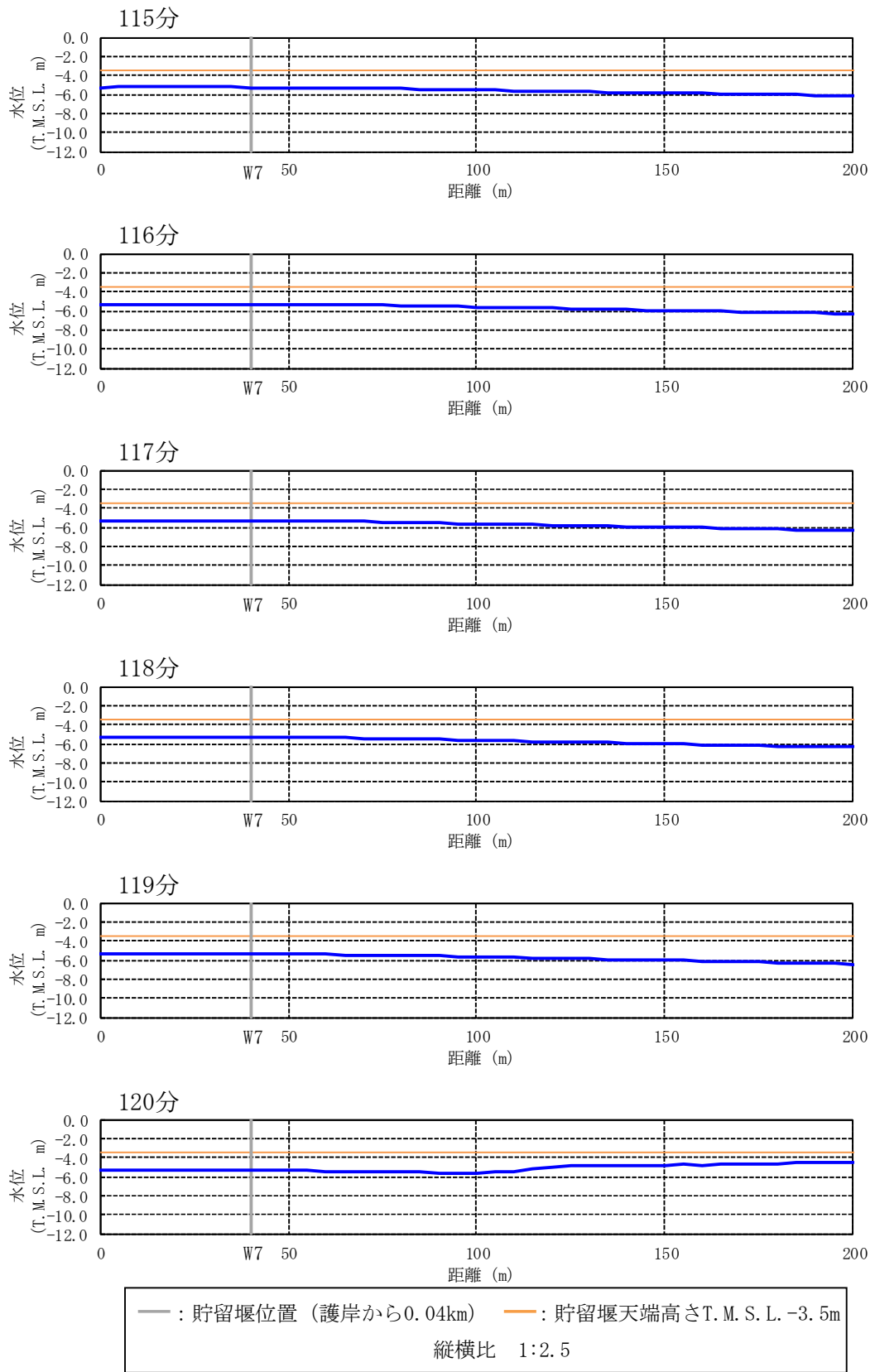


図 4.7 参 1-25 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [115-120 分, 0-200m を拡大]

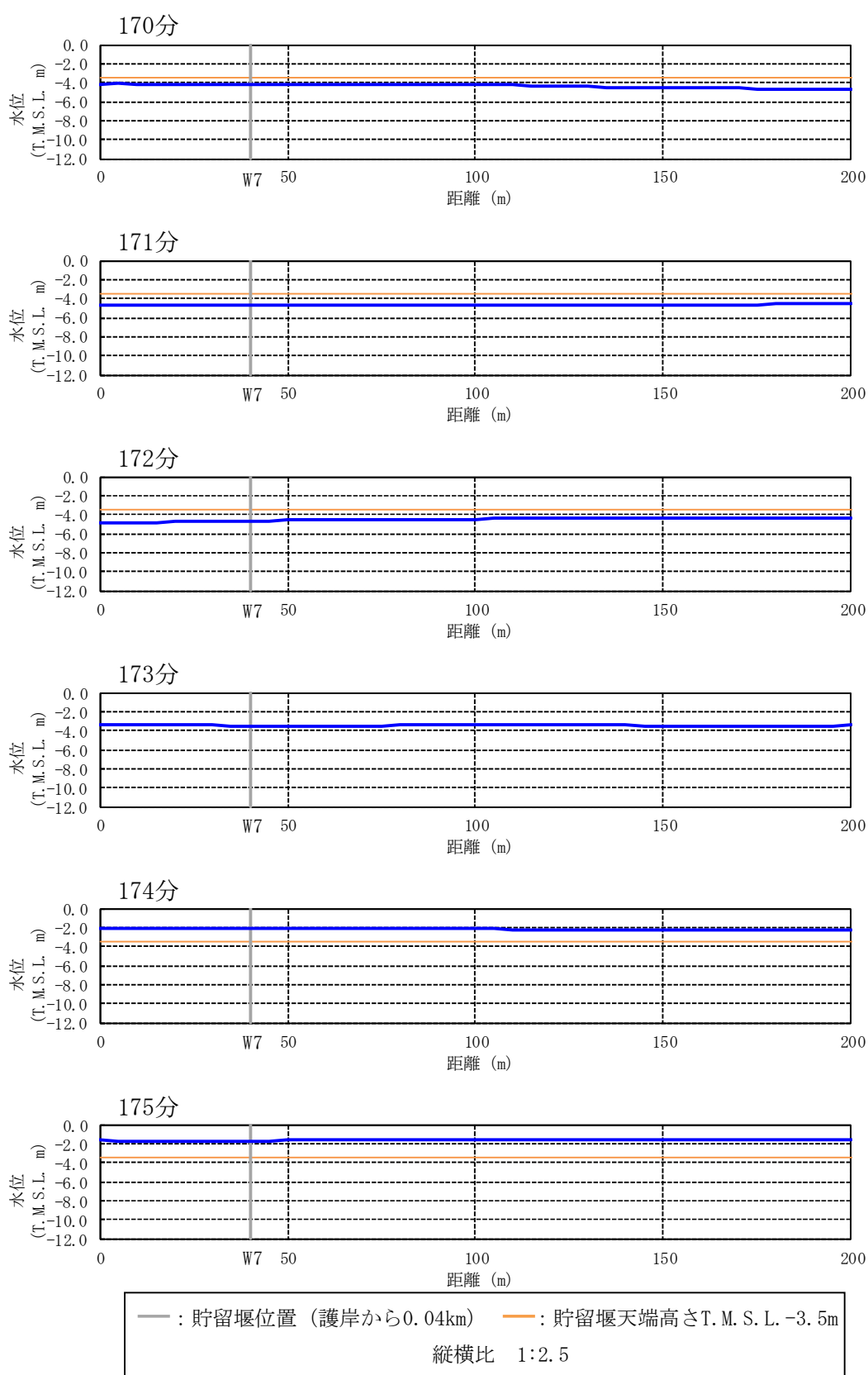


図 4.7 参 1-26 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [170-175 分, 0-200m を拡大]

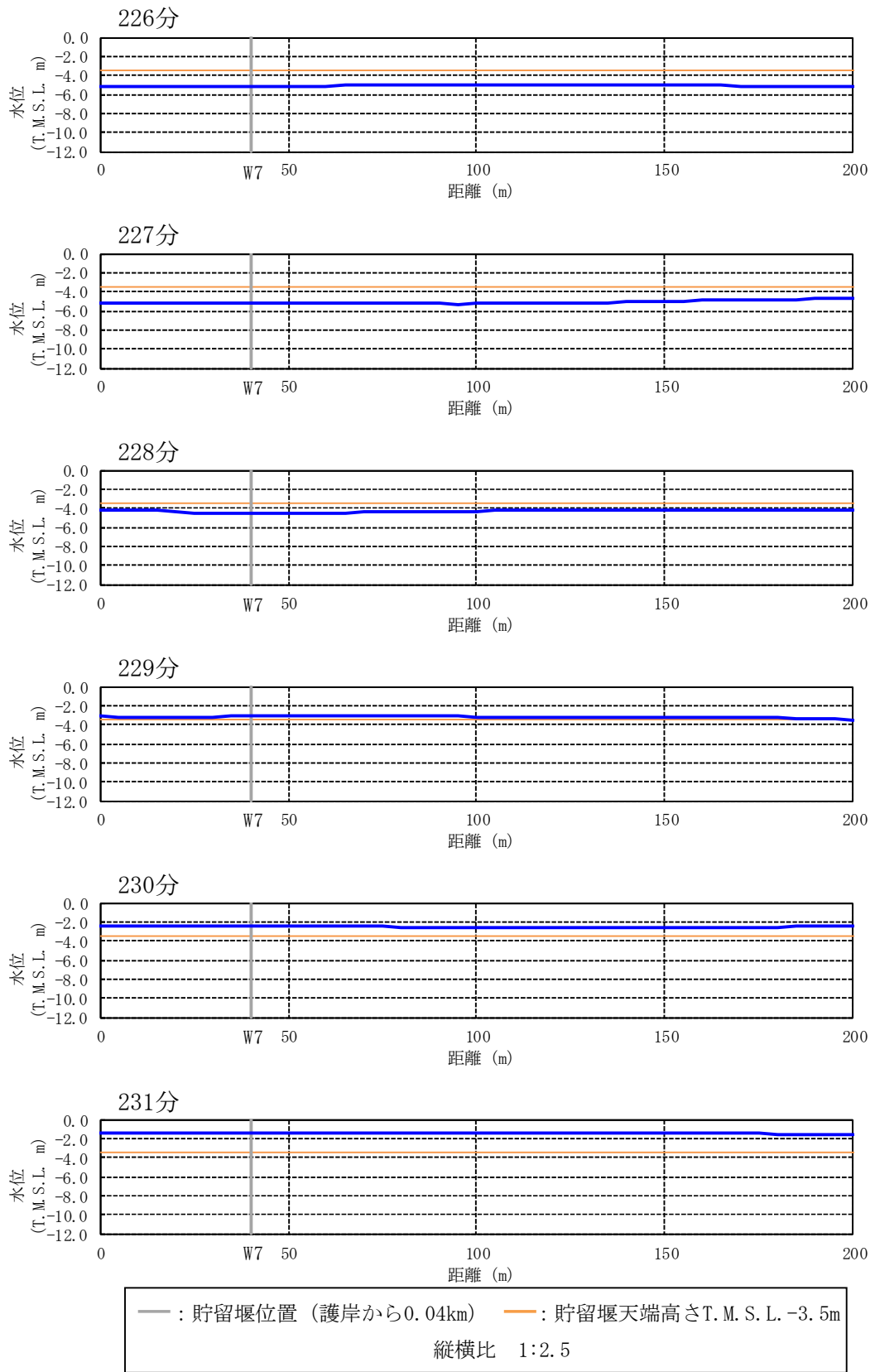


図 4.7 参 1-27 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [226-231 分, 0-200m を拡大]

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° 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° 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

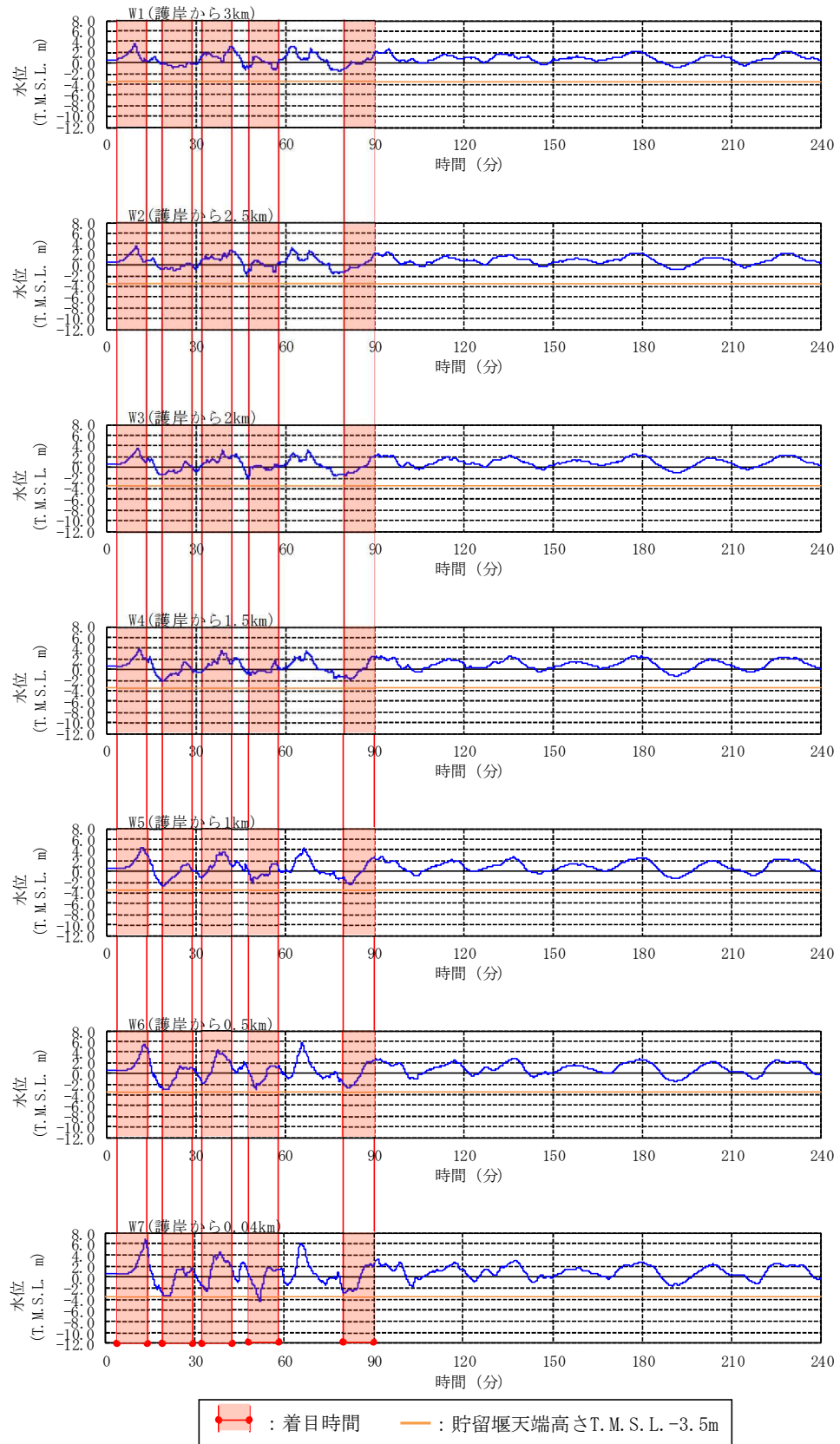


図 4.7 参 1-28 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [0-240 分]

b. 水位時刻歴波形(着目時間の拡大)

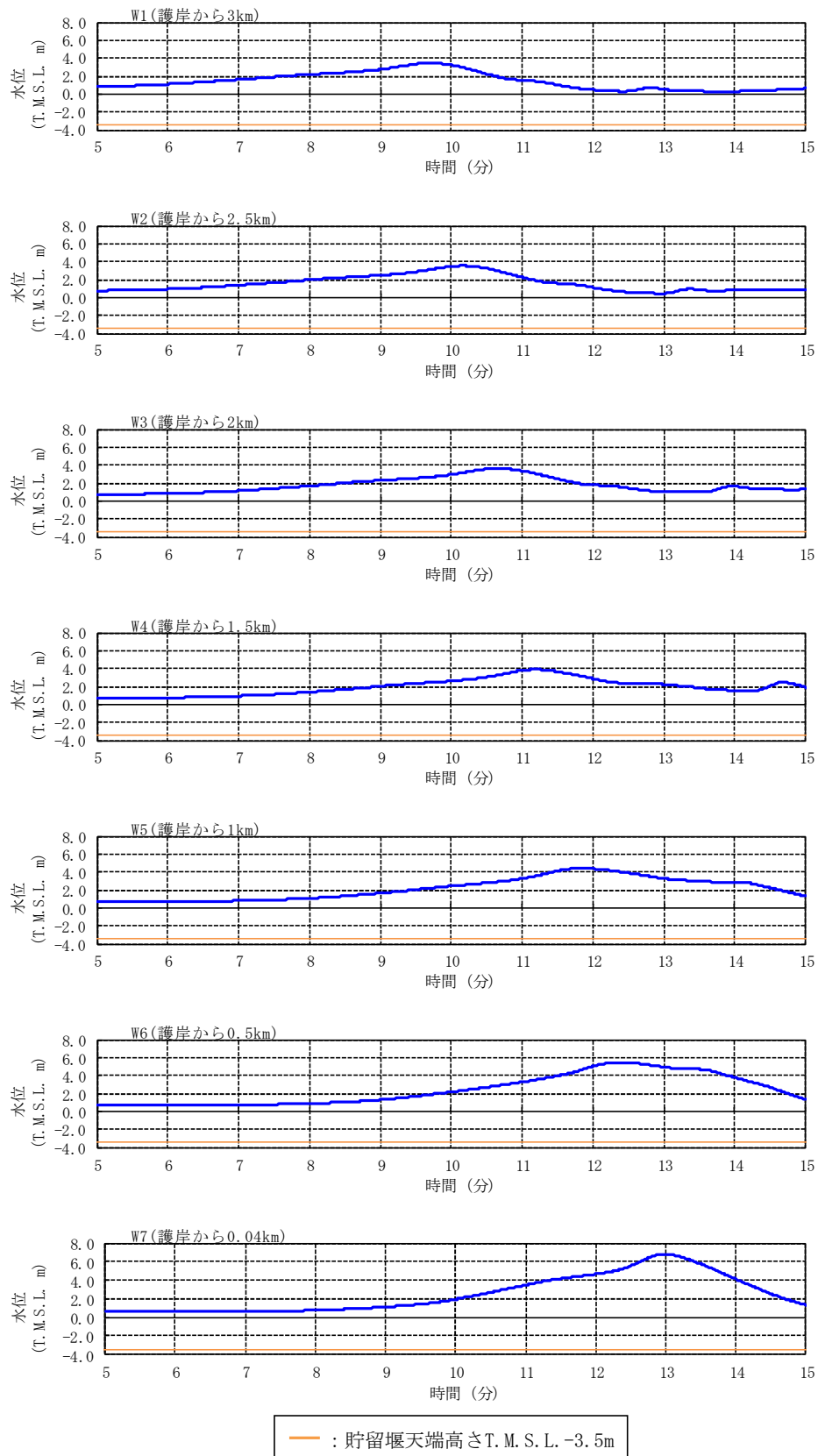


図 4.7 参 1-29 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [5-15 分を拡大]

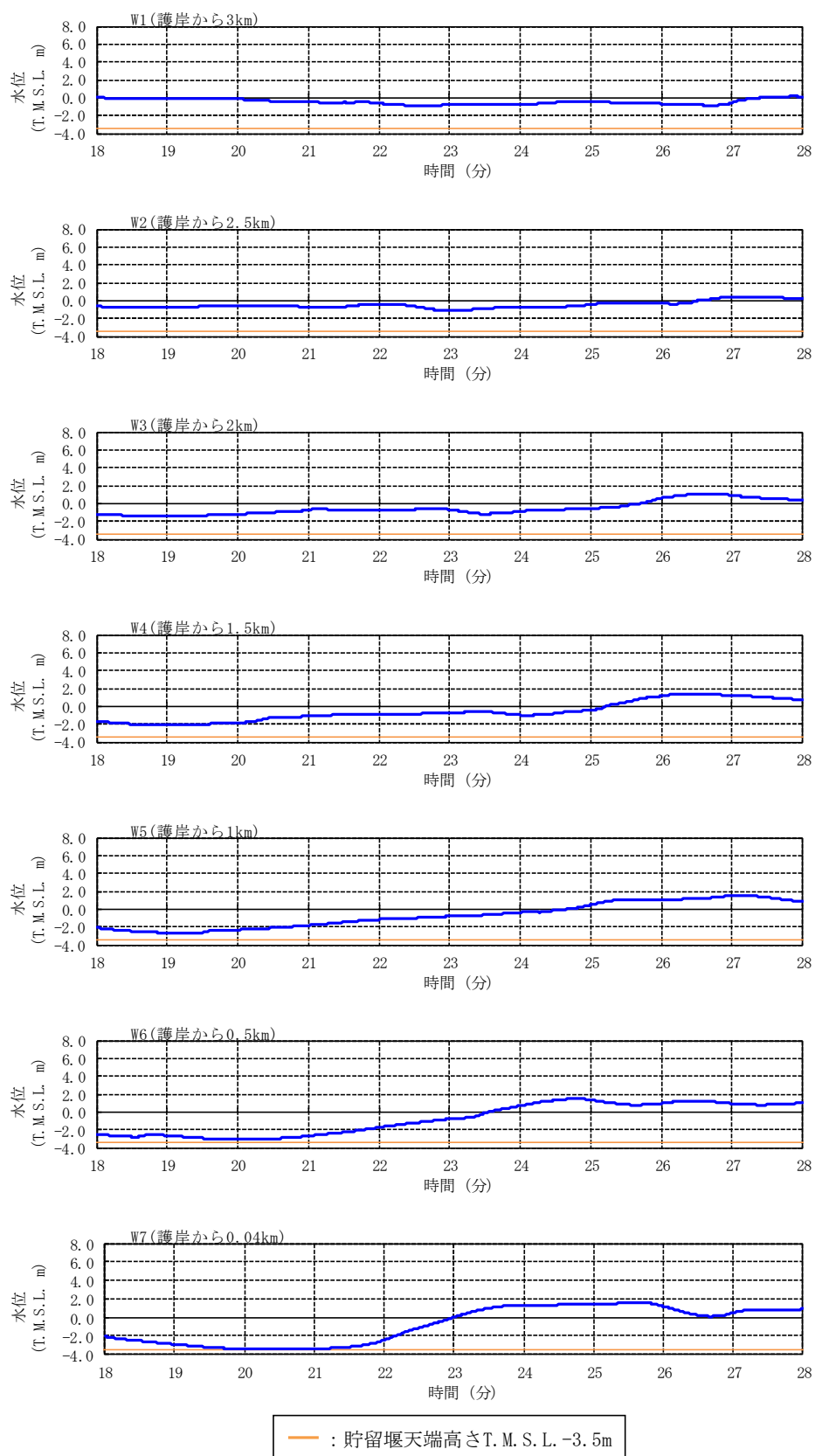


図 4.7 参 1-30 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [18-28 分を拡大]

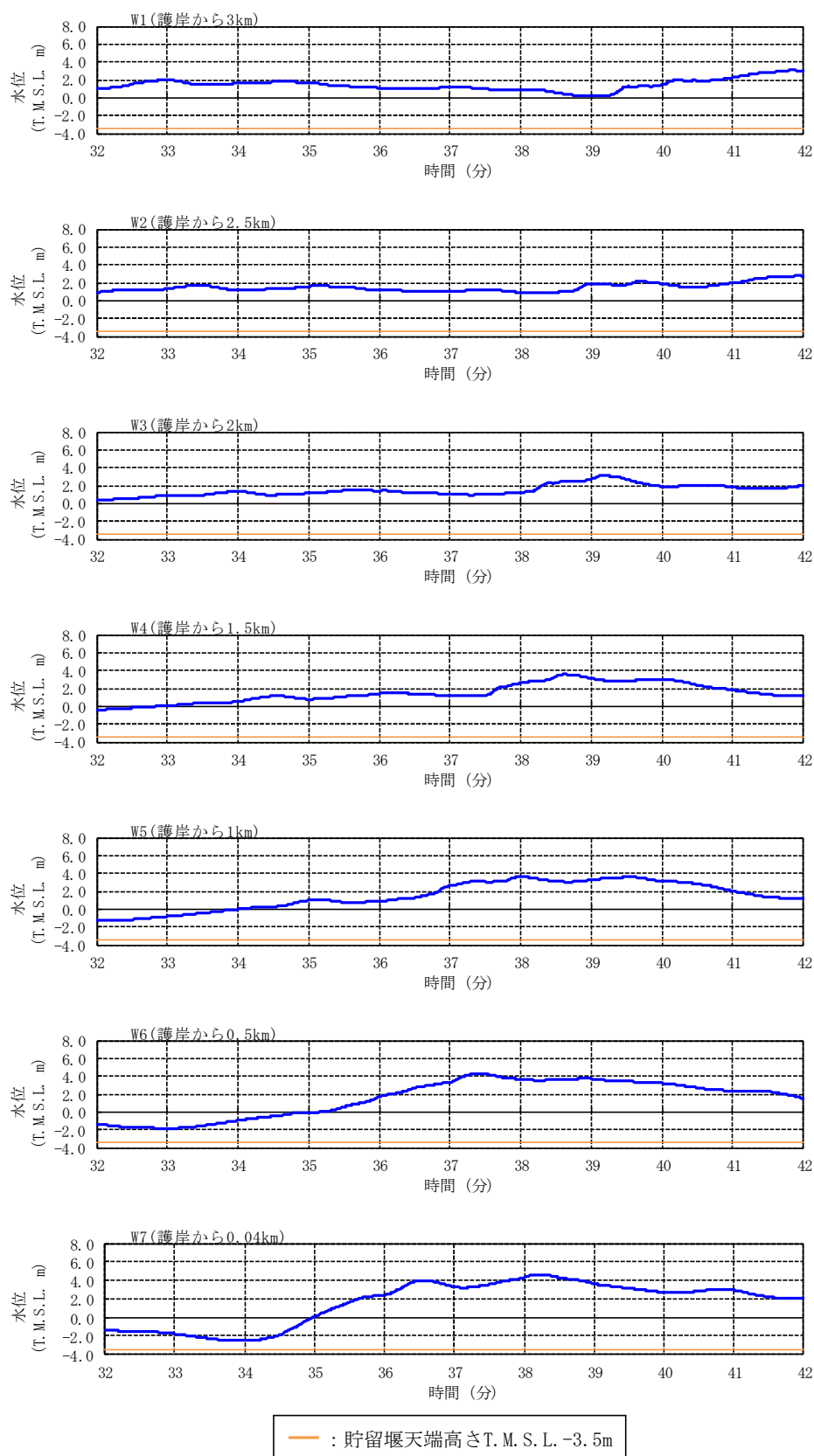


図 4.7 参 1-31 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [32-42 分を拡大]

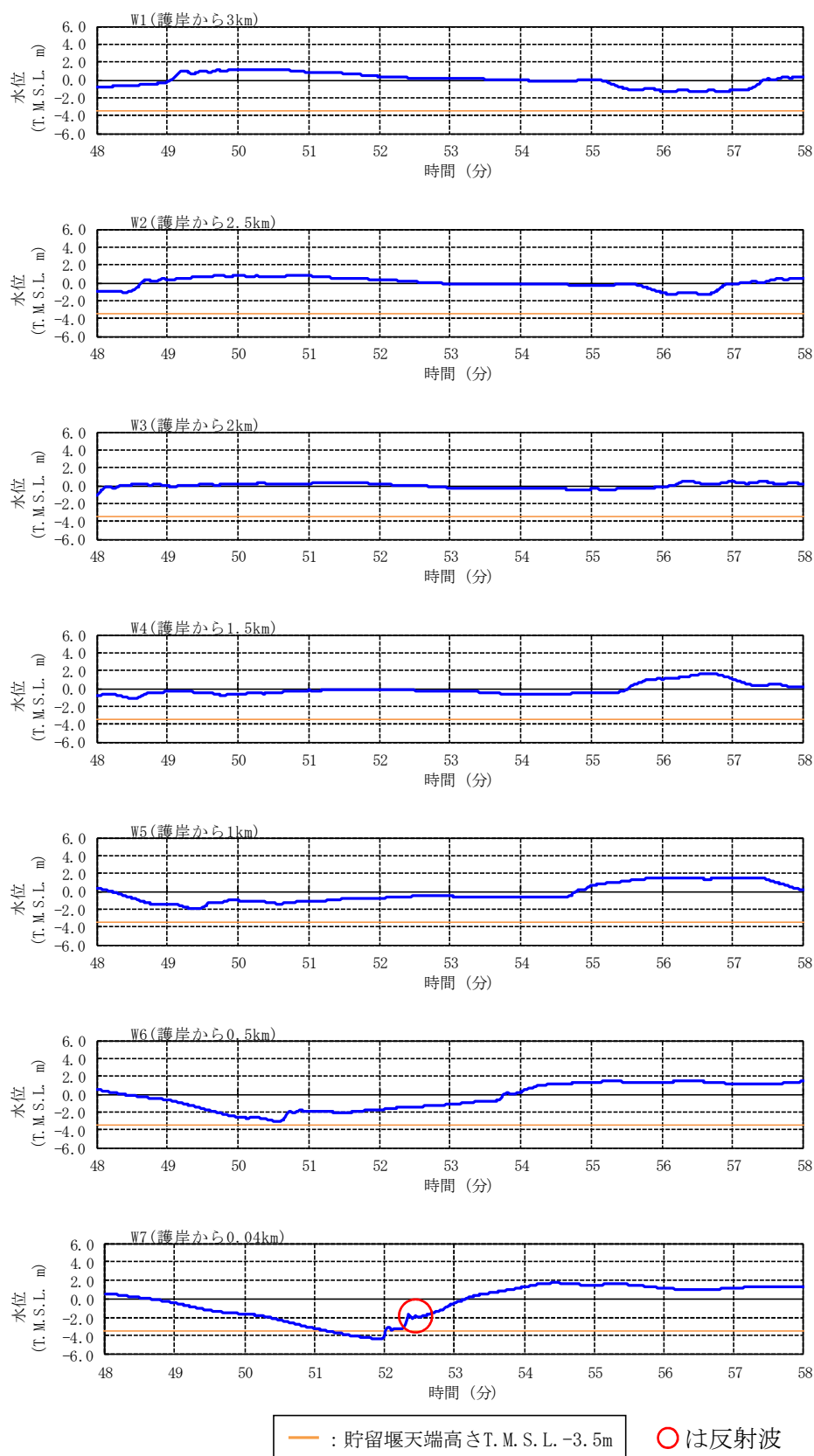


図 4.7 参 1-32 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [48-58 分を拡大]

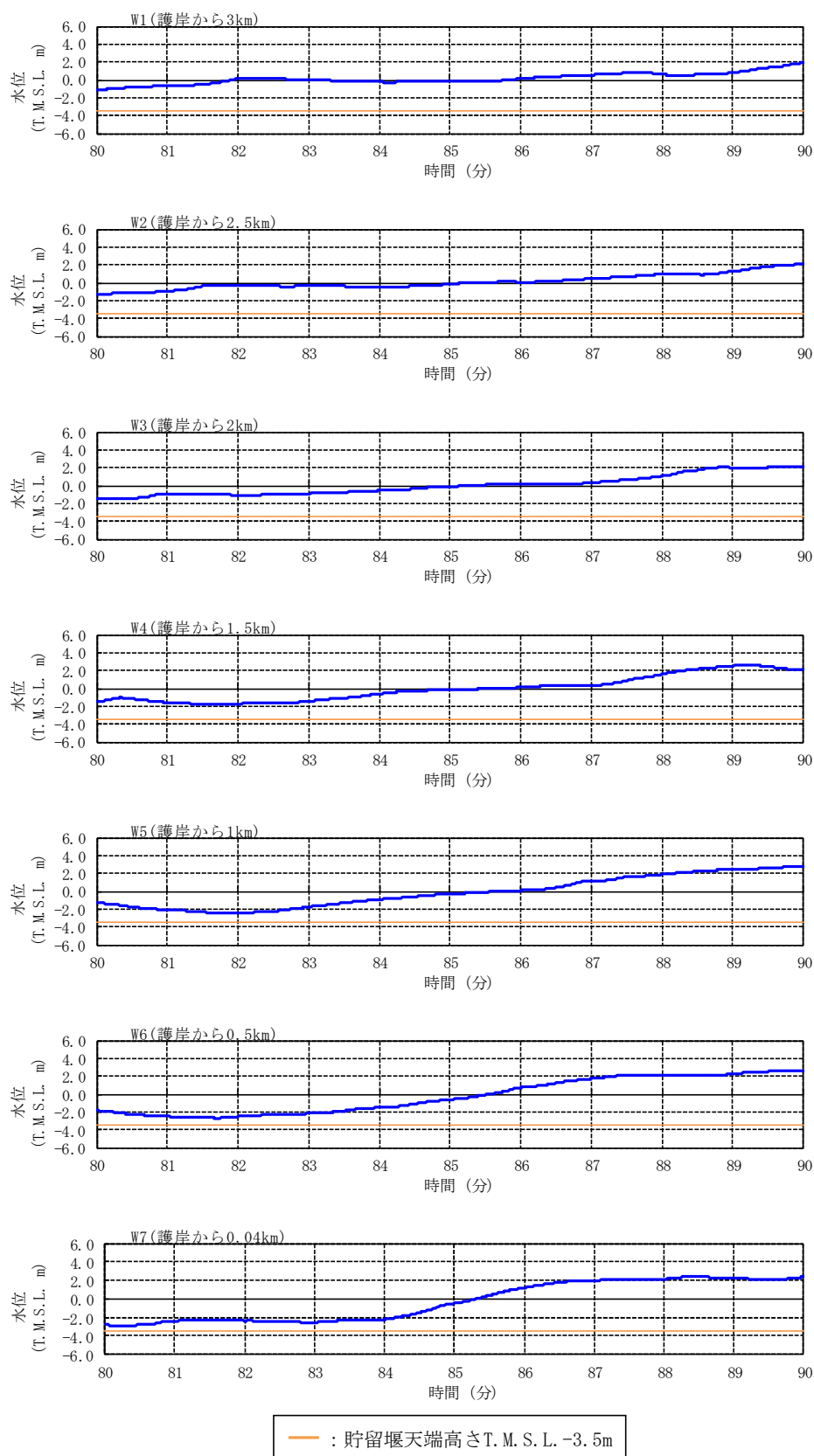


図 4.7 参 1-33 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [80-90 分を拡大]

c. 着目時間別の水位の空間分布

(1) 全景

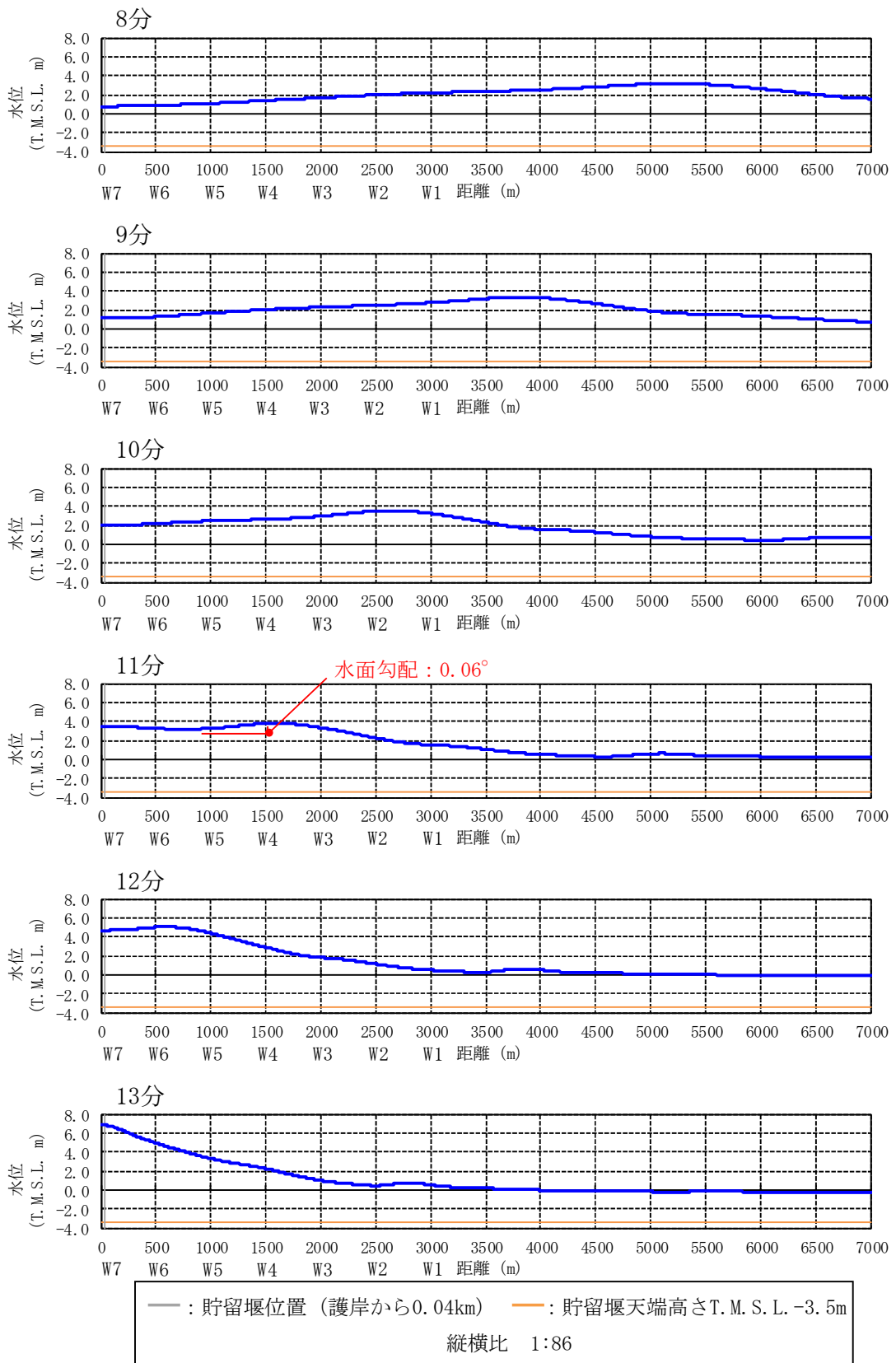


図 4.7 参 1-34 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [8-13 分]

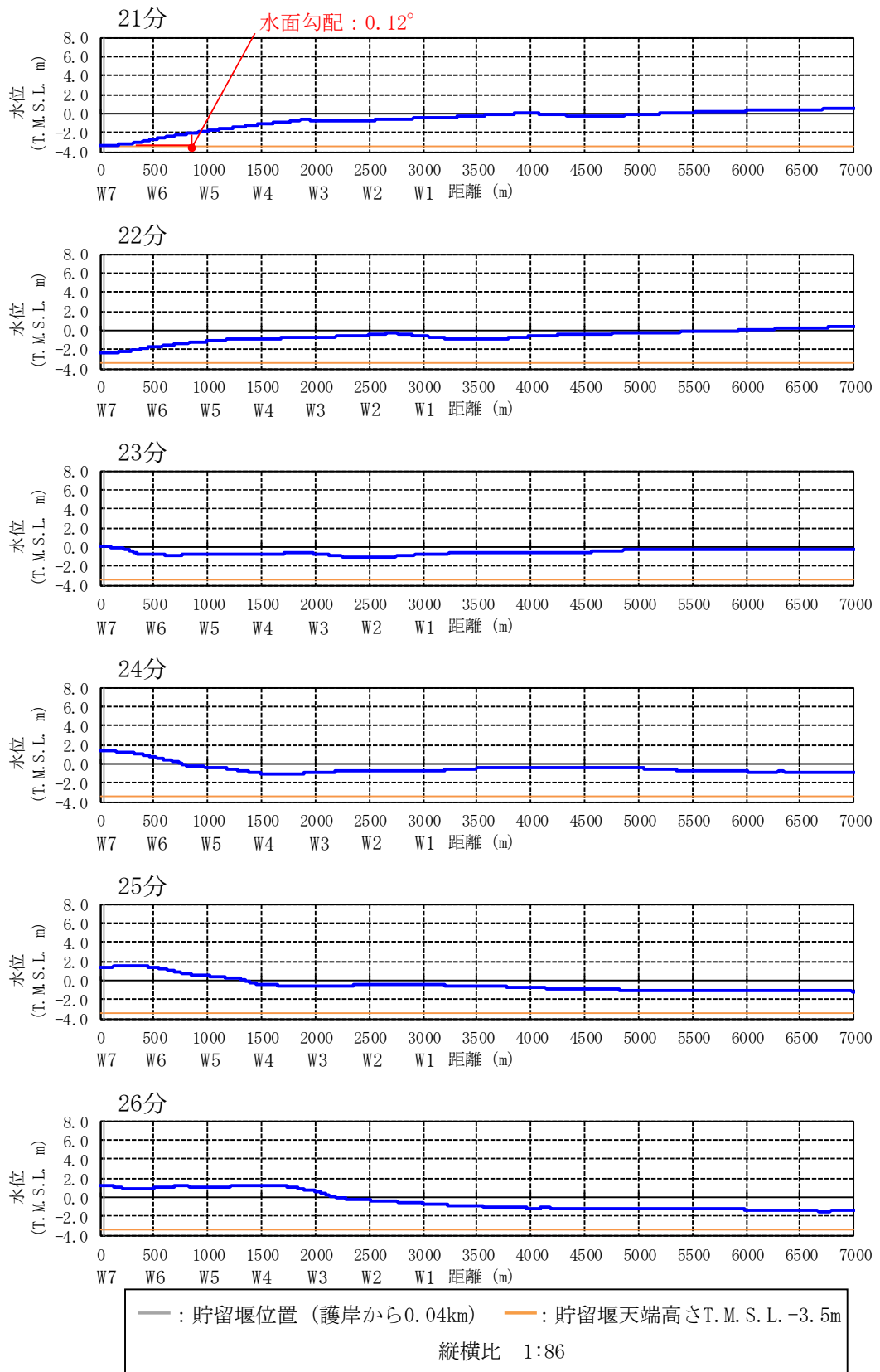


図 4.7 参 1-35 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [21-26 分]

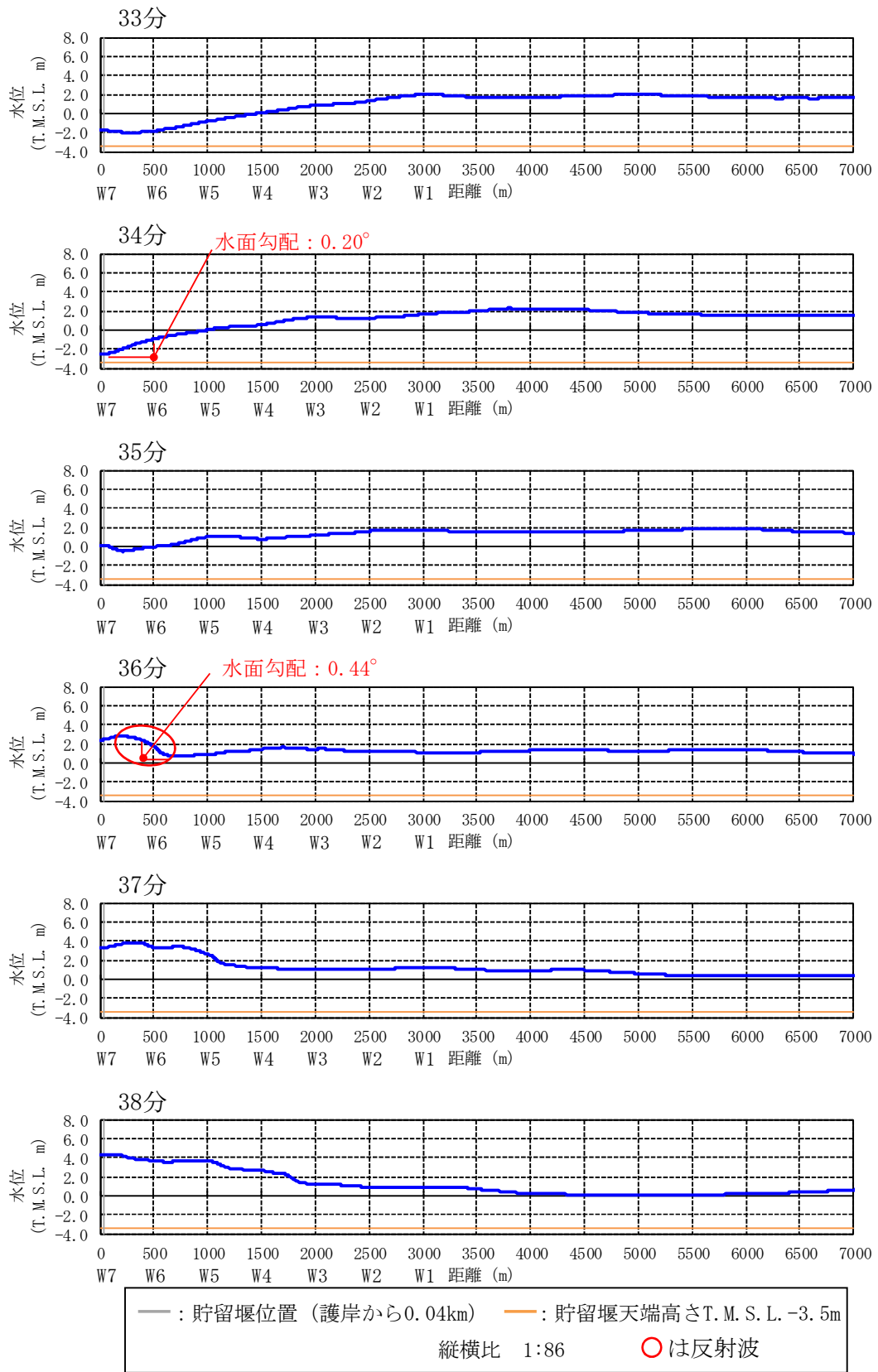


図 4.7 参 1-36 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [33-38 分]

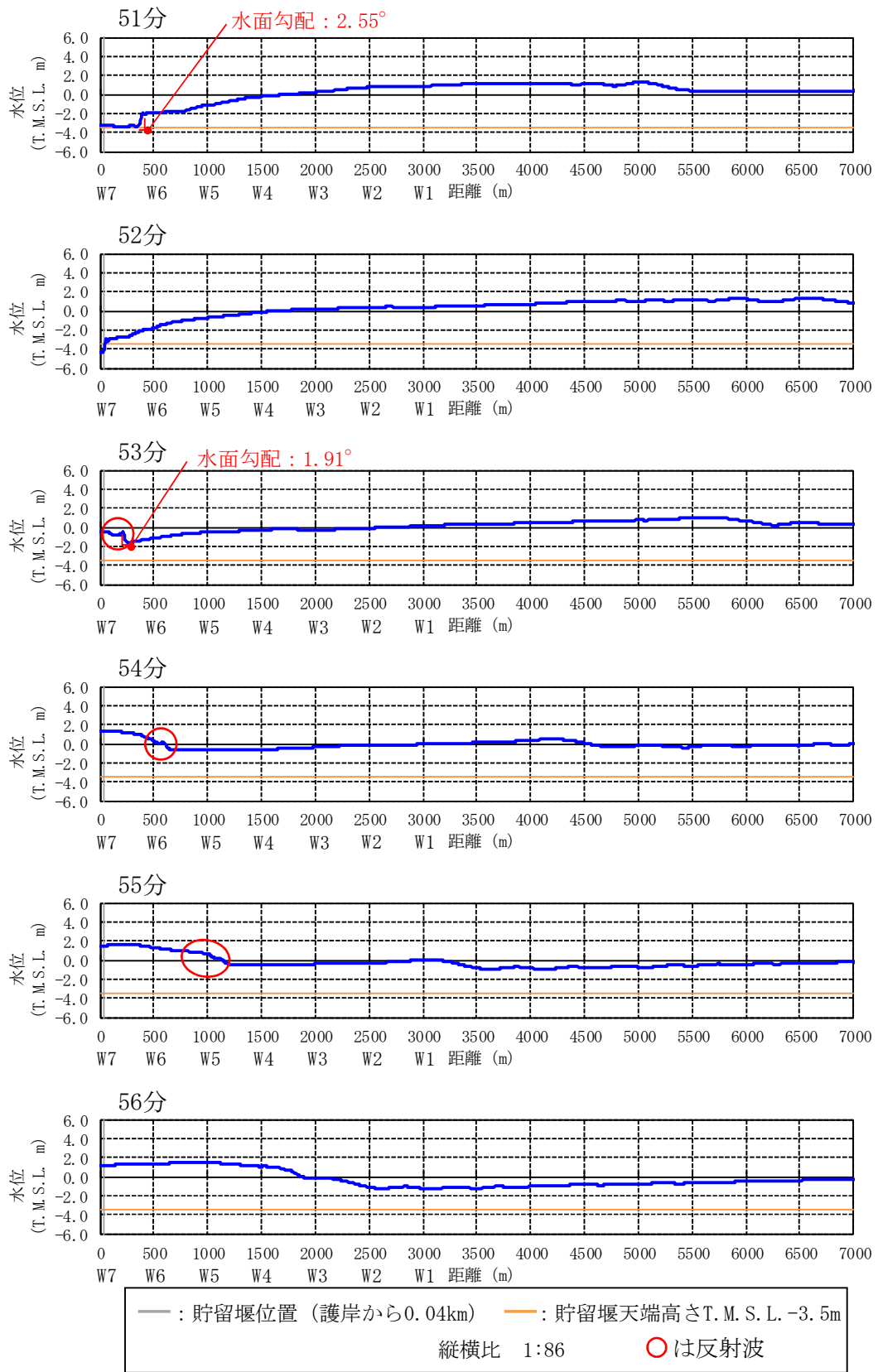


図 4.7 参 1-37 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分]

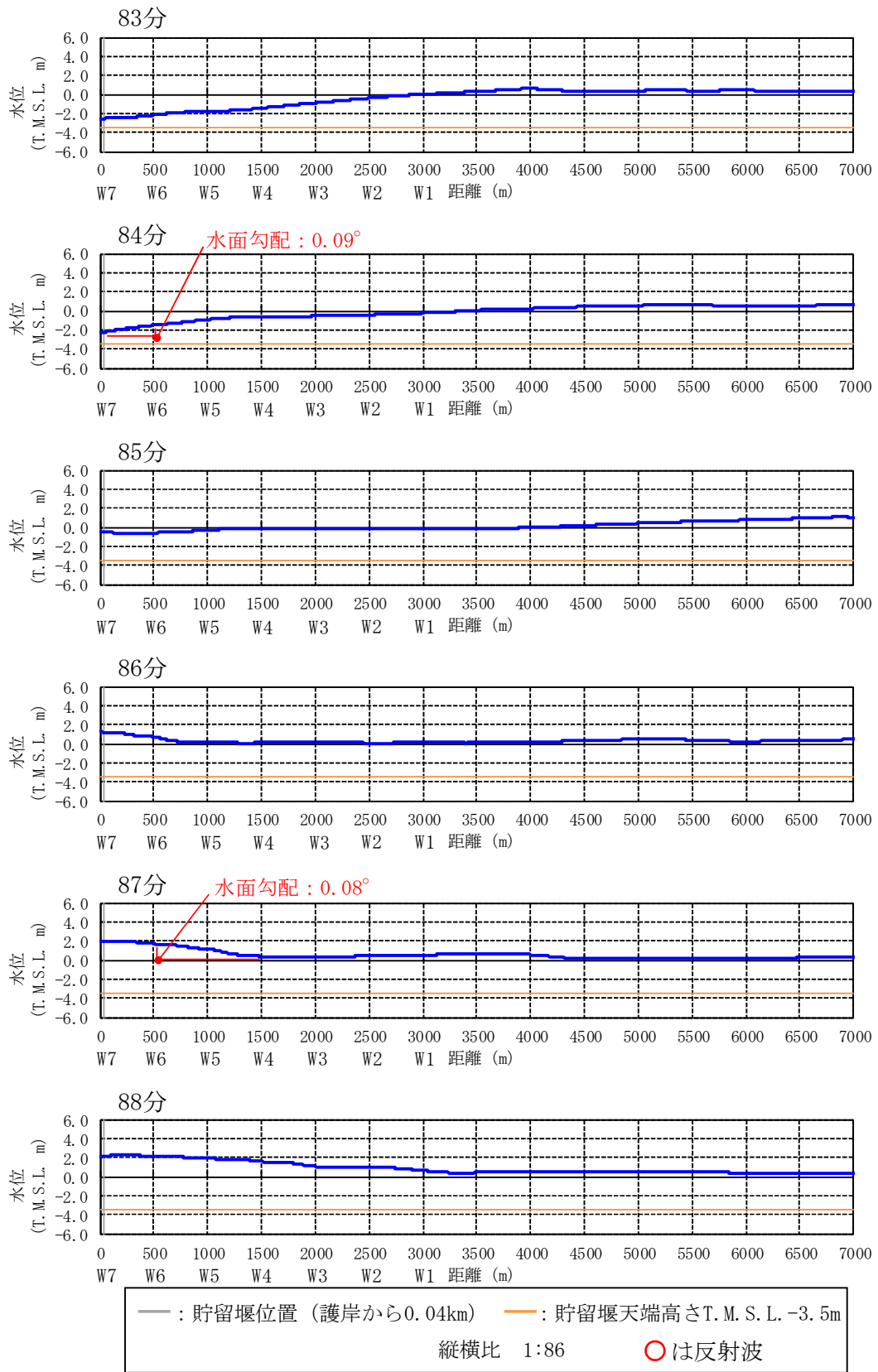


図 4.7 参 1-38 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [83-88 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

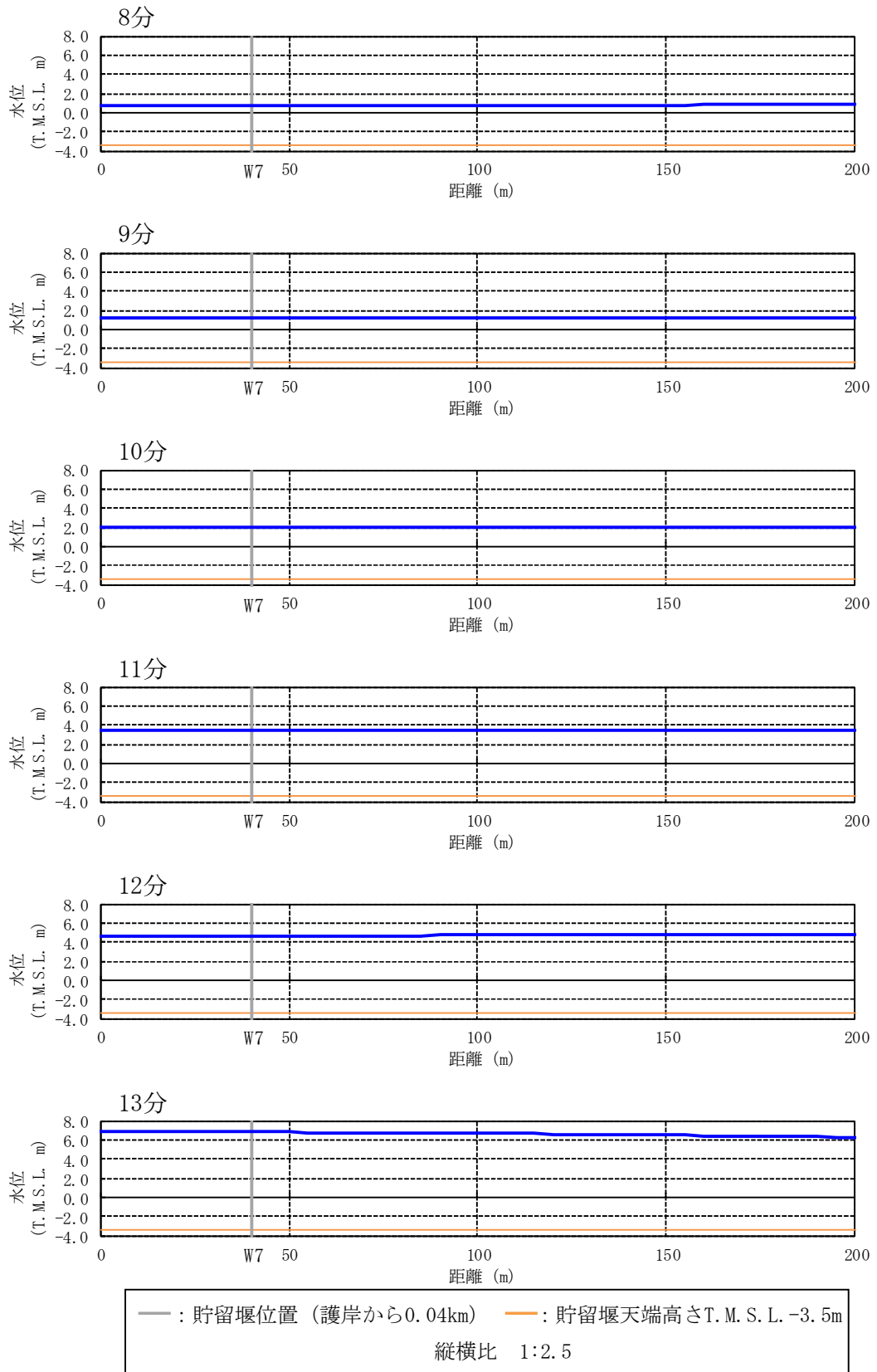


図 4.7 参 1-39 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [8-13 分, 0-200m を拡大]

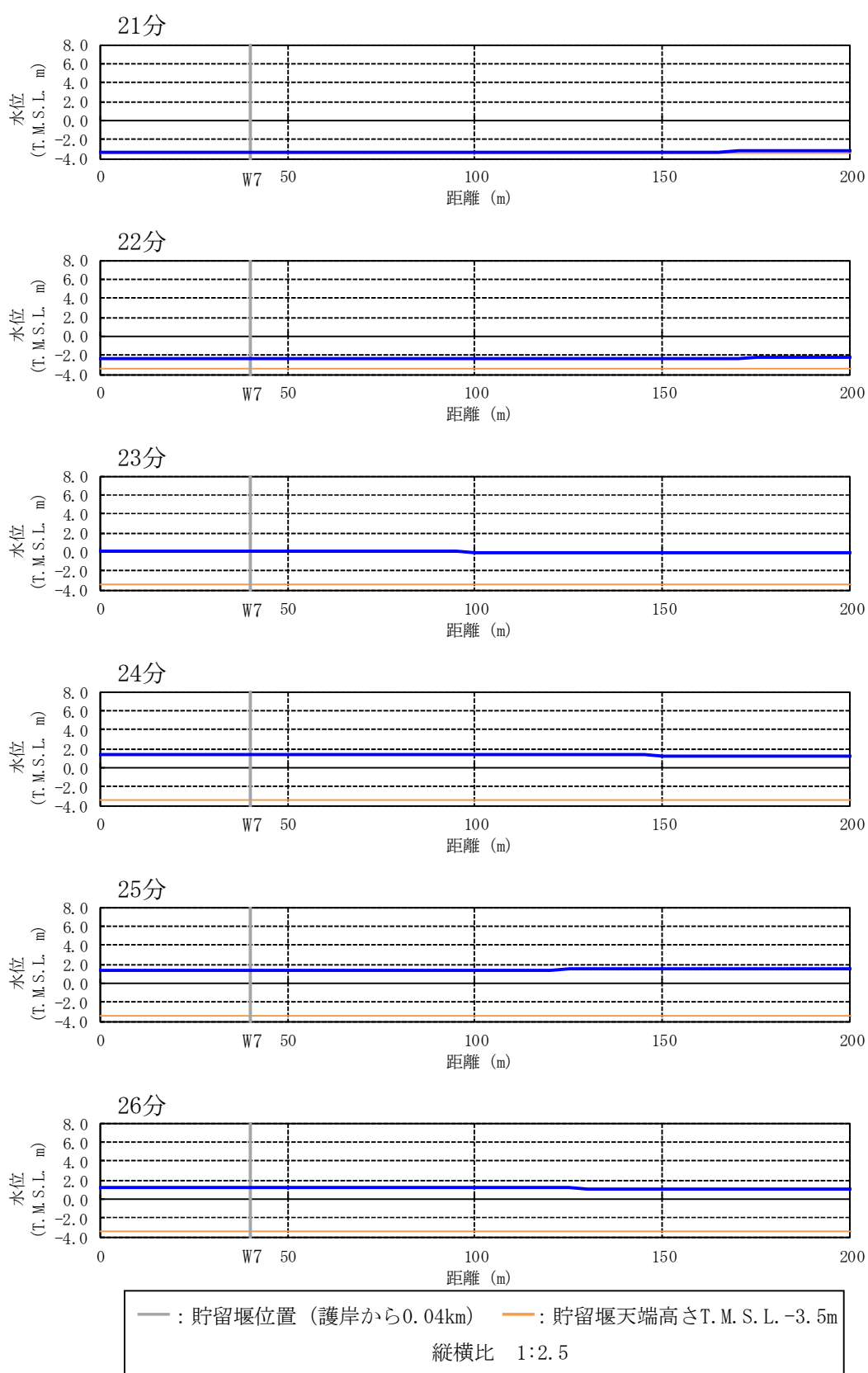


図 4.7 参 1-40 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [21-26 分, 0-200m を拡大]

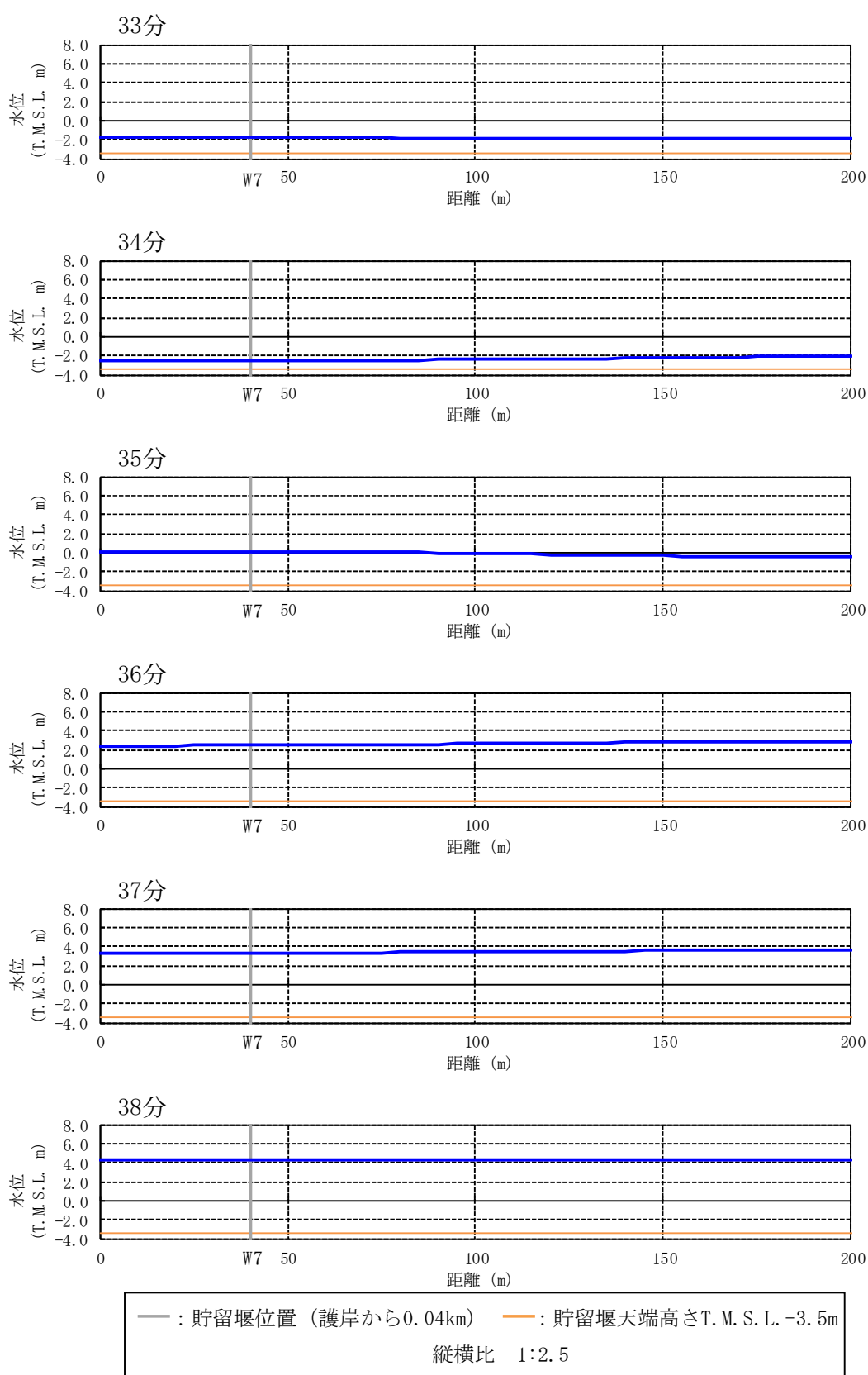


図 4.7 参 1-41 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [33-38 分, 0-200m を拡大]

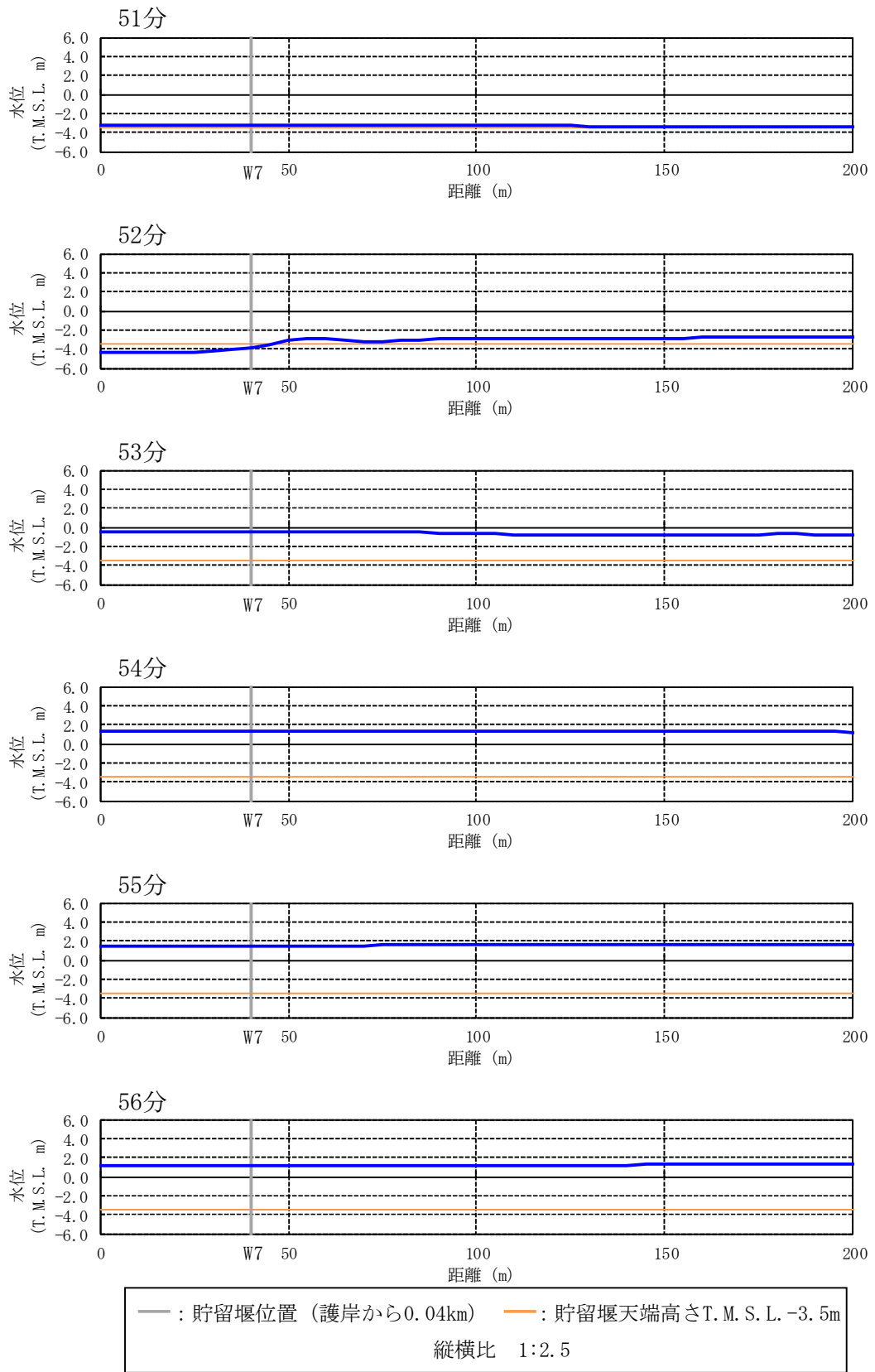


図 4.7 参 1-42 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分, 0-200m を拡大]

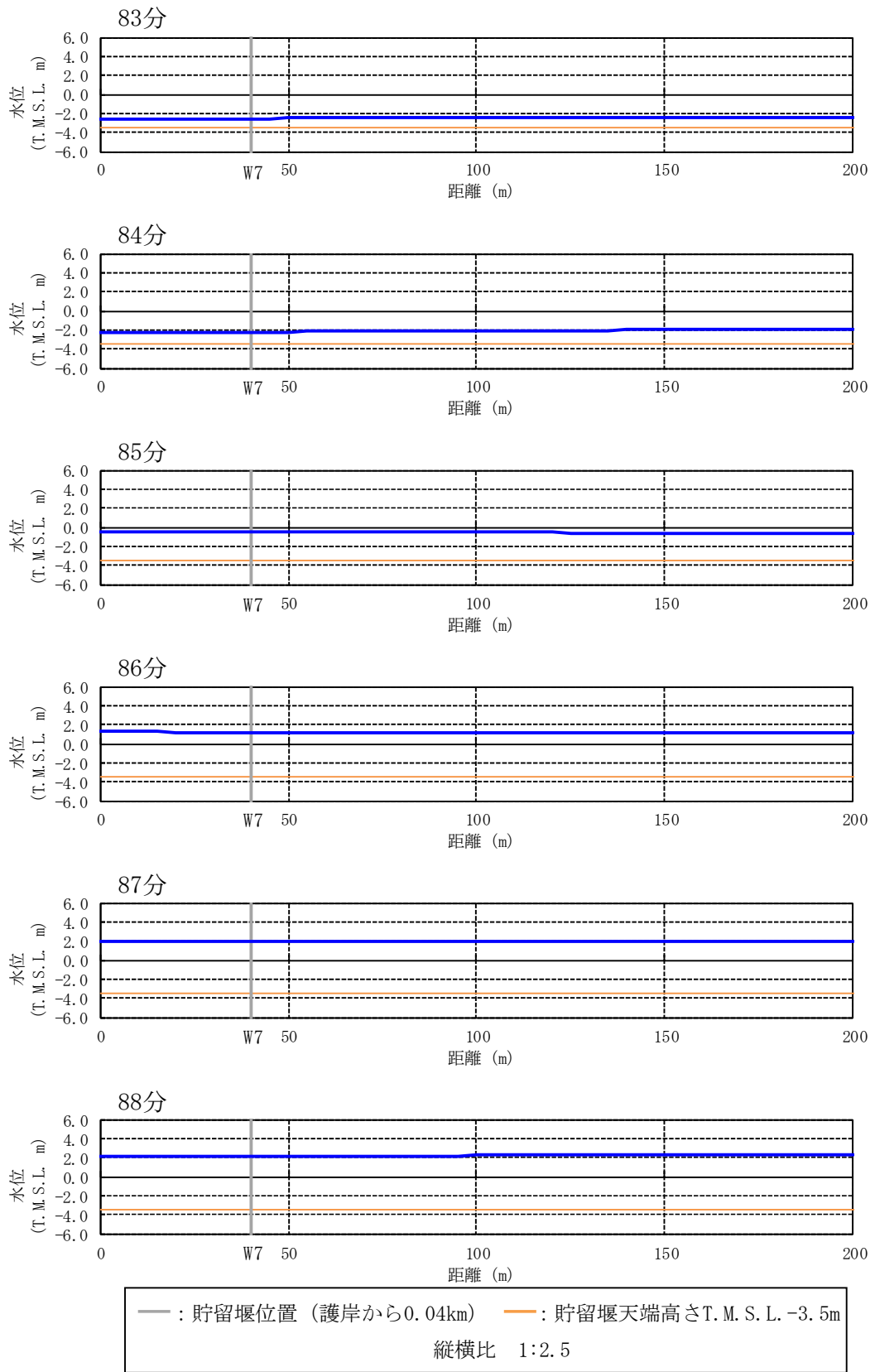


図 4.7 参 1-43 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [83-88 分, 0-200m を拡大]

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° ～ 40° に対して最大でも 2.57° 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) ¹⁾ の分散項により波の分裂が考慮され、佐藤 (1995) ²⁾ の碎波減衰項を考慮することで、碎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。 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。	間瀬ら (2015) ³⁾ では、実験の再現計算により、ソリトン分裂をよく再現できることが示されている。
CADMAS-SURF 2D	断面2次元	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。 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。	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

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）⁴⁾」に記載されている松山ら(2005)⁵⁾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)⁵⁾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。

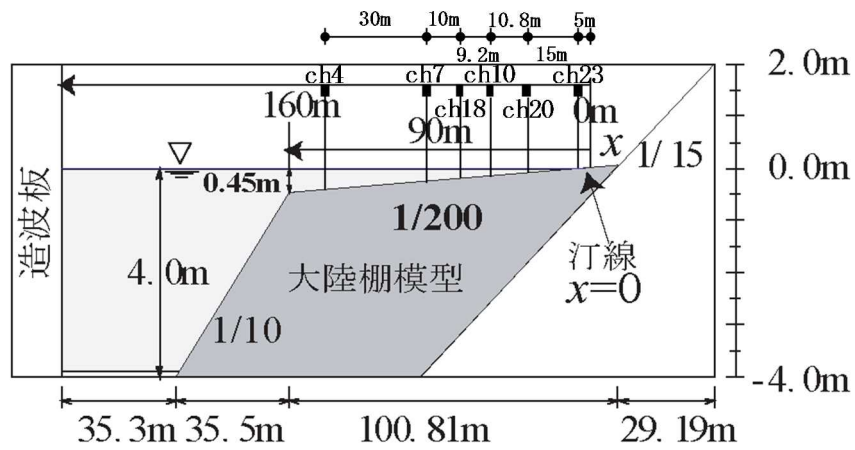


図 4.7 参 2-3-1 実験水路の概要 (松山ら(2005)⁵⁾に加筆)

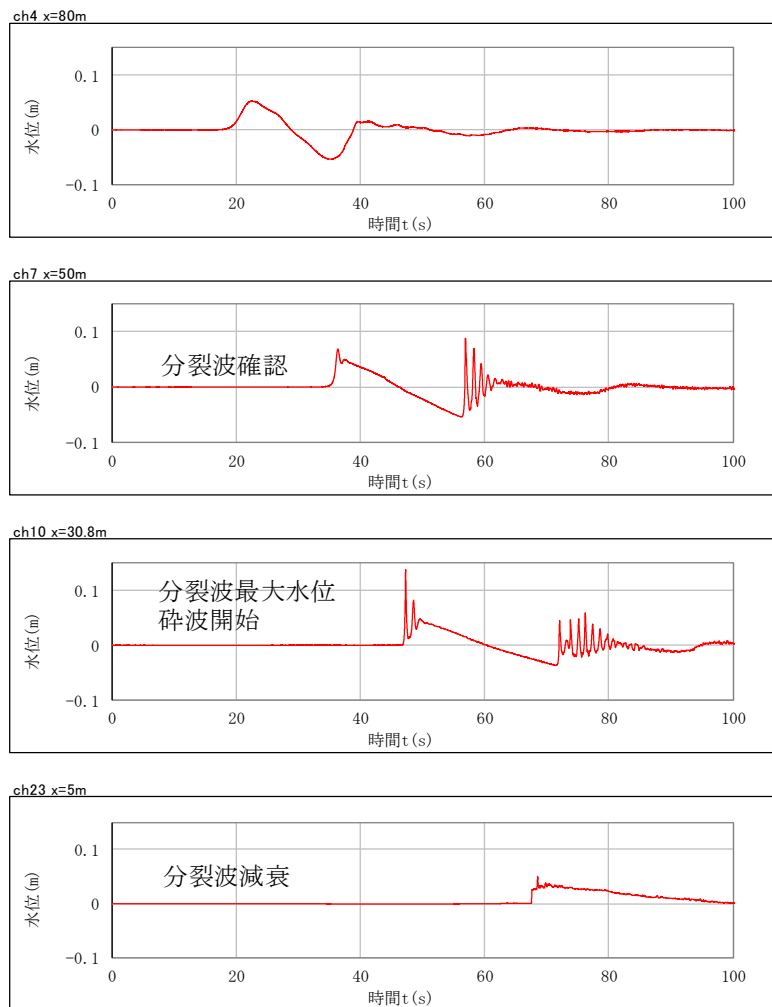


図 4.7 参 2-3-2 実験結果

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。

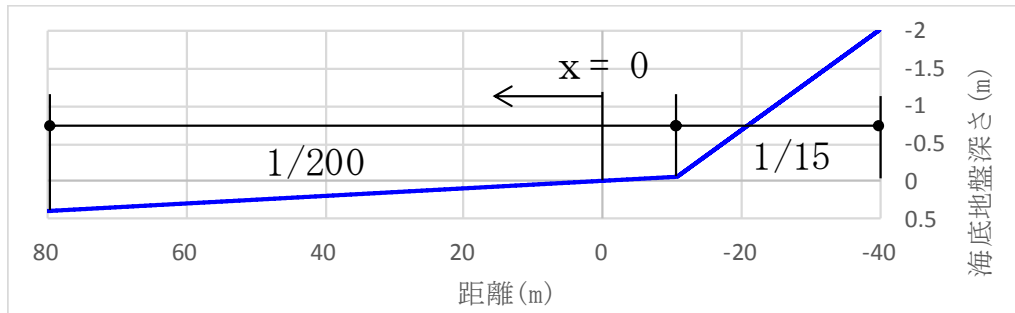


図 4.7 参 2-3-3 1次元再現解析用地形モデル

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	碎波前： $\nu_e=0.01\text{ (m}^2/\text{s)}$ 碎波後： $\nu_e=\alpha\cdot\sqrt{g\cdot h_{\text{bmax}}}\cdot h_{\text{bmax}}$

(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。

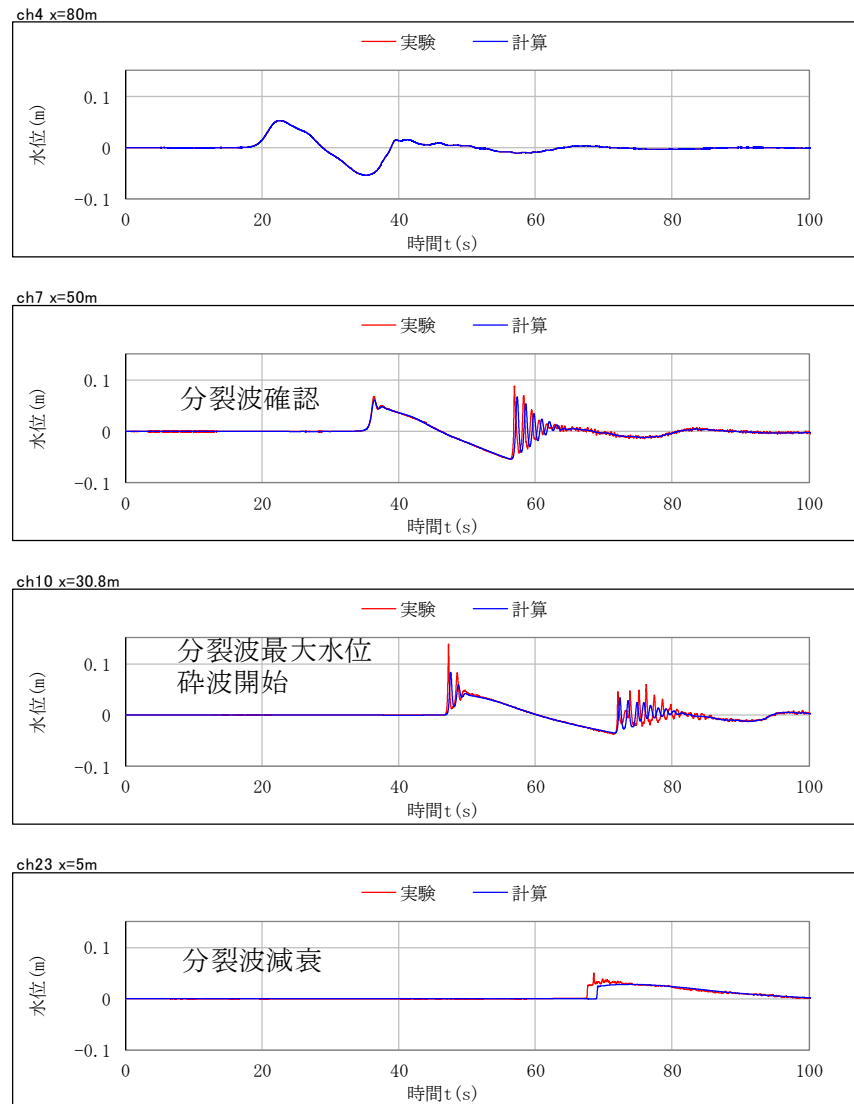


図 4.7 参 2-3-4 1次元解析結果と実験の比較

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。

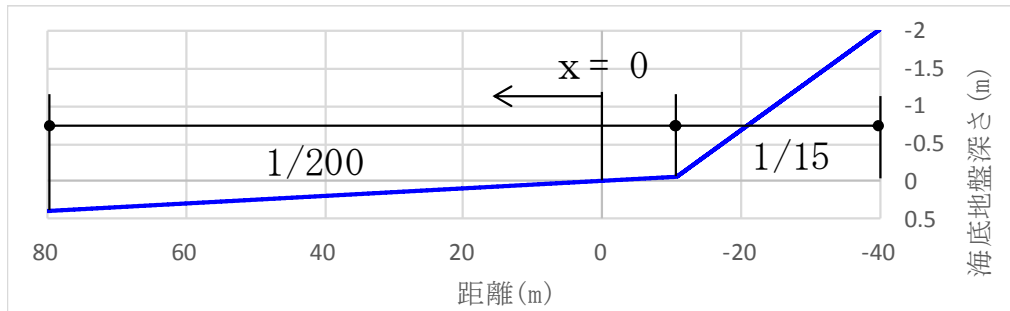


図 4.7 参 2-3-5 断面 2 次元再現解析用地形モデル

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。

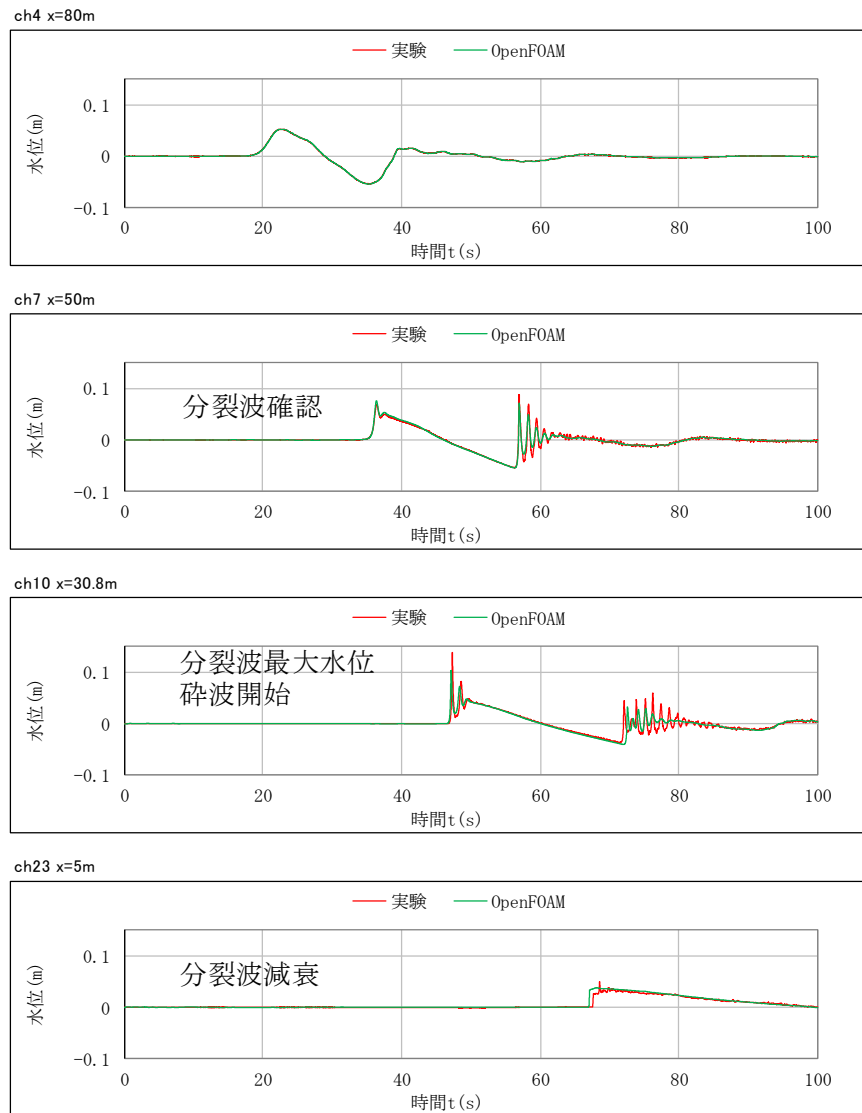


図 4.7 参 2-3-6 断面 2 次元解析結果と実験の比較

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)⁵⁾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

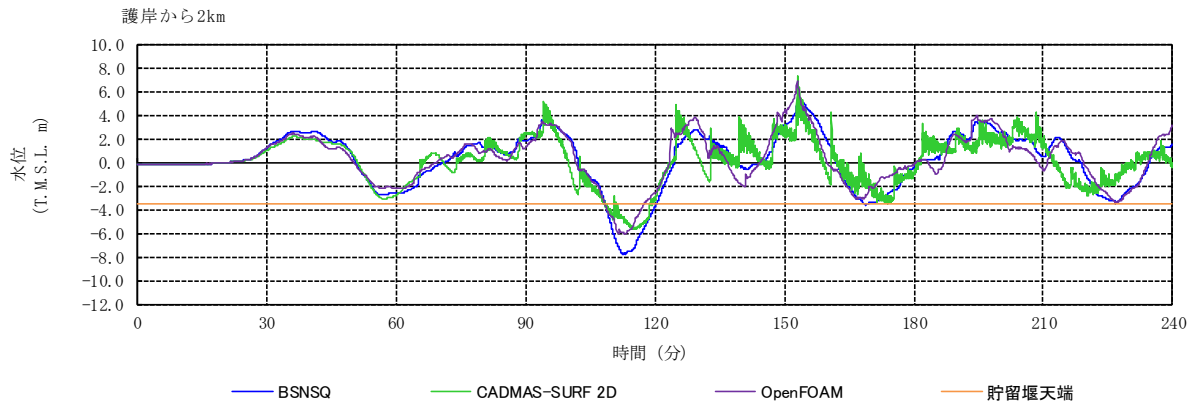
柏崎刈羽原子力発電所の海底地形で1次元モデルおよび断面2次元モデルによる津波水位解析を実施する。各解析コードの解析条件を表4.7参2-4-1、解析結果の比較を図4.7参2-4-1に示す。なお、地形モデルは全て添付資料1図4.7添1-3.5-1にて示した断面地形モデルの基準津波策定位置から護岸までの範囲を用いる。また、当該サイトの基準津波の特徴として、押波と引波が複数回繰り返す傾向があり、引波により露出した海水貯留堰に対する押波の形状の評価についての適用性も検討する必要があるため、水位低下が大きい基準津波2を対象とする。

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。

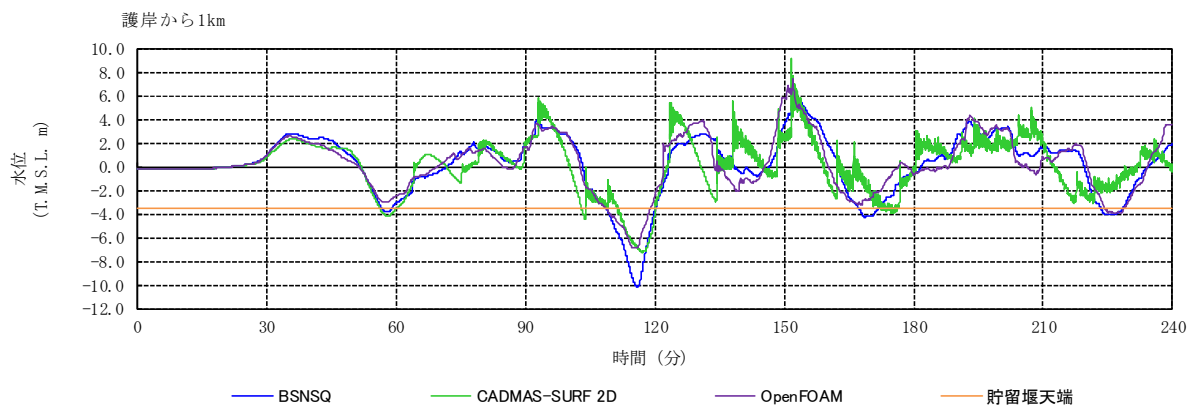
表 4.7 参 2-4-1 解析条件の比較

	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	$\Delta x=10m, \Delta z=5m$	$\Delta x=2.5m, \Delta z=0.5m$

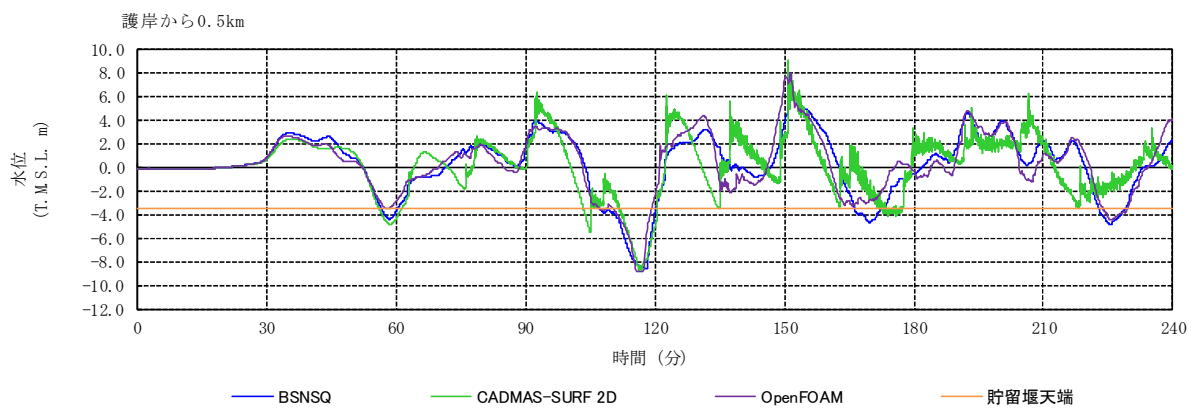
注記* : 5 条まとめ資料と同様に潮位のばらつきを考慮



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

(1)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。

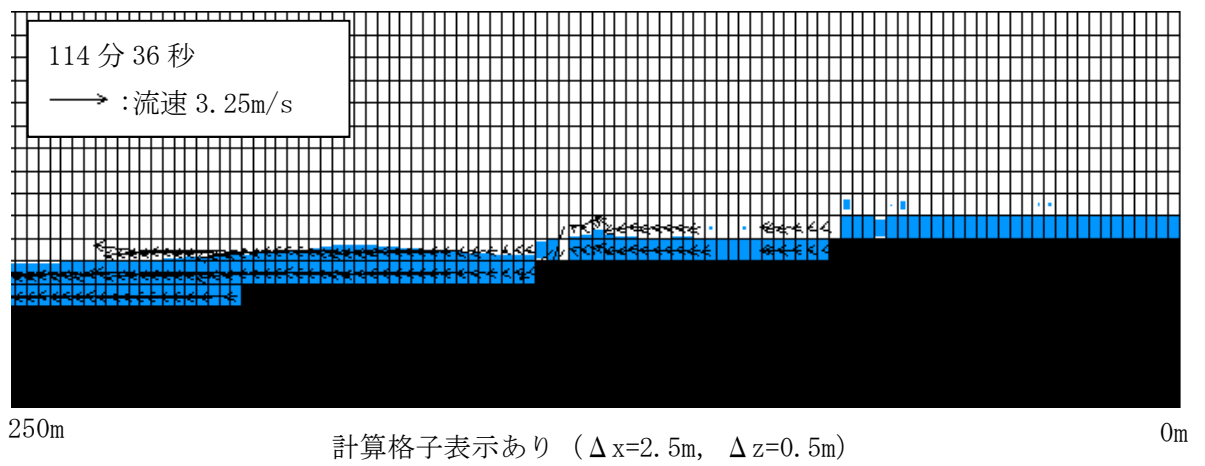
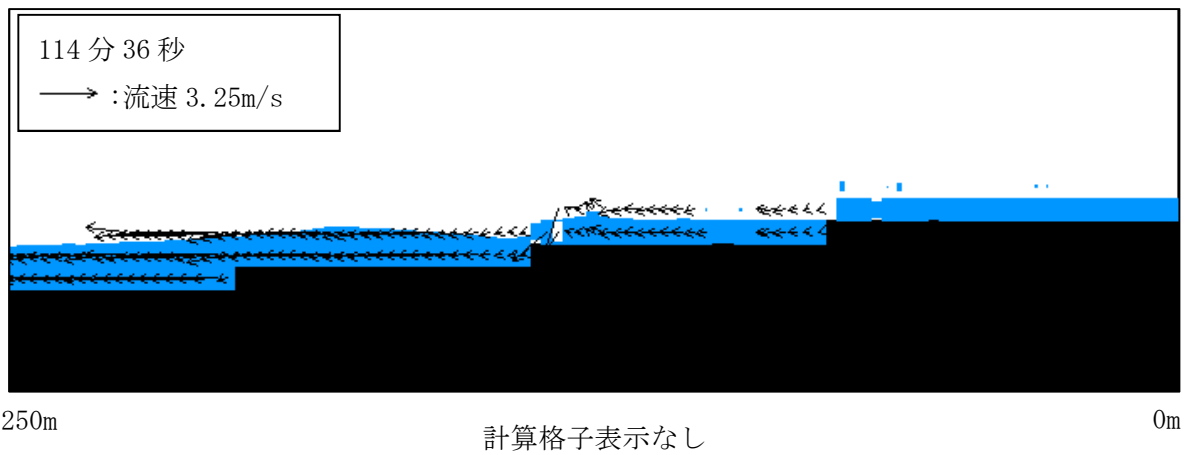


図 4.7 参 2-4-2 CADMAS-SURF 2Dによる解析結果の空間分布
 (引波時の護岸付近を拡大, 縦横比 1:10)

4.3 解析コード「BSNSQ」と「OpenFOAM」の比較

(1)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碎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碎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碎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、後続波の評価に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。

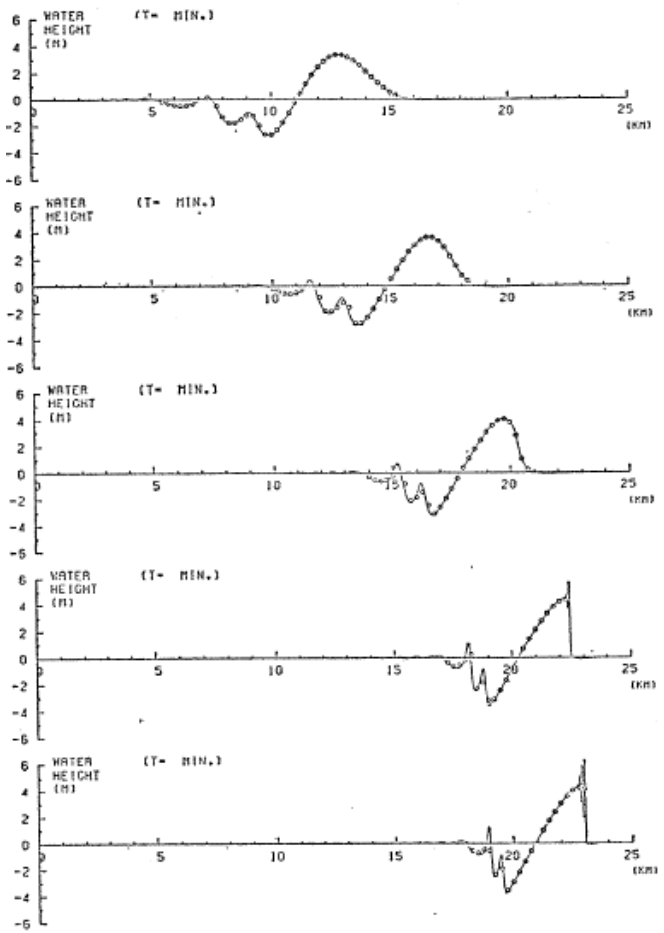
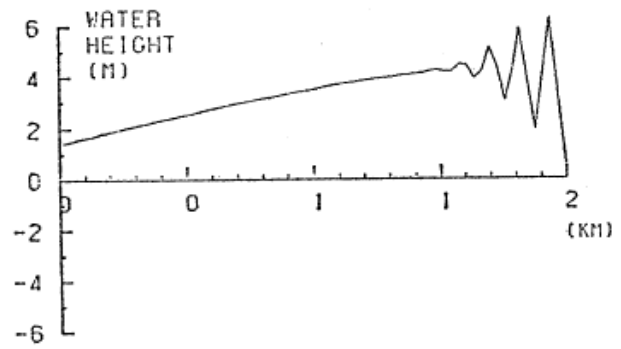
加えて、1次元解析は検証実績が豊富であることも踏まえ、柏崎刈羽原子力発電所においては解析コード「BSNSQ」による1次元解析の適用性が高いと判断した。なお、1次元解析によるソリトン分裂の発生の可能性について検討した実績を参考資料3に示す。

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 卷, 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 卷, 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) ¹⁾	<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。</p> <p>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)²⁾

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。

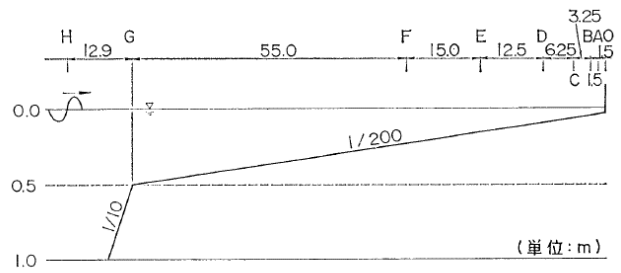


図-2 解析モデル

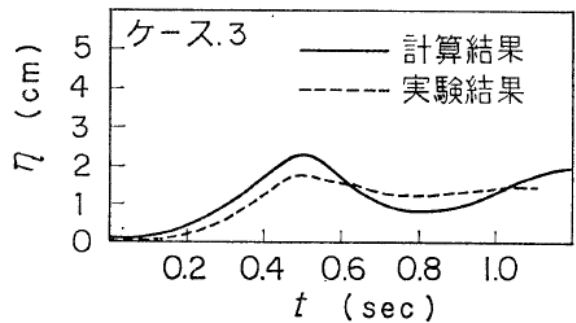
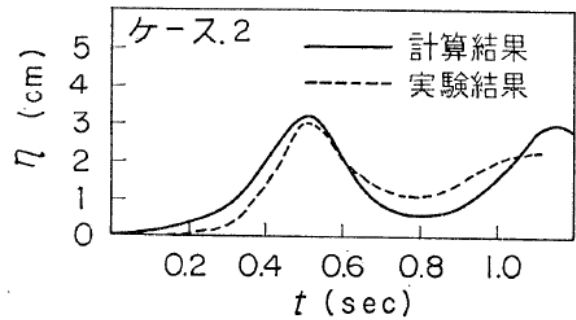
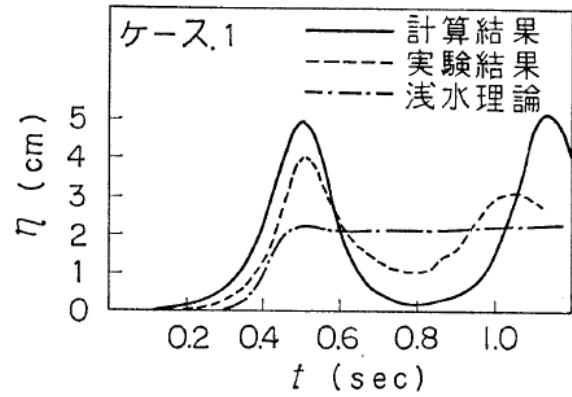


図-5 ソリトン波形の比較 (測定点C)

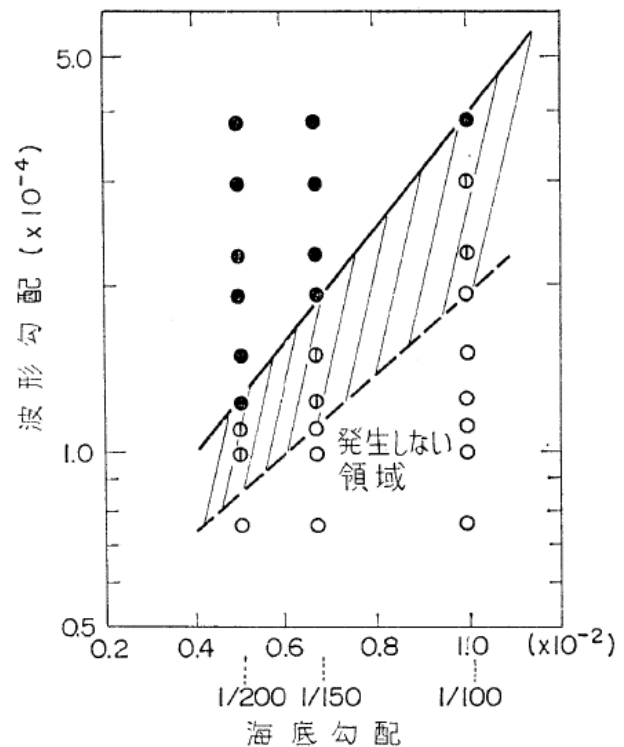


図-8 ソリトン分裂の発生条件の結果整理図

大森ら
(2000)³⁾

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。

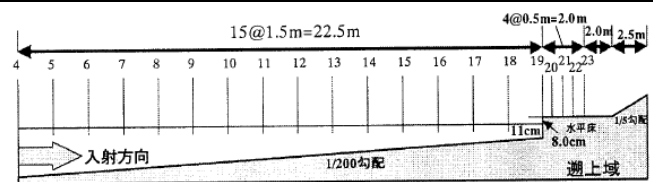
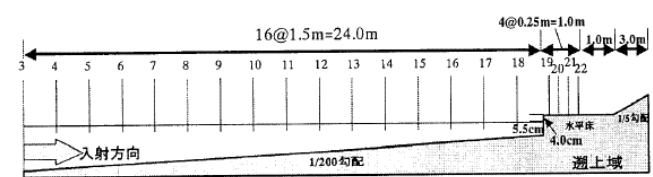
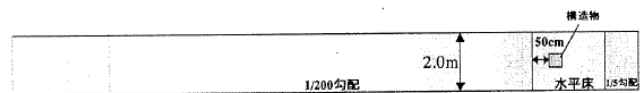


図-1 中型水路断面図と計測点



(1) 断面図

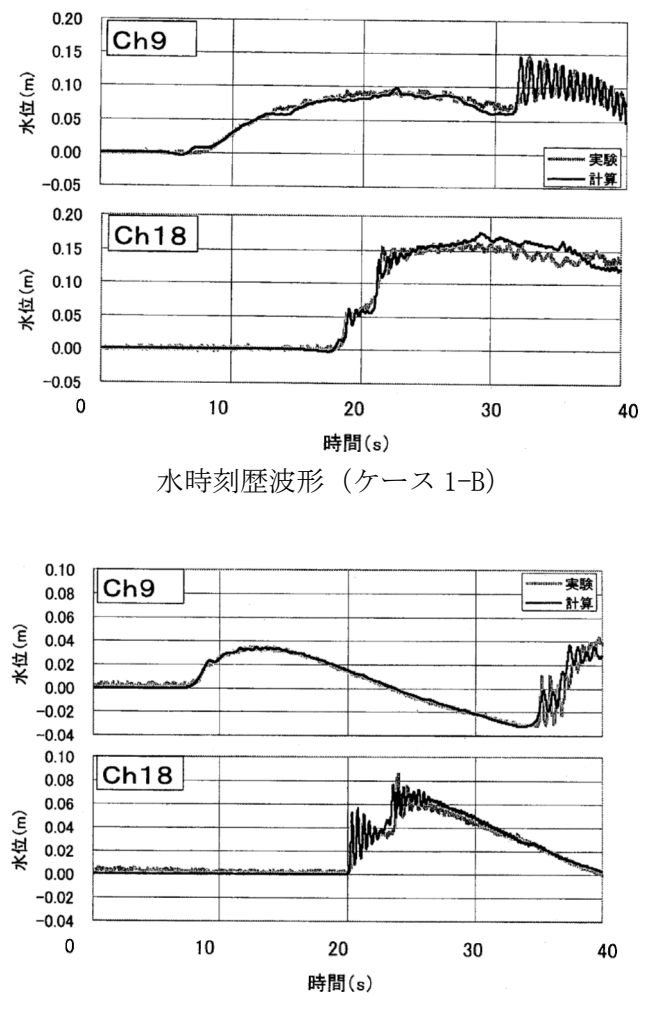
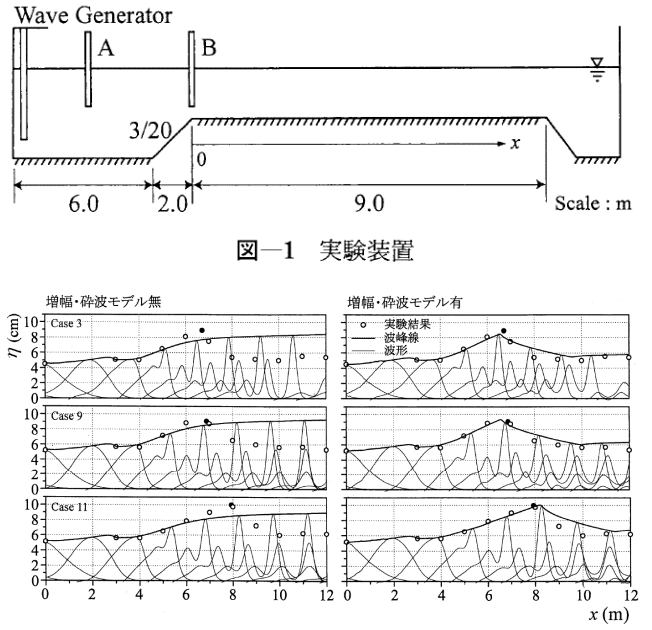


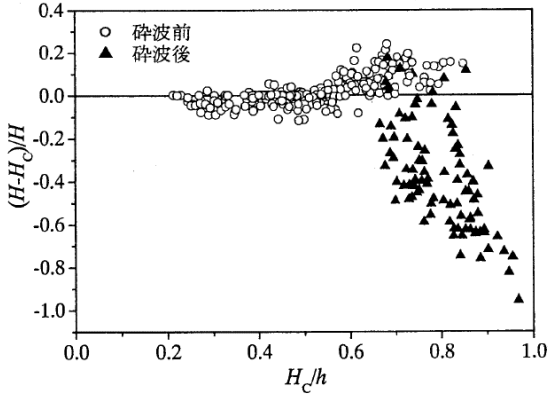
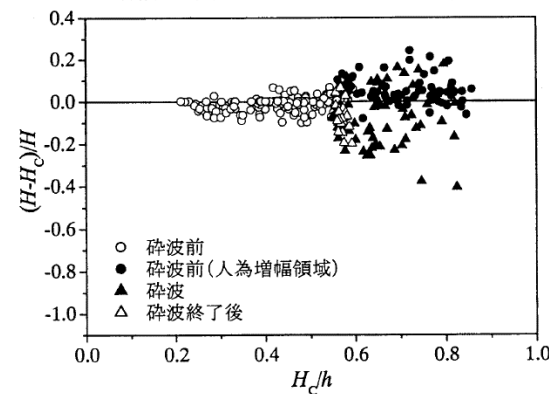
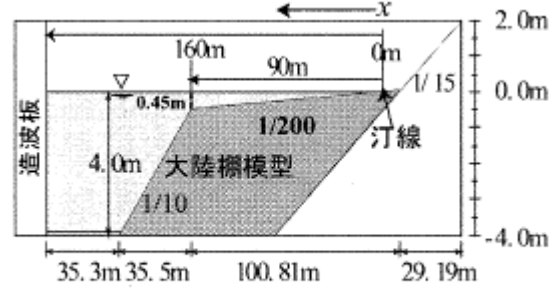
(2) 平面図

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 style="text-align: center;">水時刻歴波形 (ケース 1-B)</p> <p style="text-align: center;">水時刻歴波形 (ケース 2-B)</p>
<p>岩瀬ら (2001)⁴⁾</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 style="text-align: center;">図-1 実験装置</p> <p style="text-align: center;">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)⁵⁾</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、非線型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>

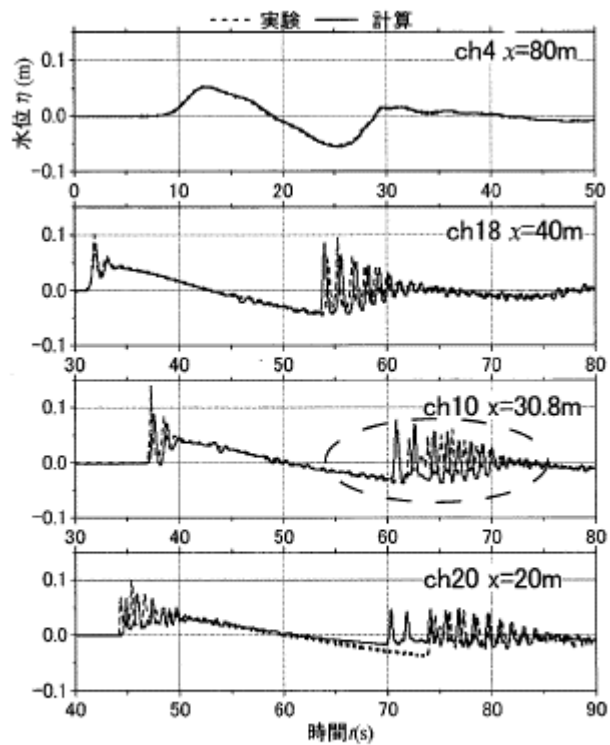


図-3 従来の数値計算モデルによる
数値計算と実験の比較 (No.024)

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：ソリトン分裂波の碎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碎波モデル，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>【検証 (Verification)】</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"> ・ 既往文献¹⁾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。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</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"> ・ 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。

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

η : 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

ν_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²⁾にてソリトン分裂の検討に用いられた Peregrine (1967)³⁾ モデルを使用している。砕波減衰項は佐藤 (1995)⁴⁾ 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_{bmax} : その時刻における最も深い砕波点の水深

α : 係数 (佐藤 (1995)⁴⁾ を参考に $\alpha=3$ とする) である。

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。

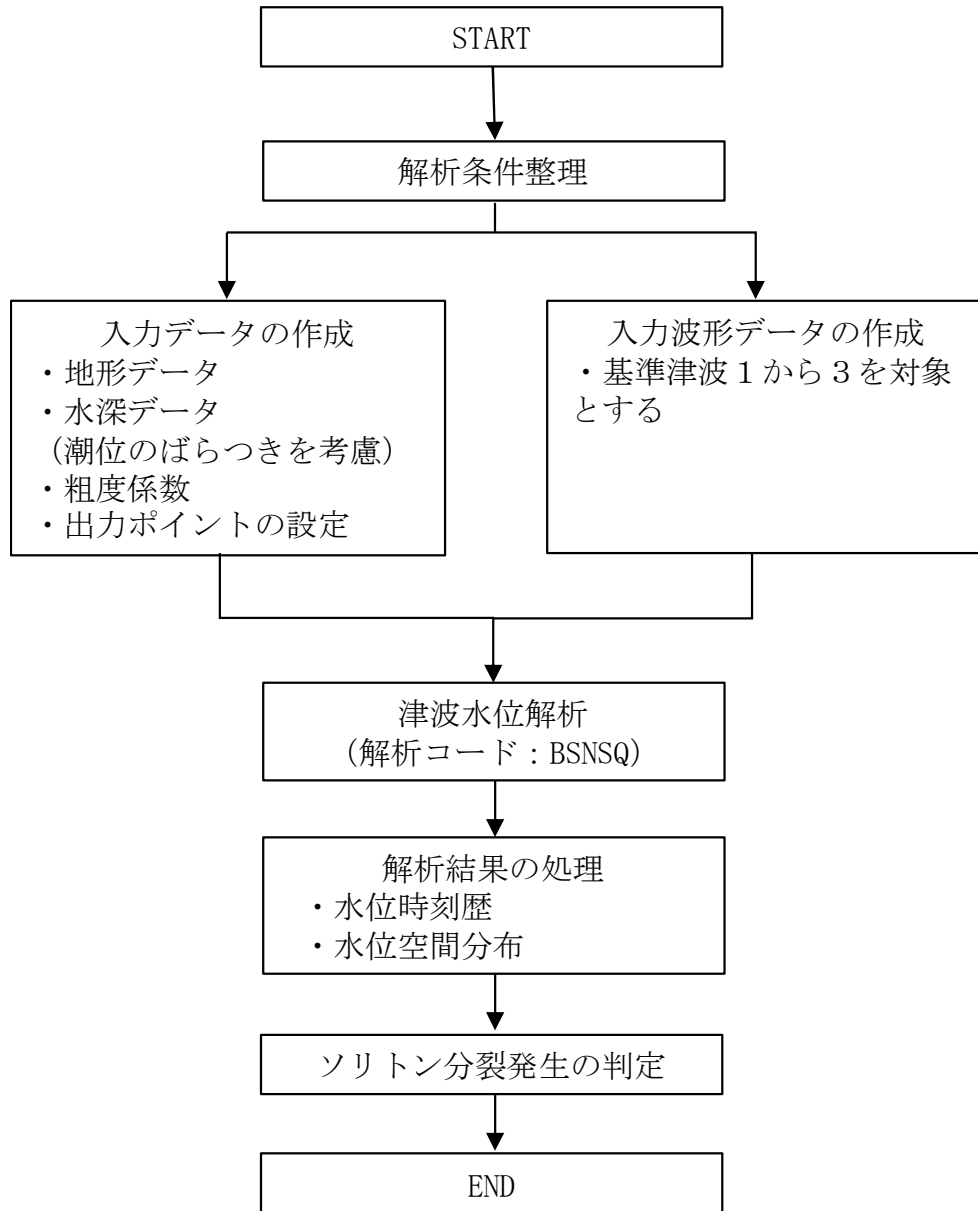


図 4.7 参 4-1 解析フローチャート

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))¹⁾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。

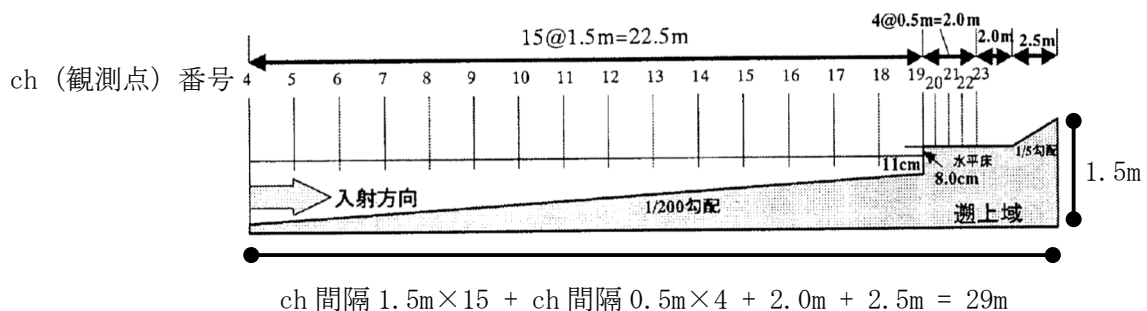


図 4.7 参 4-2 中型水路断面図と計測点 (大森ら(2000))¹⁾に加筆)

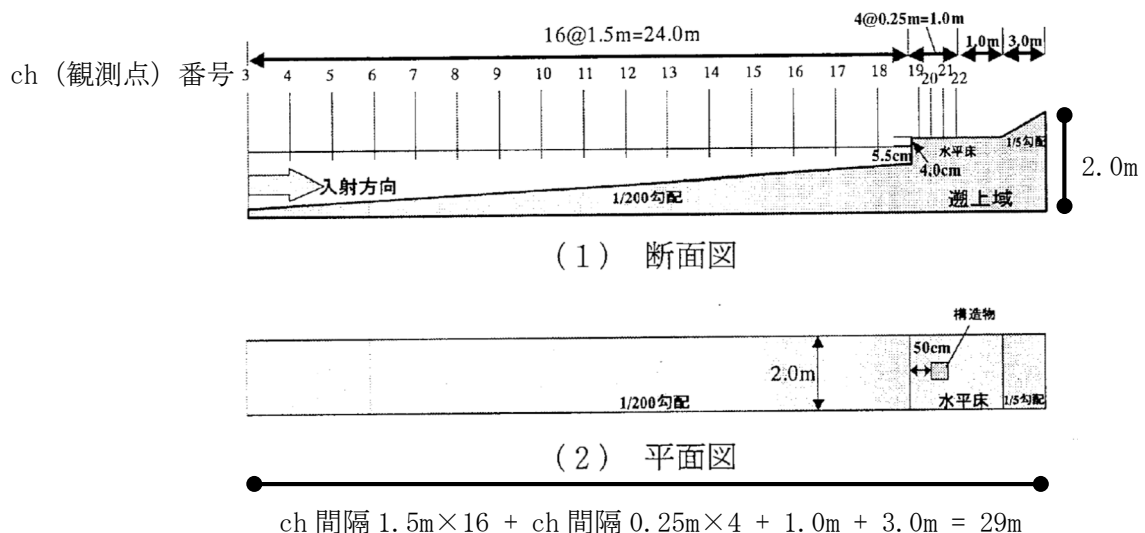


図 4.7 参 4-3 大型水路断面・平面図と計測点 (大森ら(2000))¹⁾に加筆)

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

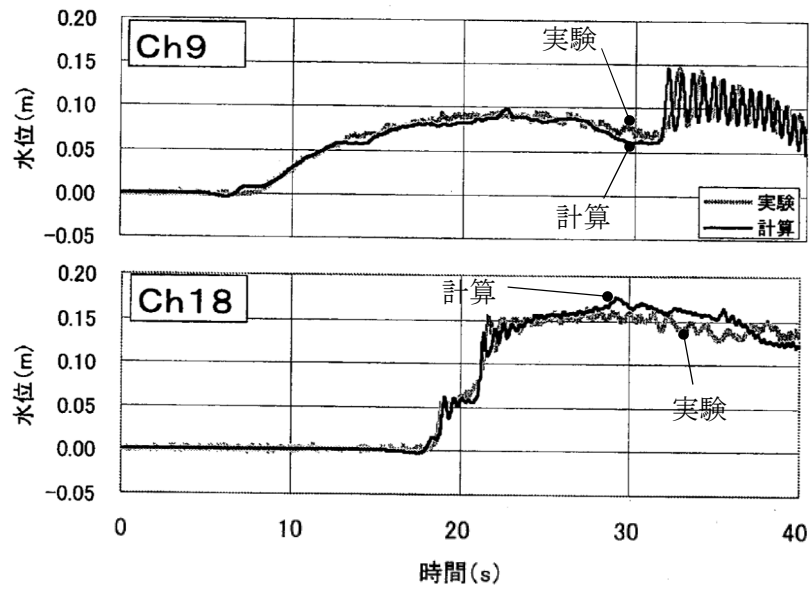


図 4.7 参 4-4 水時刻歴波形 (ケース 1-B) (大森ら(2000)¹⁾に加筆)

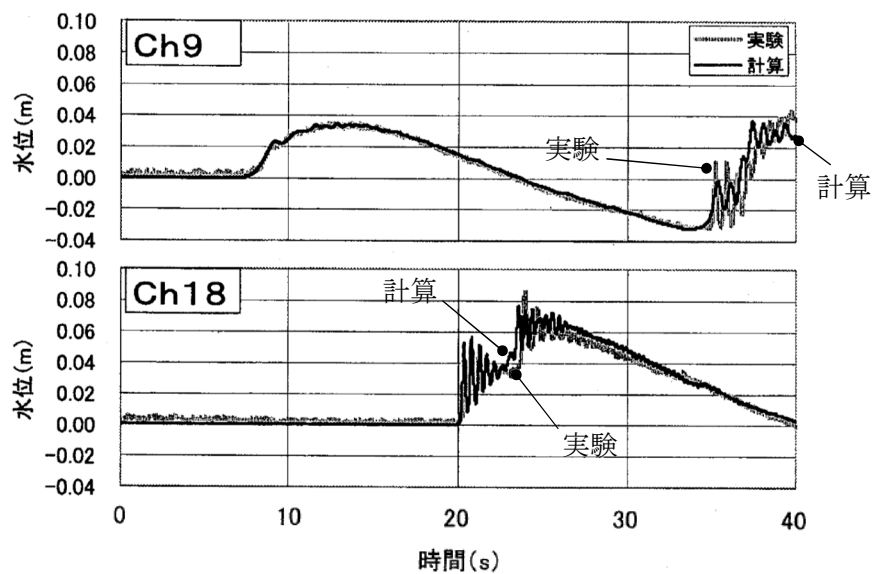


図 4.7 参 4-5 水位時刻歴波形 (ケース 2-B) (大森ら(2000)¹⁾に加筆)

(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