

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。

具体的には図 4.7-1 に示すフローに従い算定することとし、図 4.7-1 の各項目における検討結果を以降に示す。

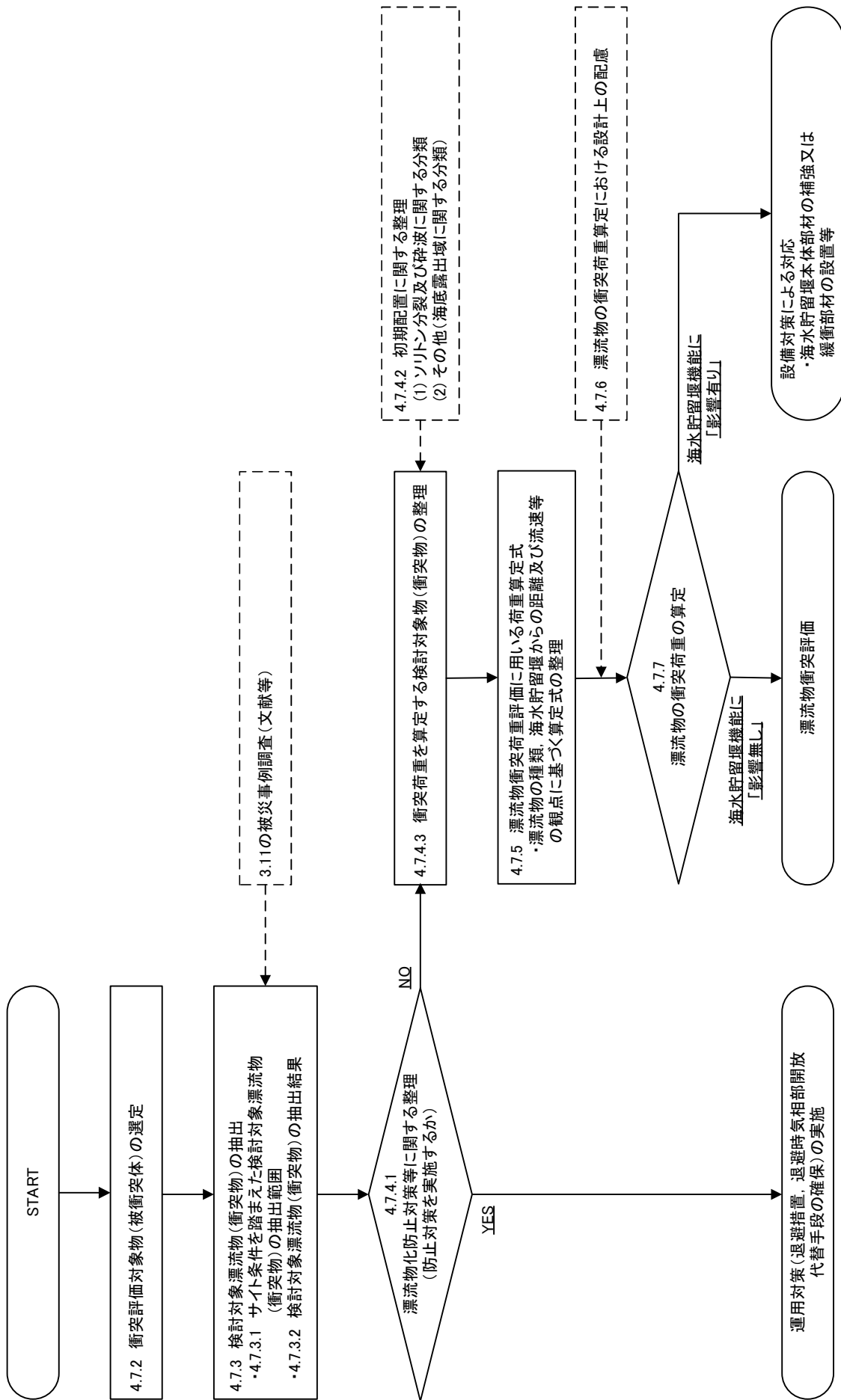


図 4.7-1 漂流物衝突を考慮した津波防護施設の設計に係る検討フロー

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のうち、基準津波の遡上範囲内（海中を含む。）に設置するものは、海水貯留堰及び取水槽閉止板が該当する。

ここで、取水槽閉止板については、取水路最奥に位置する補機冷却用海水取水槽に設置するものであり、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考えられるため、衝突評価対象物（被衝突体）として海水貯留堰を選定した。

4.7.3 検討対象漂流物（衝突物）の抽出

4.7.3.1 サイト条件を踏まえた検討対象漂流物（衝突物）の抽出範囲

発電所及び発電所周辺の地形・標高並びに基準津波の特性（流向、流速及び遡上範囲）を考慮し、海水貯留堰に到達する可能性のある施設・設備等を検討対象漂流物（衝突物）として抽出する。検討対象漂流物（衝突物）を抽出する範囲を海域及び陸域それぞれで以下のとおり設定する。

(1) 海域

海域に関しては、図 4.2-30 に示す地点（図 4.7-2 として再掲）を初期配置とし、基準津波 1～3 について防波堤の損傷等も考慮した軌跡シミュレーションを実施している。この結果、沖合 3km 及び 5km の地点においては、基本的に初期配置付近を漂う状況が確認されたのに対し、沖合 1.5km の地点で、初期配置が港湾口の近傍であった場合、漂流物が港湾内に移動する可能性が示された（図 4.7-3 として再掲）。

したがって、海域については柏崎刈羽原子力発電所周辺 1.5km を検討対象漂流物（衝突物）を抽出する範囲として設定する。

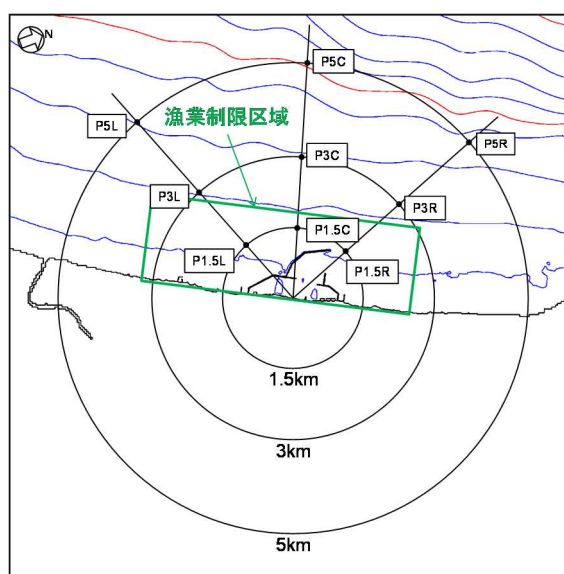


図 4.7-2 発電所周辺海域における軌跡シミュレーションの初期配置（図 4.2-30 を再掲）

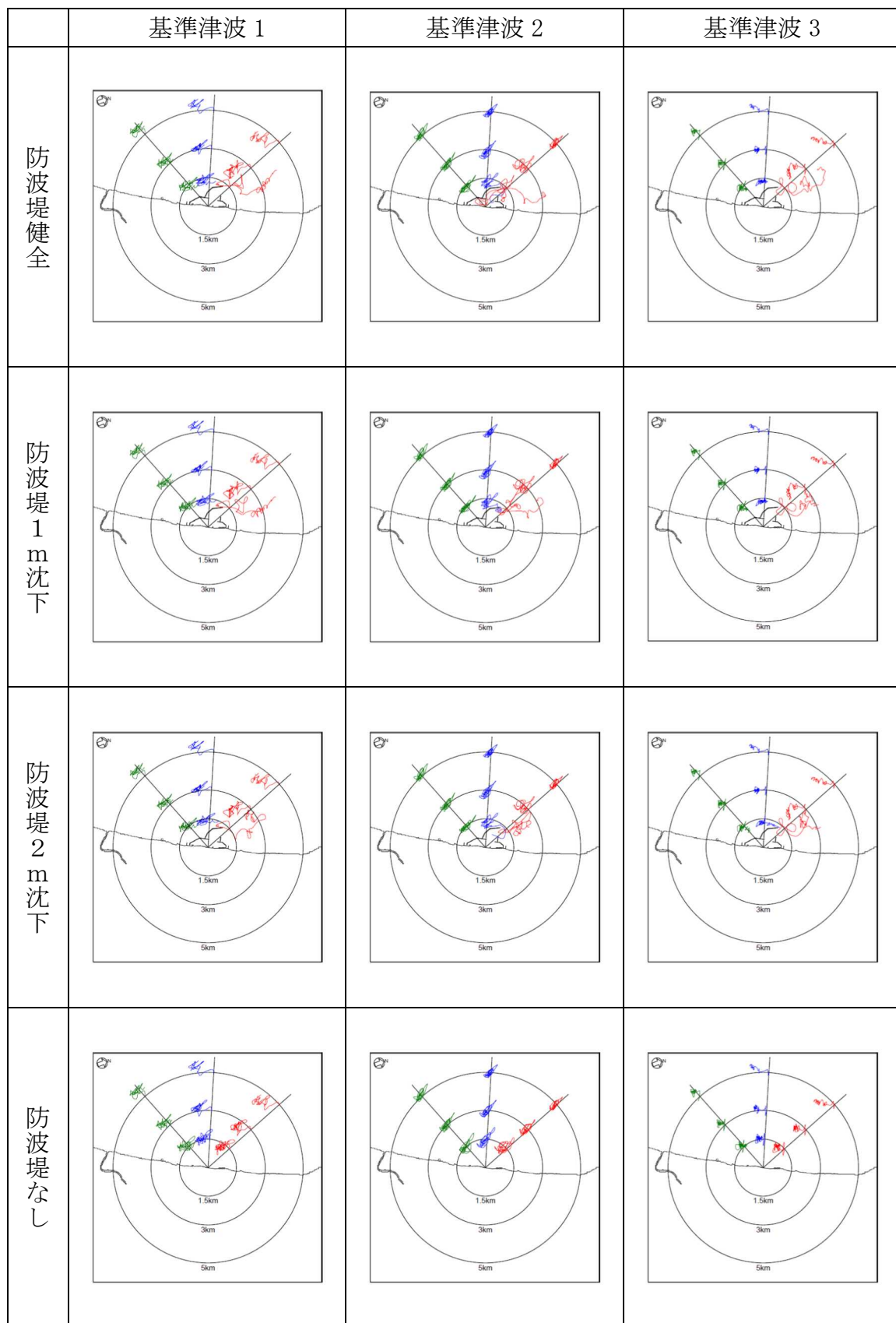


図 4.7-3 発電所周辺海域における軌跡シミュレーションの結果 (図 4.2-32 を再掲)

(2) 陸域

陸域のうち、発電所構外に陸域に設置される施設・設備等については、海域に流出し、漂流物化した場合であっても、図 4.7-3 に示す軌跡シミュレーション結果より、海水貯留堰に到達することはないと考えられる。

したがって、陸域については図 4.7-4 及び図 4.7-5 に示す発電所構内における遡上域を検討対象漂流物（衝突物）を抽出する範囲として設定する。



図 4.7-4 基準津波による荒浜側防潮堤内敷地の最大浸水深分布
(「V-1-1-3-2-3 入力津波の設定」図 3-3(1)を抜粋)

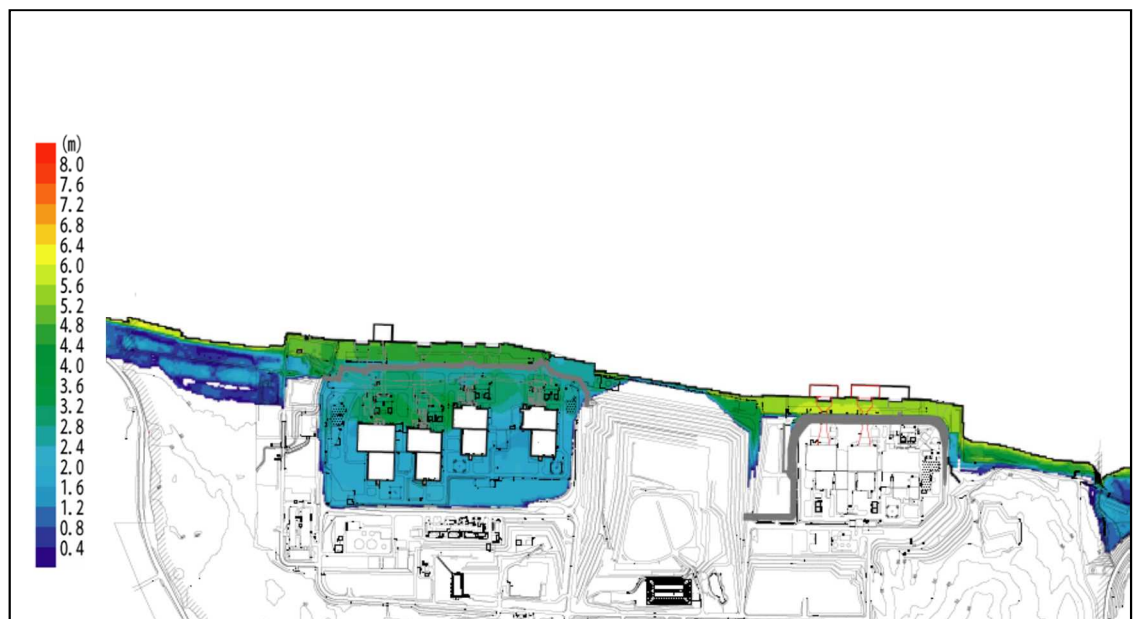


図 4.7-5 基準津波による発電所全体遡上域の最大浸水深分布
(「V-1-1-3-2-3 入力津波の設定」図 3-3(2)を抜粋)

4.7.3.2 検討対象漂流物（衝突物）の抽出結果

上記の検討対象漂流物（衝突物）の抽出範囲に設置される施設・設備等であり、津波時に海水貯留堰に到達し得るものを、表 4.7-1 に整理した。

なお、表 4.7-1 は基本的には表 4.2-14 において海水貯留堰への波及的影響の可能性「有り」と評価したものを抽出しているが、自重よりも浮力が小さく浮遊しないと考えられるものは除外した。

一方で、車両については地震により地面が変状し、退避が不可能となる可能性を考慮し、ここでは検討対象漂流物（衝突物）として抽出している。また、鉄筋コンクリート建屋については東日本大震災において確認された津波による移動事象を考慮し、検討対象漂流物（衝突物）として抽出している。

表 4.7-1 検討対象漂流物（衝突物）の一覧

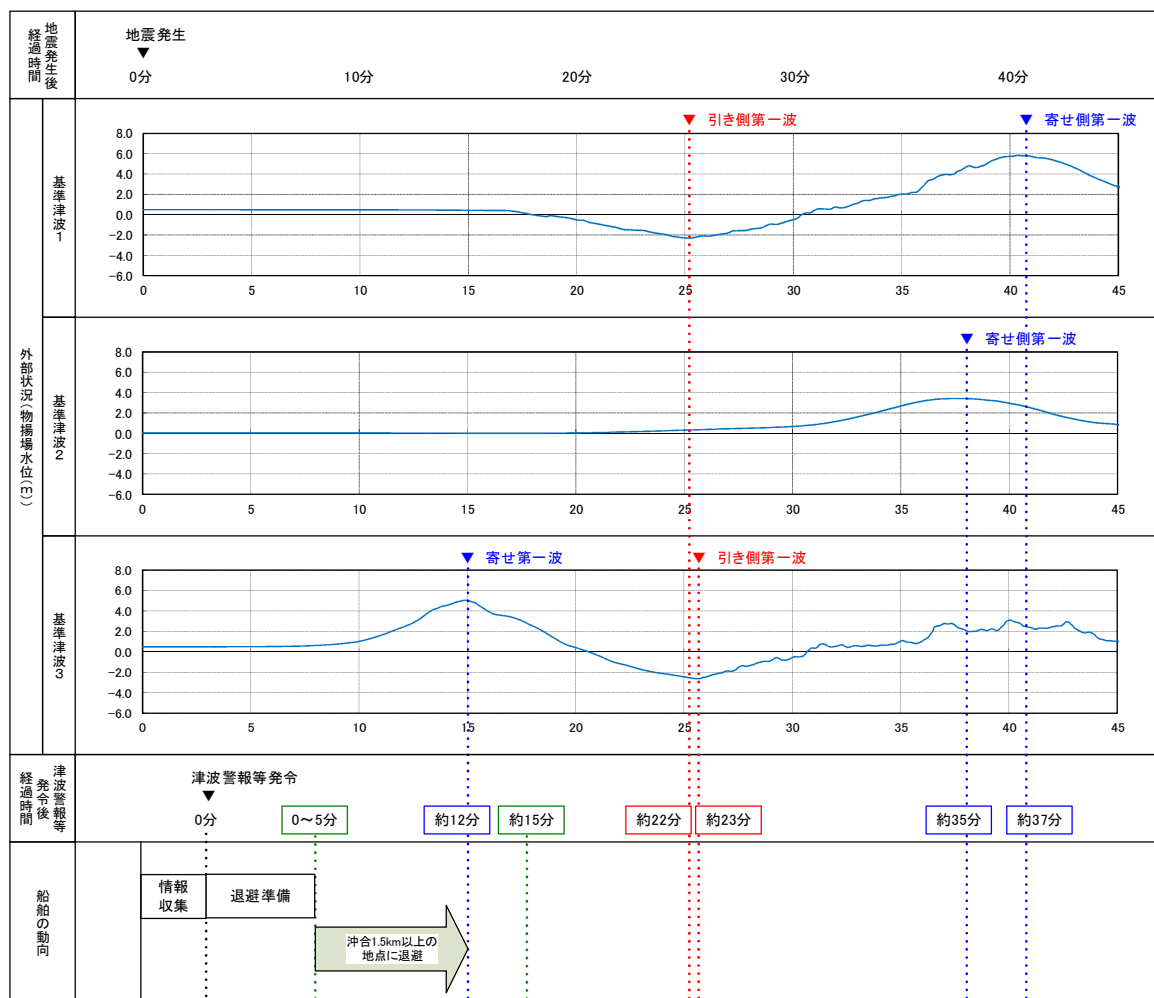
設置場所情報			種類	内容・名称・構造等	重量
発電所 構内・構外	海域 陸域	場所			
発電所 構内	海域	・発電所港湾内外	船舶	港湾設備保守点検作業船	30t 未満
				海洋環境監視調査作業船	30t 未満
				温排水水温調査作業船	15t 未満
	陸域	・大湊側護岸部	建屋	鉄筋コンクリート建屋	数百 t
			資機材	ユニットハウス	1t 未満
				角材, 足場板, ホース, カラーコーン	数 kg
		・荒浜側護岸部 (物揚場を含む)	資機材	ユニットハウス	1t 未満
				角材, 足場板, ホース, カラーコーン	数 kg
		・荒浜側陸域	車両	人員・資機材運搬車両, 工事用車両	約 0.7t~約 45t
				植生	樹木(流木)等
発電所 構外	海域	・発電所周辺	船舶	発電所近傍で航行不能となった以下の船舶 ・漁船 ・プレジャーボート	15t 未満

注：流木の重量は、構内陸上遡上域の植生調査結果（平均直径 17.0cm, 平均樹高 7.4m）を元に、建築空間の緑化手法（1985）の算定式により設定した。

4.7.4 検討対象漂流物（衝突物）の特性に関する整理

漂流物衝突時に発生する荷重は、検討対象物（衝突物）の種類やその初期配置により異なる可能性があるとともに、漂流物の種類によっては漂流物化防止対策を実施することによりリスク低減を図ることが可能となる。

ここでは、表 4.7-1 に挙げた各検討対象漂流物（衝突物）について、各衝突物の特性を考慮した整理を実施する。



※1:津波警報等発令後経過時間は、地震発生後の3分後(気象庁HPに記載の発表目標時間)に津波警報等が発令するものとして記載
 ※2:津波の到達時間は、引き側及び寄せ側ともピークの到達時間を記載
 ※3:本図の津波水位は、それぞれ以下の数値を予め決めて評価した結果を示している
 ・基準津波1: 朔望平均満潮位(T.M.S.L.+0.49m)、地殻変動量(0.21m)
 ・基準津波2: 朔望平均干潮位(T.M.S.L.+0.03m)、地殻変動量(0.20m)
 ・基準津波3: 朔望平均満潮位(T.M.S.L.+0.49m)、地殻変動量(0.29m)

図 4.7-7 港湾内作業船舶の退避に係る時系列

(2) 車両

図 4.7-4 及び図 4.7-5 に示す発電所構内における遡上域は、大きく荒浜側護岸部と大湊側護岸部に分類できる。このうち、荒浜側護岸部に駐・停車する車両については、評価条件を表 4.7-2 に示す条件とし、図 4.7-8 に示す荒浜側護岸部の複数位置を初期配置とした際の軌跡のシミュレーションを実施した結果、図 4.7-9 に示す通りいずれのケースにおいても軌跡が海水貯留堰に到達する様子は確認されない。また、基本ケースのうち移動量が最も大きくなった基準津波 1 の軌跡を例に、流速ベクトルの観点から考察を行った。その結果、図 4.7-10 に示す通り、荒浜側護岸部周辺の主たる流れは津波の流入・流出に応じて変化し、長期間一様に海水貯留堰に向かう流れではないことが確認される。以上を踏まえると、荒浜側護岸部に駐・停車する車両については、海水貯留堰に衝突し、有意な影響を与える漂流物とはならないものと判断する。

したがって、漂流物の衝突荷重を検討するにあたっての車両の抽出範囲は、図 4.7-11 に示す大湊側護岸部とする。

表 4.7-2 軌跡シミュレーションの評価条件（荒浜側護岸部）（表 4.2-8 を再掲）

項目	評価条件	備考	
評価時間	地震発生から 120 分間	○到達までに時間を要する基準津波 1, 2 の第一波到達時間(地震発生から約 40 分)と保守的に想定した漂流継続時間 60 分にさらに裕度を加味して設定。	
漂流開始条件	浸水深 10cm 時点	○普通乗用車の場合であれば浸水深 50cm 以上で車体が漂流する可能性があることが確認されている ¹⁾ など、実際は浸水深がある程度の深さにならないと漂流は開始しないが、保守的に、わずかでも浸水が生じた時点(解析上の取り扱いとして浸水深 10cm)で漂流が開始するものとする。	
地形 モデル	斜面崩壊・ 地盤変状	健全状態	○荒浜側護岸部の沈下について、影響評価として確認する。
	荒浜側 防潮堤	健全状態	○損傷状態について、影響評価として確認する。
	防波堤	健全状態	○損傷状態について、影響評価として確認する。

1) 戸田圭一, 石垣泰輔, 尾崎平, 西田知洋, 高垣裕彦: 氾濫時の車の漂流に関する水理実験, 河川技術論文集, 第 18 巻, pp. 499-504, 2012.

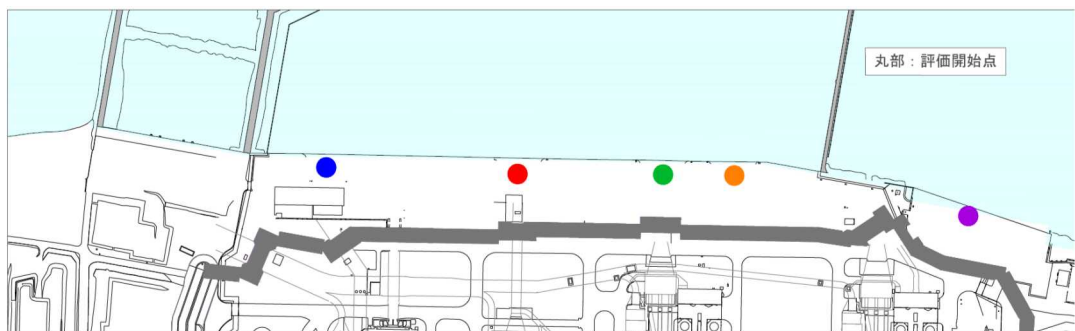


図 4.7-8 漂流物軌跡評価の初期配置（荒浜側護岸部）（図 4.2-26 を再掲）

	基本ケース	荒浜側防潮堤 なし		防波堤損傷		護岸部 2m 沈下
		なし	1m 沈降	2m 沈降	なし	
基準津波 1						
基準津波 2						
基準津波 3						

図 4.7-9 荒浜側護岸部で発生した漂流物の挙動 (図 4.2-27 を再掲)

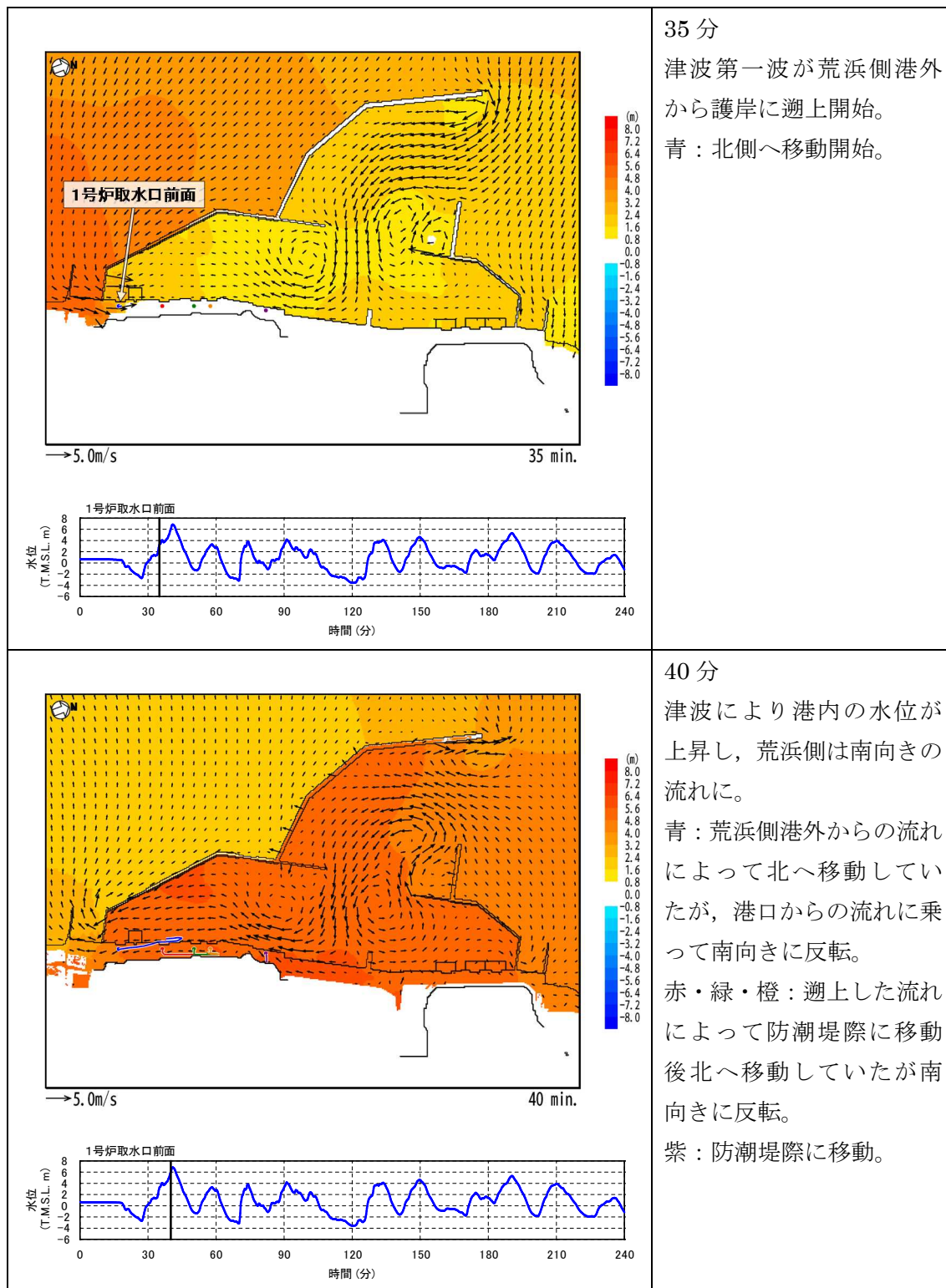


図 4.7-10(1) 流速ベクトルを用いた軌跡の考察 (基本ケース, 基準津波 1)

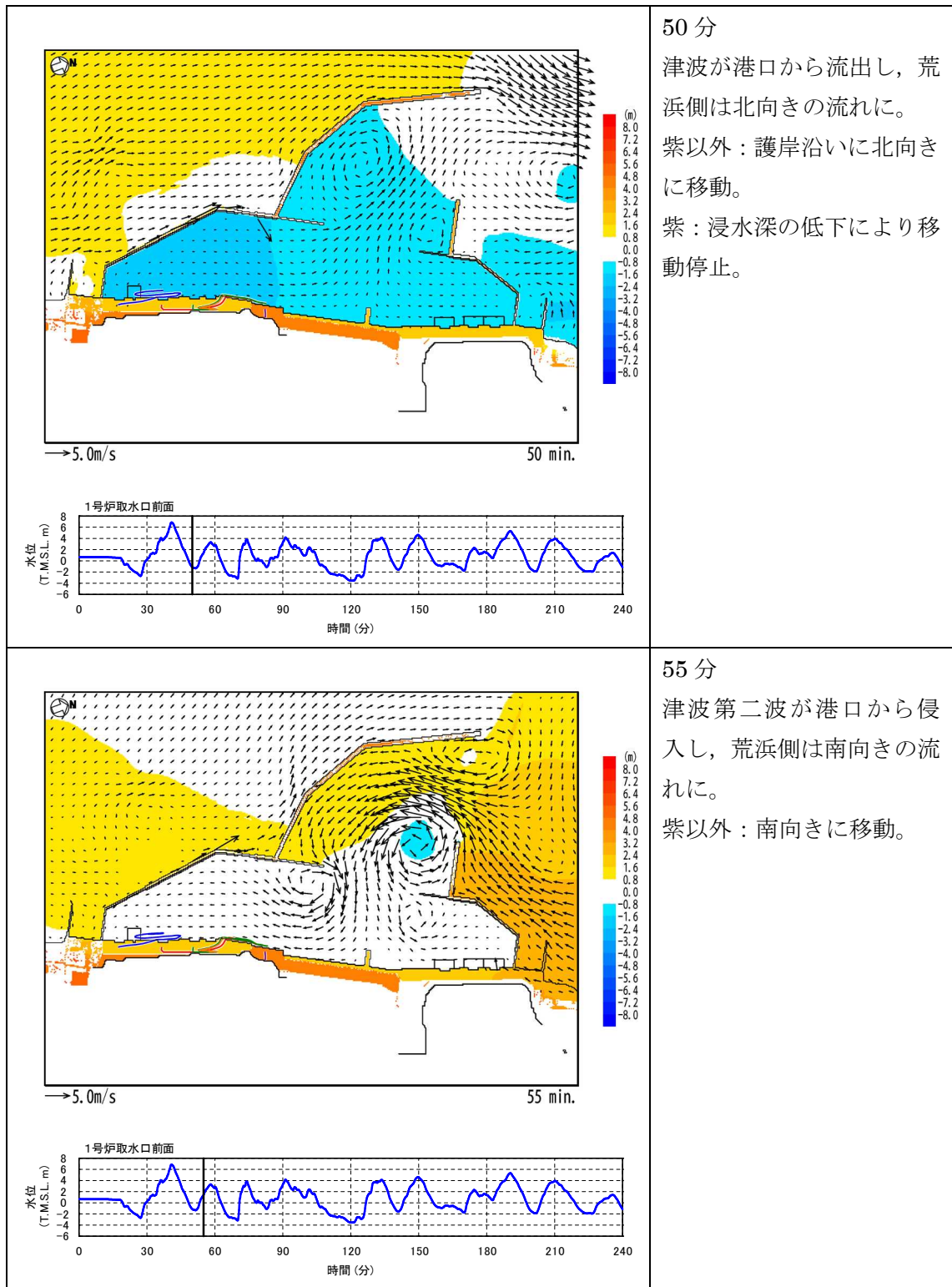


図 4.7-10(2) 流速ベクトルを用いた軌跡の考察（基本ケース，基準津波 1）

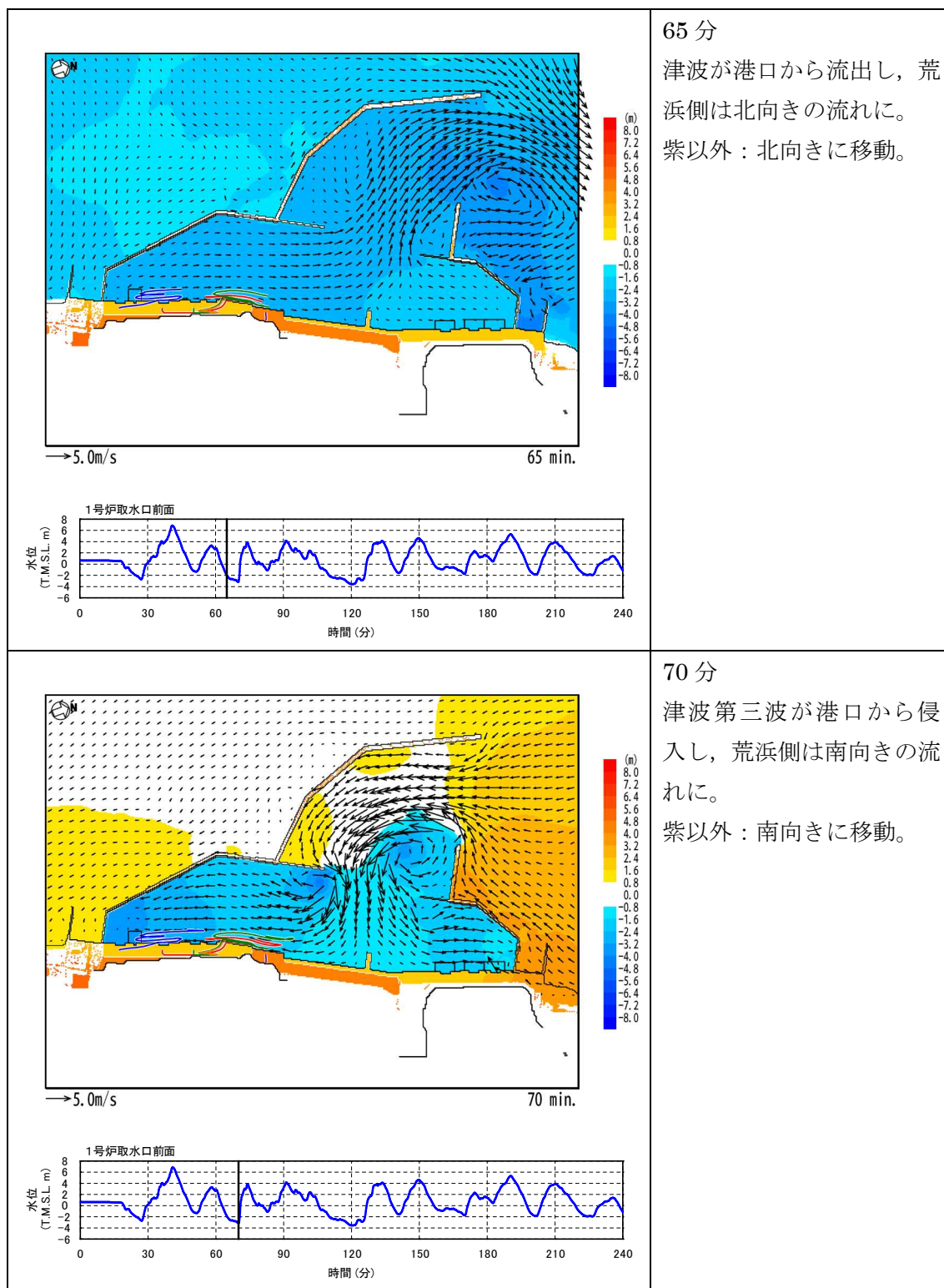


図 4.7-10(3) 流速ベクトルを用いた軌跡の考察（基本ケース，基準津波 1）

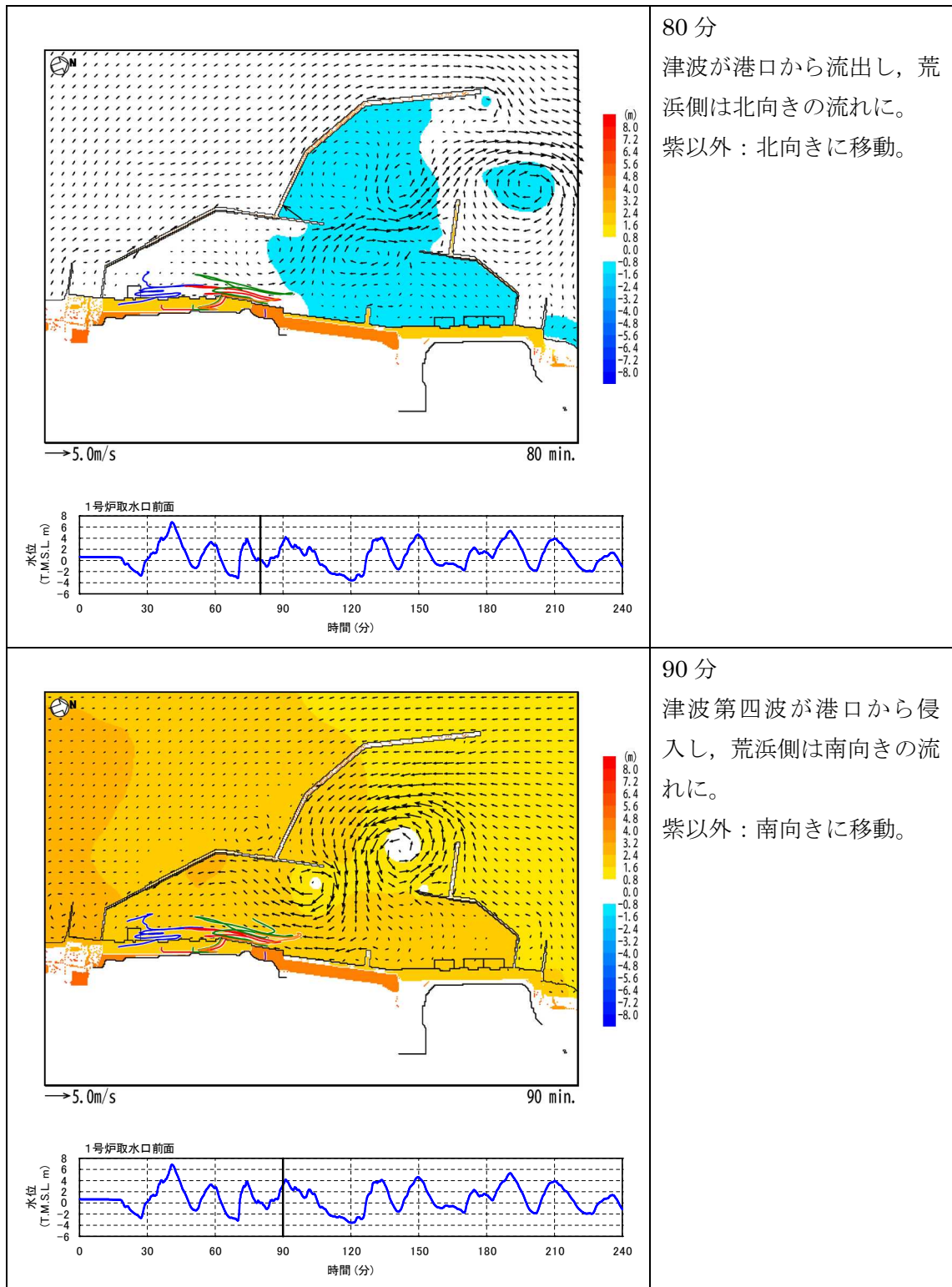


図 4.7-10(4) 流速ベクトルを用いた軌跡の考察（基本ケース，基準津波1）

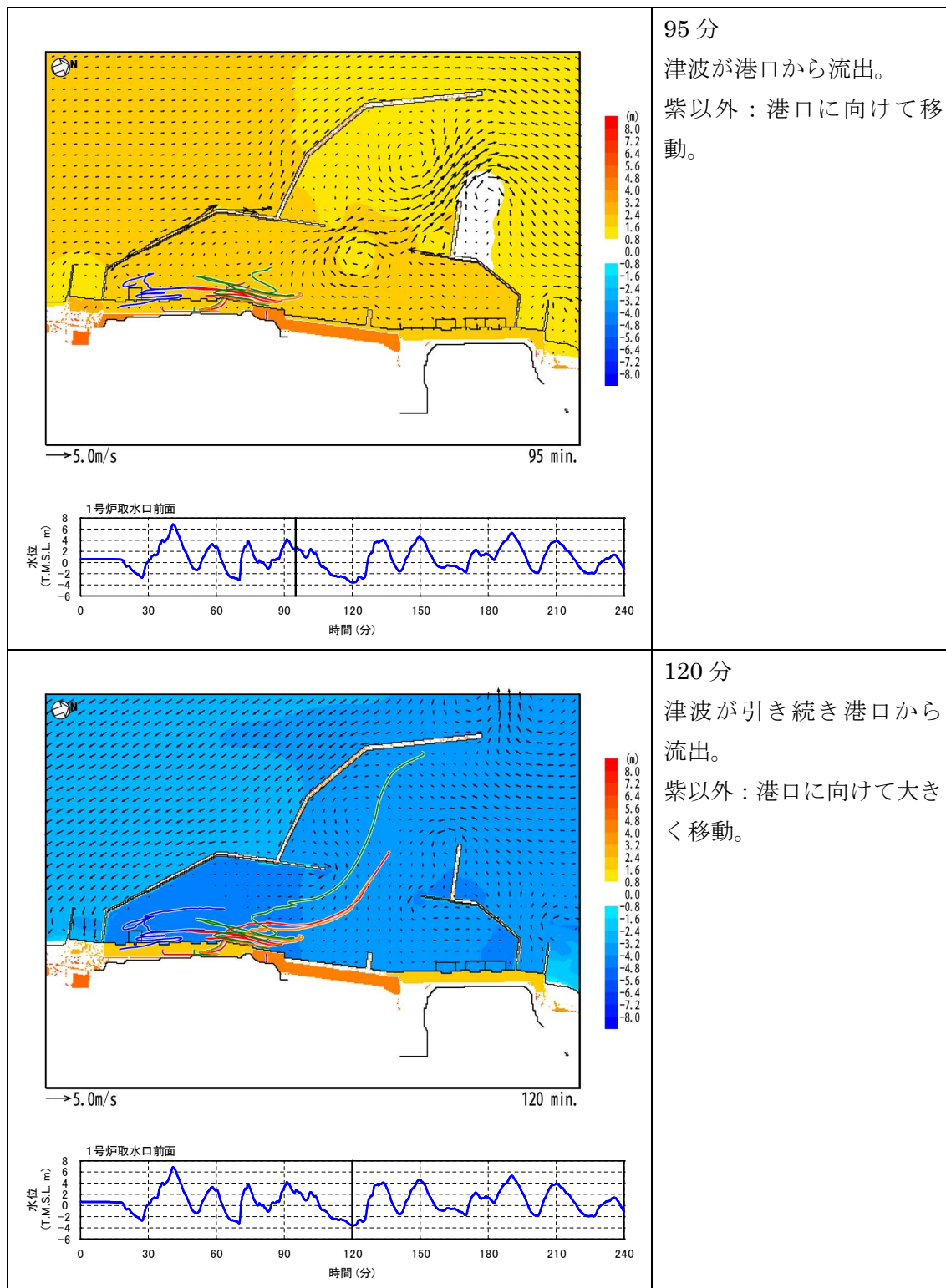


図 4.7-10(5) 流速ベクトルを用いた軌跡の考察（基本ケース，基準津波1）

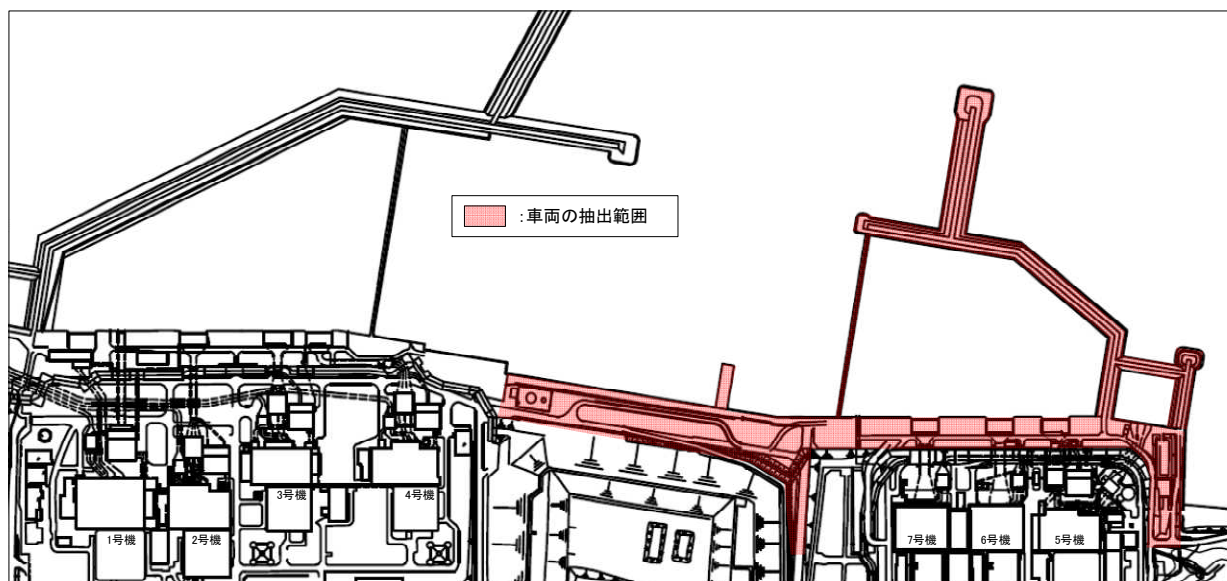


図 4.7-11 車両の抽出範囲 (大湊側護岸部)

図 4.7-11 に示す範囲に駐停車する車両については、リスク低減の観点から、表 4.7-3 に示す運用を定める。図 4.7-11 に示す範囲に駐停車する車両の抽出結果(車種ごとの代表例)及び車種ごとに適用する運用を整理して表 4.7-4 に示す。なお、以下に示す車両使用制限及び退避時気相部開放に係る運用については、保安規定に定め管理する。

表 4.7-3 大湊側護岸部に駐停車する車両に対して定める運用

分類 No.	運用	運用詳細
①	衝突荷重評価	保守的となる衝突荷重算定式を選択した上で衝突荷重評価を実施し、海水貯留堰の機能に影響が無いことを確認する。
②	密度評価	人員乗車部等が気相部となることを考慮した車両密度評価を実施し、密度が 1.05t/m^3 *1 より大きいことを確認する。
③	停車時間制限	人員及び機材の積み下ろし等に要する時間が短い車両のみ図 4.7-13 に示す範囲に停車することも可とする。 (ただし、積み下ろし等が完了次第範囲外に移動する。)
④	代替車両の利用	分類 No. ①又は②で整理される車両にて代替する。
⑤	退避時気相部開放	津波警報発令時に当該車両を用いての退避が困難と判断した場合は、気相部を開放(窓、扉及びタンクを開放)した上で人員が退避する運用とする。 ただし、人員を常時当該車両付近に配置することを前提条件とする。(添付資料 2 参照)

注記*1: 津波時の浮遊砂濃度を、保守的に高橋他(1999)において示される浮遊砂濃度の上限値 1%と設定した場合の海水密度

表 4.7-4 大湊側護岸部に駐停車する車両の抽出結果（車種ごとの代表例）及び適用する運用の一覧

車種	用途	適用する運用 の分類*1	車両重量[t]	密度[t/m ³]*2		参考密度[t/m ³]*3	
				開放無し*4	開放有り*5	開放無し*4	開放有り*5
小型建設用車両 (スキッドローダー, 高所作業車等)	汚泥集積	②密度評価	1.07	3.26	不要	2.73	不要
軽自動車	人員/資機材運搬	①衝突荷重評価	0.83	0.25	選択しない	0.24	選択しない
乗用車	人員運搬	③停車時間制限 ④代替車両の利用	2.00	0.28	選択しない	0.27	選択しない
中型トラック	資機材運搬	③停車時間制限 ④代替車両の利用 ⑤退避時気相部開放	4.02	0.80	2.55	0.77	2.20
ユニック	設備吊り上げ	⑤退避時気相部開放	5.11	0.97	2.81	0.92	2.41
大型トラック (トレーラー含む)	資機材運搬	②密度評価	9.70	1.36	不要	1.26	不要
バキューム車	汚泥集積	⑤退避時気相部開放	6.18	0.51	1.37	0.50	1.27
大型建設用車両 (クレーン, 高所作業車等)	設備吊り上げ等	②密度評価	7.32	1.26	不要	1.18	不要

注記*1：上下並列記載は、いずれかの運用を適用することを表す。

*2：部材密度を 5.10t/m³（鉄の密度×0.65）とした場合の車両全体の密度（密度評価詳細については添付資料 3 参照）

*3：部材密度を 3.92t/m³（鉄の密度×0.50）とした場合の車両全体の密度を参考密度として記載

*4：「⑤退避時気相部開放」を適用しない場合の密度を記載

*5：「⑤退避時気相部開放」を適用する場合の密度を記載

(3) 鉄筋コンクリート建屋

鉄筋コンクリート建屋については、東日本大震災時に漂流した事例が確認されているが、「4.2 漂流物による影響確認について」に示すとおり、遡上域に設置される鉄筋コンクリート建屋について東日本大震災時に確認されたような漂流物とはならないと評価されるため、ここでは漂流物衝突荷重算定の対象から除外する。

(4) その他資機材

その他資機材として、ユニットハウスの他に、角材、足場板、ホース及びカラーコーンが海水貯留堰に衝突する可能性があるが、ユニットハウス以外の設備については、重量が数 kg 程度であり、その衝突荷重はユニットハウスの衝突荷重に包含されるものと考えられることから、ユニットハウスを代表の検討対象漂流物（衝突物）とする。

4.7.4.2 初期配置に関する整理

漂流物が分裂波や砕波のような特殊な形態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、上記のような特殊な形状の津波が発生し得る範囲を設定した上で、漂流物の初期配置が上記範囲内に含まれるかどうかを整理する。

(1) ソリトン分裂及び砕波に関する分類

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 4.7-12 及び図 4.7-13 参照)

上記より、ソリトン分裂及び砕波の観点では特殊な形状の津波は発生しないものと整理される。

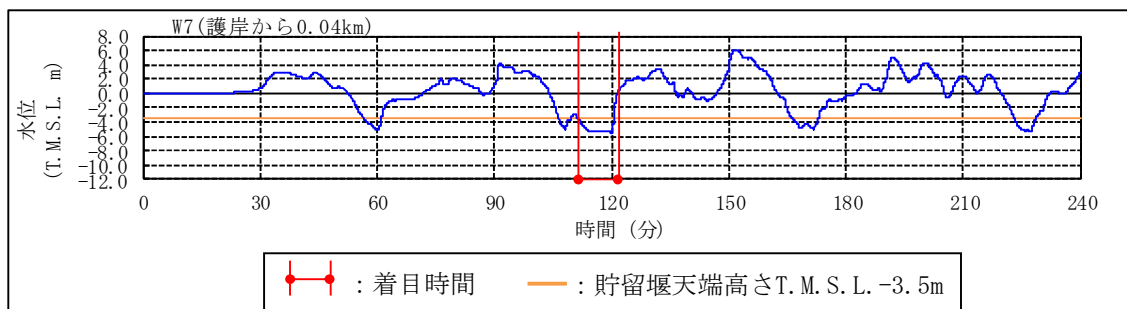


図 4.7-12 最大水面勾配が確認された時刻（基準津波 2，118 分，海水貯留堰設置位置（W7））

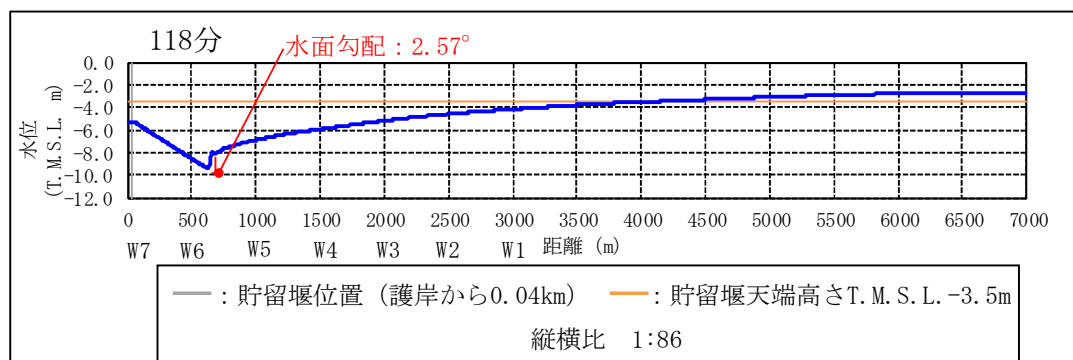


図 4.7-13 最大水面勾配が確認された時刻の津波波形（空間分布）

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

(2) その他サイト特性

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。漂流物の初期配置が上記港湾内の露出域であった場合、砕波のような特殊な形態の波に乗った状況となる可能性を否定できず、衝突荷重に影響を及ぼす可能性がある。引き波時の海底露出域は、図 4.7-14 に示すとおり最大で海水貯留堰から沖合約 600m 地点において確認されるため、上記 600m と港湾設備との位置関係を踏まえ、発電所全体港湾内を砕波等により漂流物が移動する範囲として設定する。(具体的な範囲については、図 4.7-15 に衝突物の初期配置と共に示す。)

また、上記を考慮し、護岸部津波遡上域を「直近(陸域)」, 発電所全体港湾内を「直近(海域)」, 港湾外を「前面海域」と設定する。

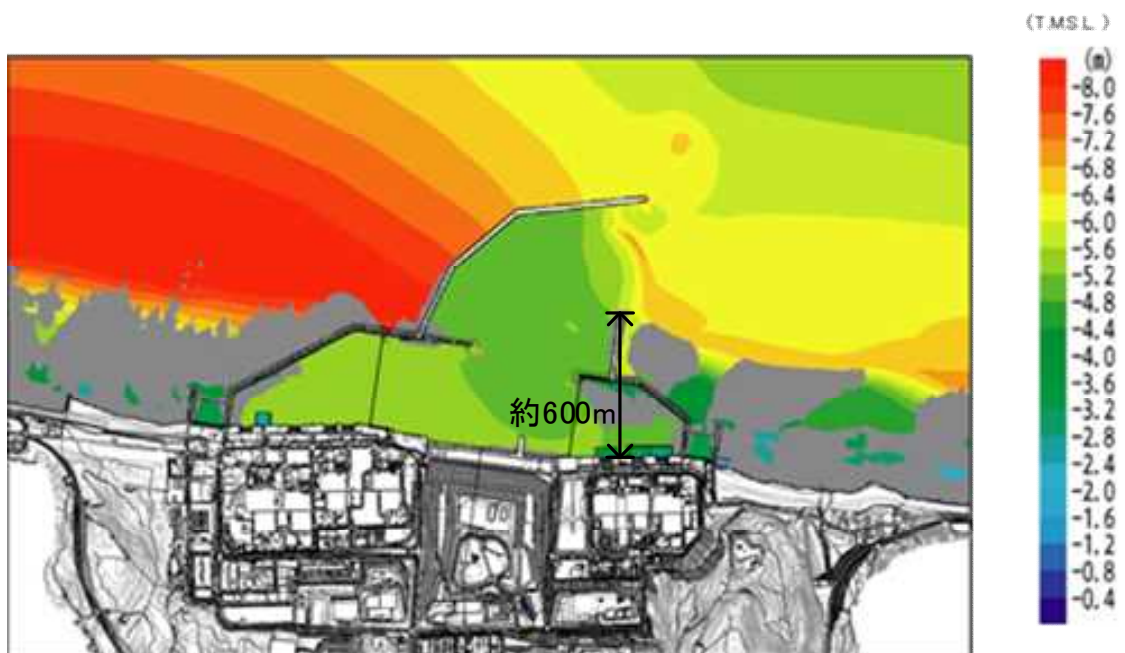


図 4.7-14 基準津波における海底露出範囲(基準津波 2 における最低水位分布)

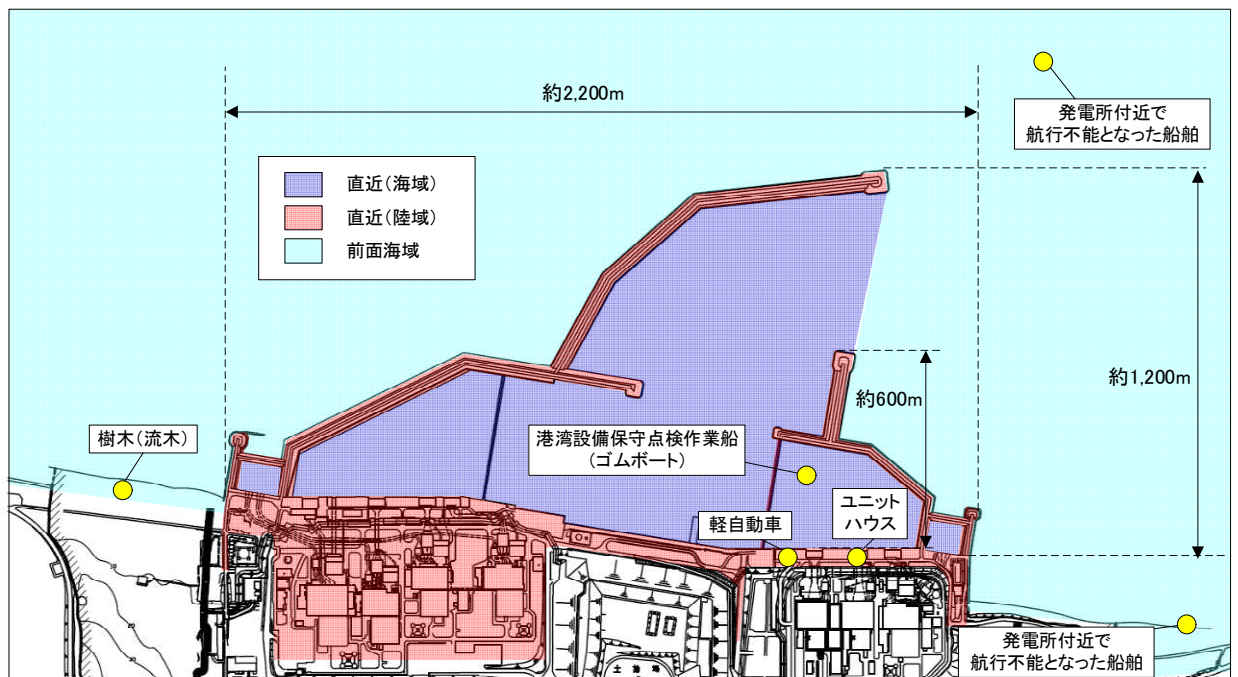
4.7.4.3 衝突荷重を算定する検討対象漂流物(衝突物)の整理

「4.7.3.2 検討対象漂流物(衝突物)の抽出結果」において示す検討対象漂流物(衝突物)について、「4.7.4.2 初期配置に関する整理」及び「4.7.4.1 漂流物化防止対策等に関する整理」を踏まえ、衝突荷重を算定する検討対象物(衝突物)を表 4.7-5 に整理する。

また、表 4.7-5 で挙げた各衝突物について、その初期配置を前項の「前面海域」等の位置関係とともに図 4.7-15 に示す。

表 4.7-5 衝突荷重を算定する検討対象物（衝突物）整理表

種類	内容・名称・構造	重量 [t]	初期配置	
			位置情報	分類
船舶	港湾設備保守点検作業船（ゴムボート）	1.0t 未満	大湊側港湾内	直近（海域）
	発電所近傍で航行不能となった船舶	15t 未満	港湾外	前面海域
資機材	ユニットハウス	1.0t 未満	大湊側護岸部	直近（陸域）
車両	軽自動車	1.0t 以下	大湊側護岸部	直近（陸域）
植生	樹木（流木）	約 140kg	荒浜側陸域	前面海域



注：各衝突物の初期配置は、代表的な位置を示す。

図 4.7-15 衝突荷重を算定する検討対象物（衝突物）の初期配置

4.7.5 漂流物衝突荷重評価に用いる荷重算定式

(1) 規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物の荷重算定式の整理

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を表 4.7-6 に示す。

表 4.7-6 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>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>	<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	$F_H / (gM) = S \cdot C_{MA} \cdot \{V_H / (g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})\}^{2.5}$ <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>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>「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	$P = 0.1 W U$ <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 4.7-6 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> $F = \gamma_p x^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5}{4}\tilde{m}\right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{2}{5}}, x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1+k_2}, k = \frac{(1-v^2)}{\pi E}, \tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}$ <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

(2) 規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物荷重算定式の整理結果

規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物荷重算定式の整理結果を表 4.7-7 に示す。

表 4.7-5 において整理した、衝突荷重を算定する検討対象物（衝突物）について、表 4.7-7 に示す各算定式の適用条件（種類、漂流物の初期配置、適用流速）を踏まえた上で衝突荷重を算定する。

表 4.7-7 各種基準類の漂流物の衝突荷重算定式の適用性の整理結果

No.	出典	種類	漂流物の初期配置	適用流速	適用性
①	松富ほか	流木	直近(陸域) 直近(海域)	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（陸域）」又は「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(陸域)	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(陸域)	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（陸域）」又は「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(陸域)	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(陸域) 直近(海域)	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（陸域）」又は「直近（海域）」からの流木に対して適用可能と判断する。

(3) 検討対象漂流物への漂流物荷重算定式の適用について

表 4.7-7 の整理を踏まえ、表 4.7-5 に示す各検討対象漂流物（衝突物）に適用する算定式を以下のとおりとする。

① 船舶

港湾設備保守点検作業船（ゴムボート）については、「直近（海域）」となる漂流物に該当するため、FEMA（2012）を適用する。

一方で、発電所付近で航行不能となった船舶については、「前面海域」となる漂流物に該当するため、道路橋示方書（2002）を適用する。

② 資機材（ユニットハウス）

資機材（ユニットハウス）については、「直近（陸域）」となる漂流物に該当するため、FEMA（2012）を適用する。

③ 車両（軽自動車）

車両（軽自動車）については、「直近（陸域）」となる漂流物に該当するため、FEMA（2012）を適用する。

④ 流木

植生は、港湾内の直近（陸域）には存在しない。

一方で、港湾外の陸域に保安林が存在するため、当該箇所の植生が漂流物となる状況を想定する。その場合航行不能船舶と同様に、港湾外を漂う流木が押波とともに衝突する形態となるため「前面海域」と整理されることから、道路橋示方書（2002）を適用する。

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 漂流物の衝突荷重の算定

上記の方針に従い算出した海水貯留堰への漂流物の衝突荷重を表 4.7-8 に示す。(算出過程については添付資料 4 参照)

表 4.7-8 漂流物衝突荷重一覧

種類	内容・名称・構造	重量[t]	初期配置	適用式	漂流物衝突荷重[kN]
船舶	港湾設備保守点検作業船 (ゴムボート)	1.0t 未満	直近 (海域)	FEMA	—*1
	発電所近傍で航行不能となった船舶	15t	前面海域	道路橋示方書	89
資機材	ユニットハウス	1.0t 未満	直近 (陸域)	FEMA	—*2
車両	軽自動車	1.0t	直近 (陸域)	FEMA	499
植生	樹木 (流木)	140kg	前面海域	道路橋示方書	1

注記*1: ゴムボートの軸剛性が不明であるが、軽自動車よりも剛性が小さいと考えられるとともに、重量も軽自動車より小さいため、軽自動車の評価結果に包含されると整理する。

注記*2: ユニットハウスの軸剛性が不明であるが、軽自動車よりも剛性が小さいと考えられるとともに、重量も軽自動車より小さいため、軽自動車の評価結果に包含されると整理する。

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。ガイドラインに従った判定により、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、数値解析を用いた検討を行うこととする。なお、安田ほか(2006)⁴⁾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。

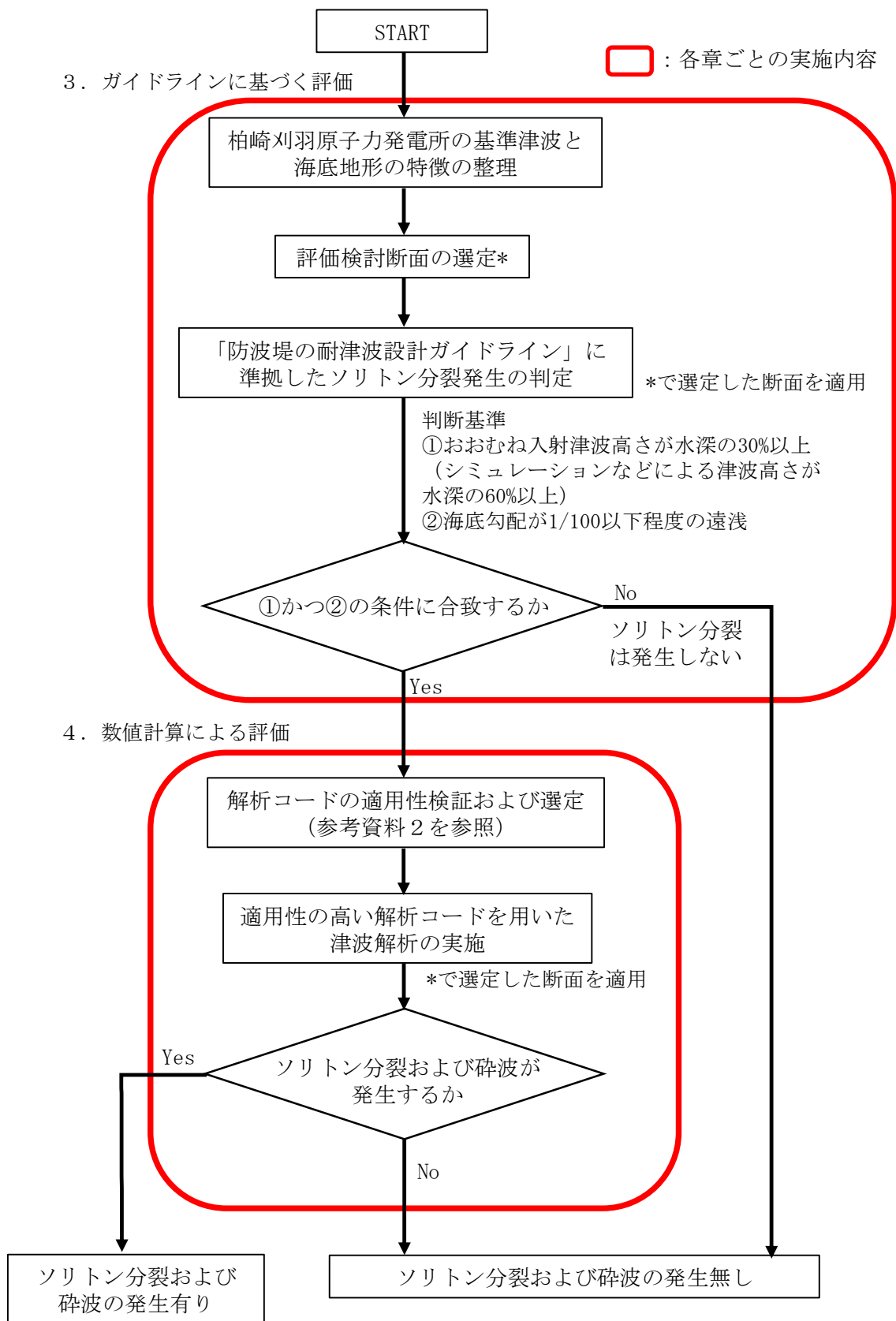


図 4.7 添 1-2-1 検討フロー

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。

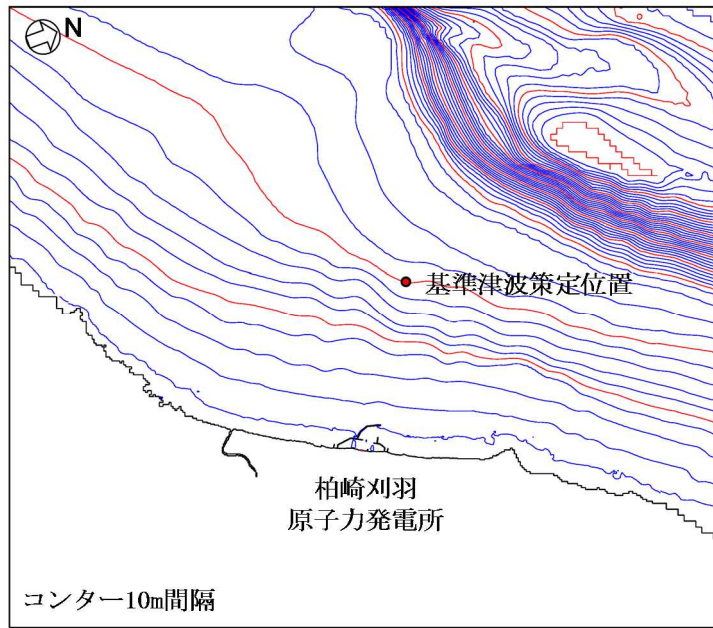


図 4.7 添 1-3.3-1 海底地形平面図

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)、深浅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。

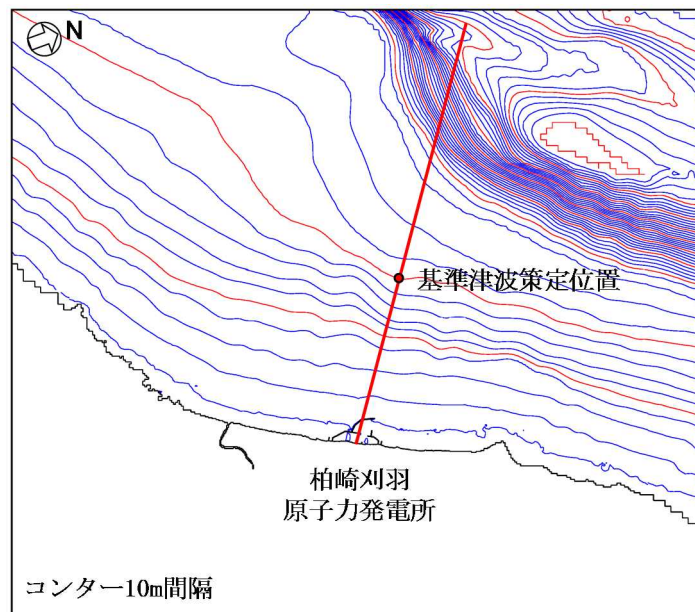
条件②の海底勾配については、「3.4 検討断面の選定」で選定した代表的な断面について検討したところ、図 4.7 添 1-3.5-1 に示す敷地周辺の海底勾配において、基準津波策定位置から護岸位置までの平均的な海底勾配は約 1/75 であることを確認した。しかしながら、基準津波策定位置から護岸までの区間において、局所的に海底勾配が 1/100 を下回る箇所があることから、②の条件に合致しないとはいえない。

以上のことから、ガイドラインに基づく判定ではソリトン分裂発生の可能性を完全に否定できないため、数値計算により検討することとした。

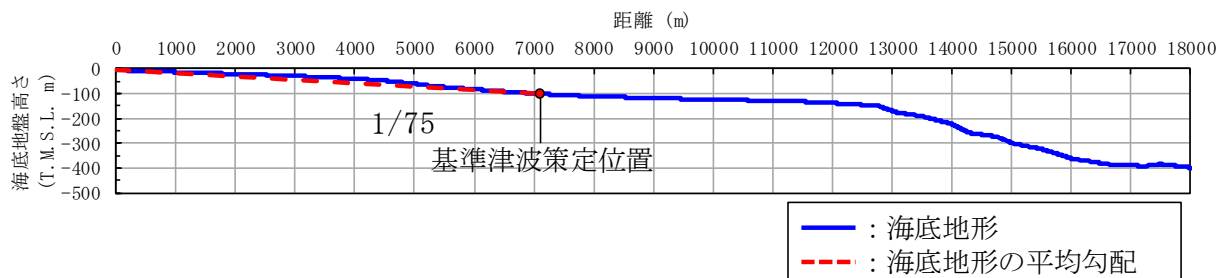
表 4.7 添 1-3.5-1 7号機取水口前面における津波高さ和水深の関係

	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。

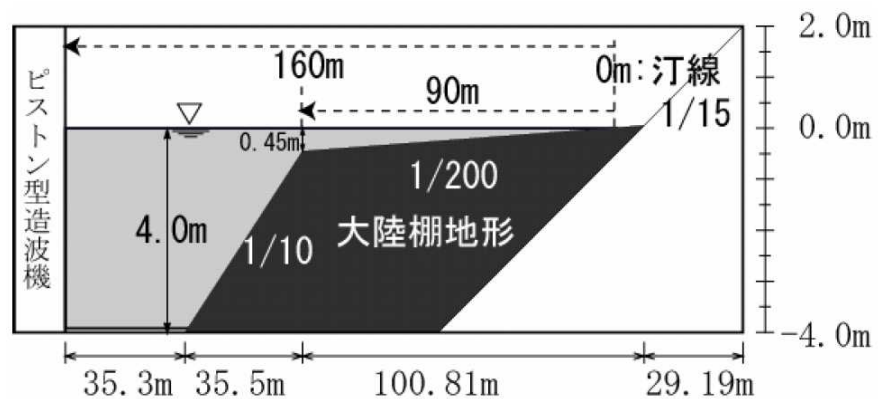


図4.7添1-4.2-2 実験水路の概要(原子力土木委員会 津波評価部会 委員会報告⁴⁾)

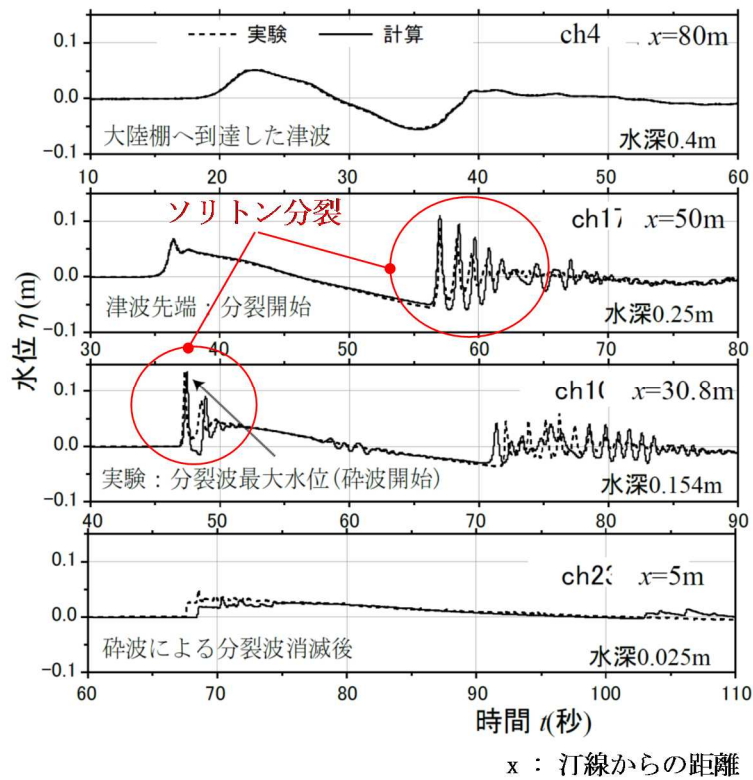


図 4.7 添 1-4.2-3 ソリトン分裂波形の例 (原子力発電所の津波評価技術 2016⁵⁾に加筆)

(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。

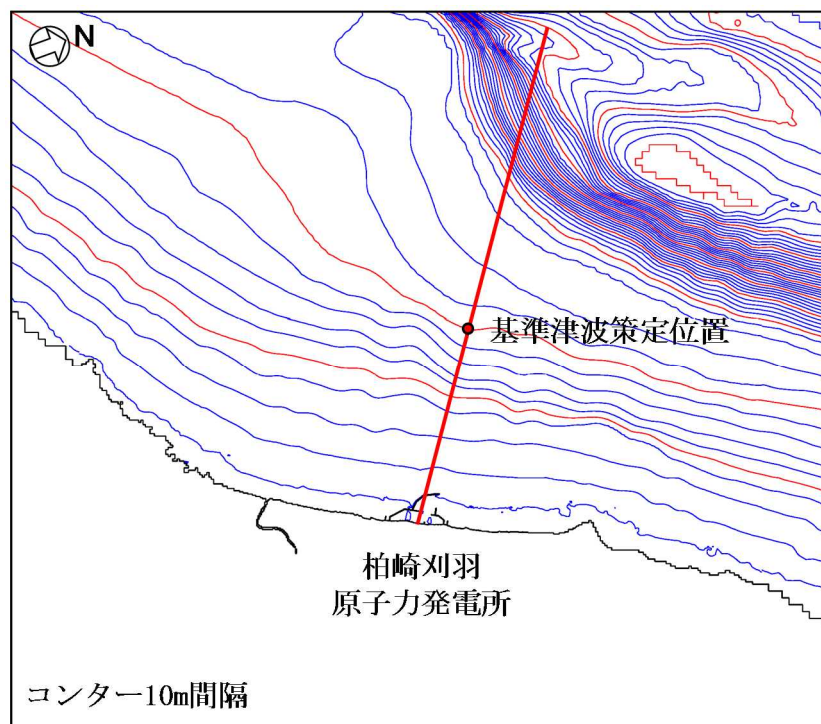
4.4 数値解析による検討

(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。

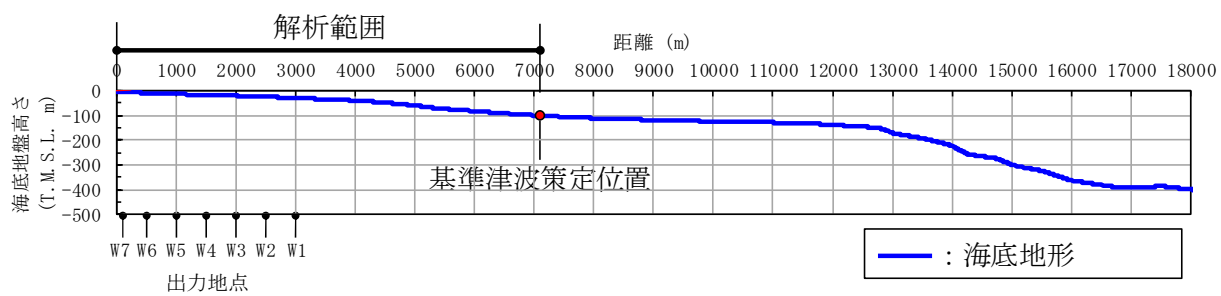
解析モデルにおいては、「3.4 検討断面の選定」で示したとおり、基準津波策定位置を通り等深線と直交する直線の断面をモデル化した。計算格子間隔は「津波浸水想定の設定の手引き⁷⁾」によると「最小計算格子間隔は10m程度より小さくすることを目安とする」との記載があることから、5条まとめ資料の津波シミュレーションの最小格子サイズと同じ5mとした。なお、基準津波策定位置から護岸までのモデル化においては、一様に最小格子サイズ5mとした。

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。

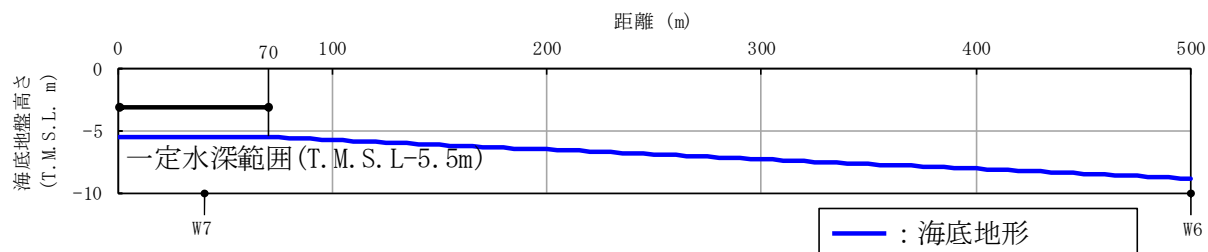


広域

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

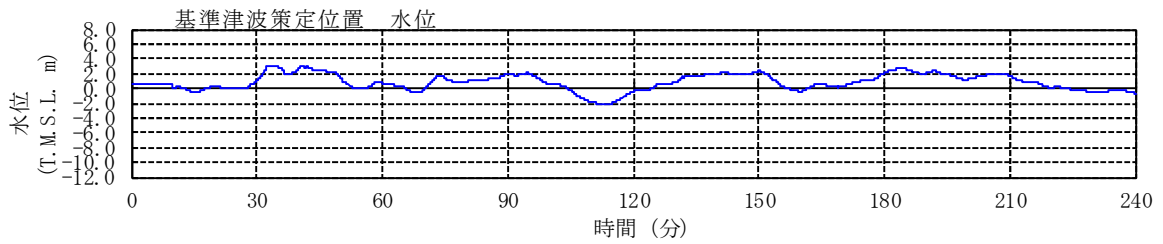
解析条件を表 4.7 添 1-4.4-2 に示す。

表 4.7 添 1-4.4-2 解析条件

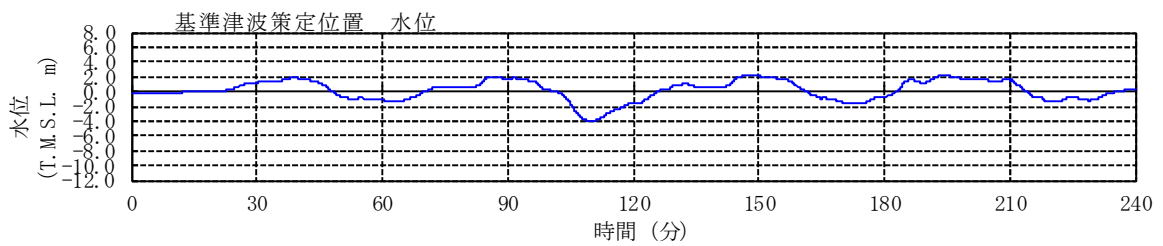
モデル化	基準津波策定位置～護岸 (防波堤はモデル化せず, 港湾内の T.M.S.L. -5.5m 以浅は, 一定水深)
計算格子間隔	5m
計算時間間隔	0.05 秒
潮位条件	朔望平均満潮位・干潮位に潮位のばらつきを考慮 基準津波 1 : T.M.S.L. 0.65m 基準津波 2 : T.M.S.L. -0.12m 基準津波 3 : T.M.S.L. 0.65m
境界条件	ソリトン分裂および砕波の発生有無を検討する上では, 海域での水位変動量が重要となることや, 陸域での護岸, 大湊側防潮堤や中央土捨場等の敷地内の現地形を踏まえ, 護岸で完全反射とした。
摩擦係数	マンニングの粗度係数 ($n=0.03\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$) * 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

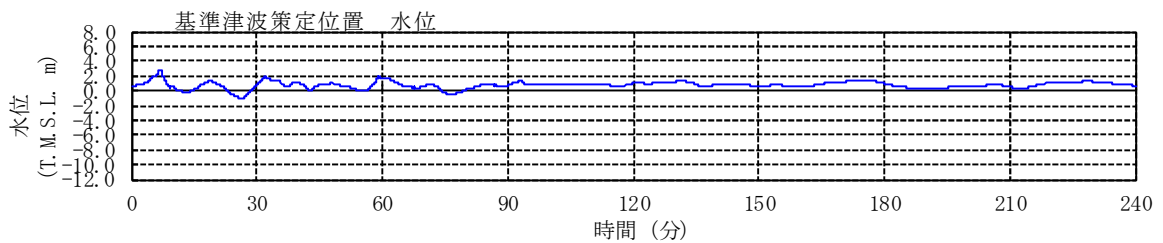
入力波形は設置変更許可申請書に示した基準津波 1 から 3 を対象とした。また、基準津波策定位置を入力位置とした。基準津波策定位置における入力波形を図 4.7 添 1-4.4-3 に示す。



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。

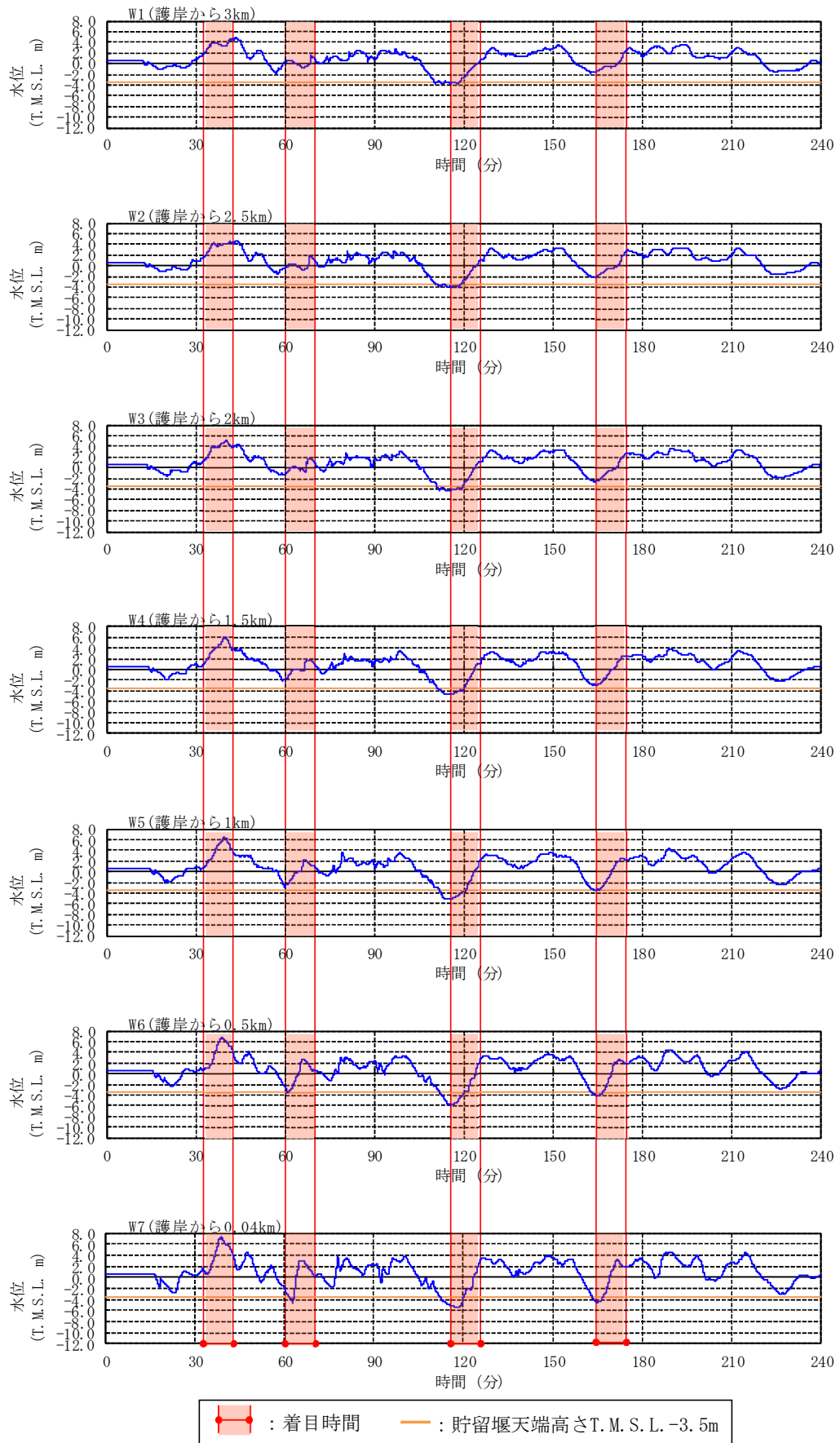


図 4.7 添 1-4.4-4 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [0-240 分]

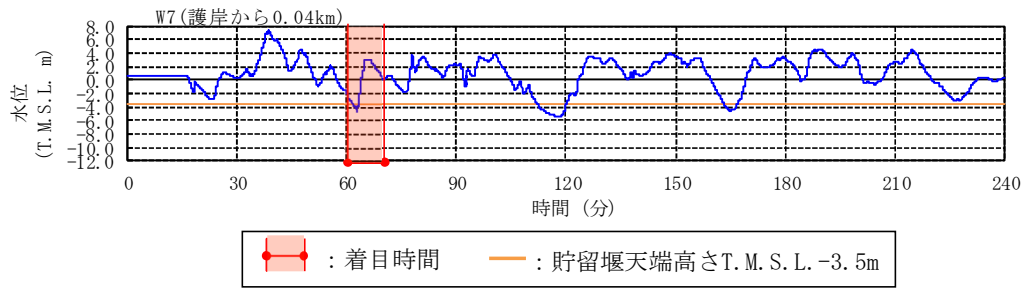


図 4.7 添 1-4.4-5 水位時刻歴波形の着目時間範囲 (基準津波 1)

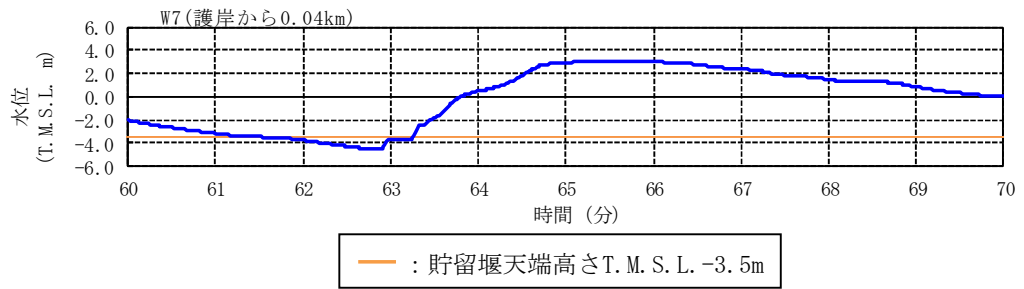


図 4.7 添 1-4.4-6 水位時刻歴波形 (基準津波 1) [60-70 分を拡大]

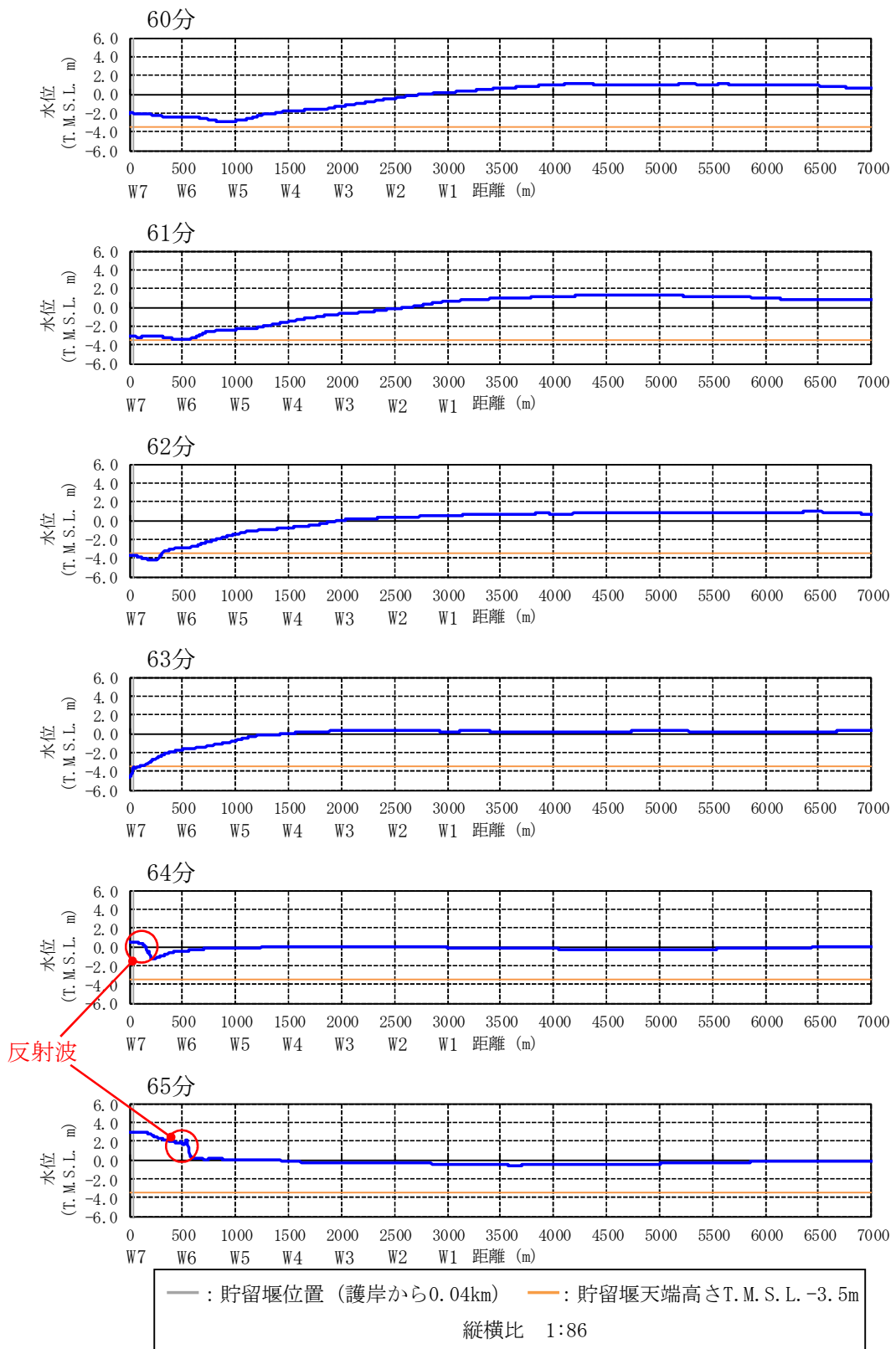


図 4.7 添 1-4.4-7 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [60-65 分]

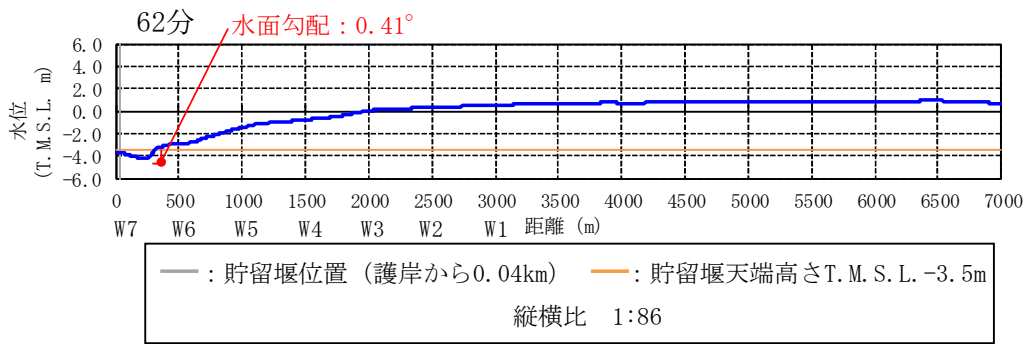


図 4.7 添 1-4.4-8 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 1, 62 分時点)

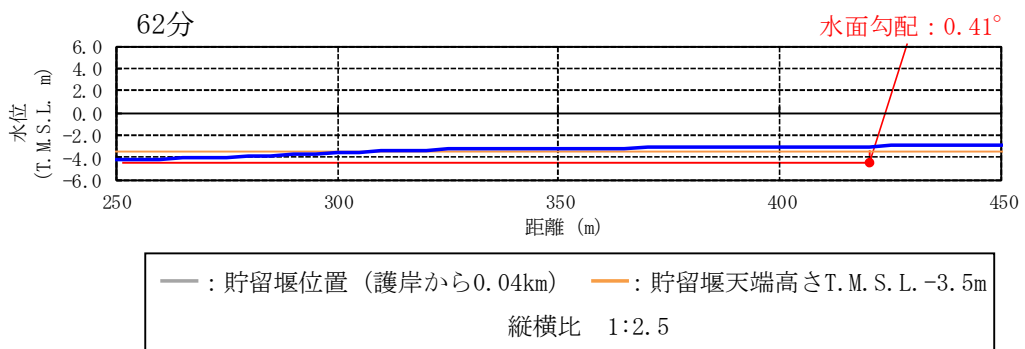


図 4.7 添 1-4.4-9 水位の空間分布 (基準津波 1, 62 分時点) [250-450m を拡大]

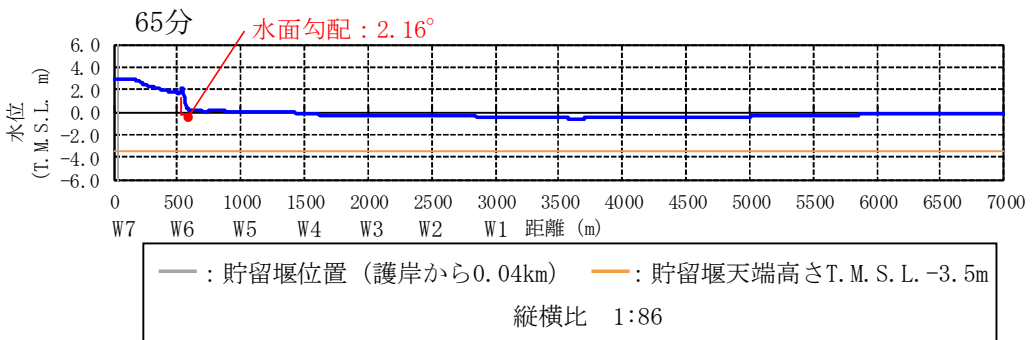


図 4.7 添 1-4.4-10 水位の空間分布と水面勾配 (基準津波 1, 65 分時点)

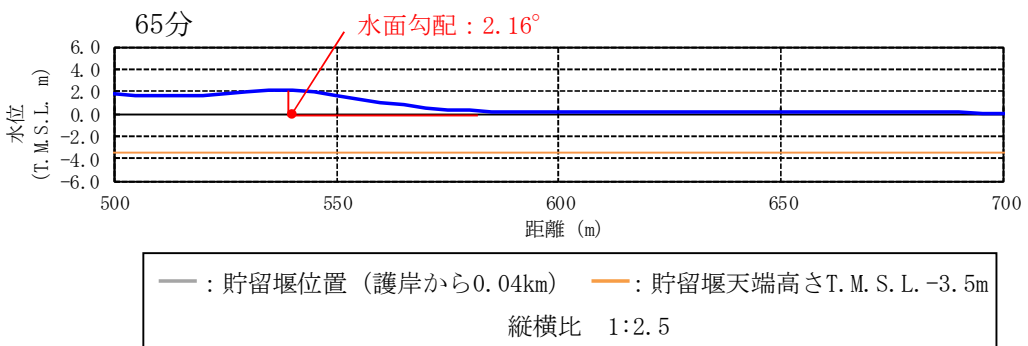


図 4.7 添 1-4.4-11 水位の空間分布 (基準津波 1, 65 分時点) [500-700m を拡大]

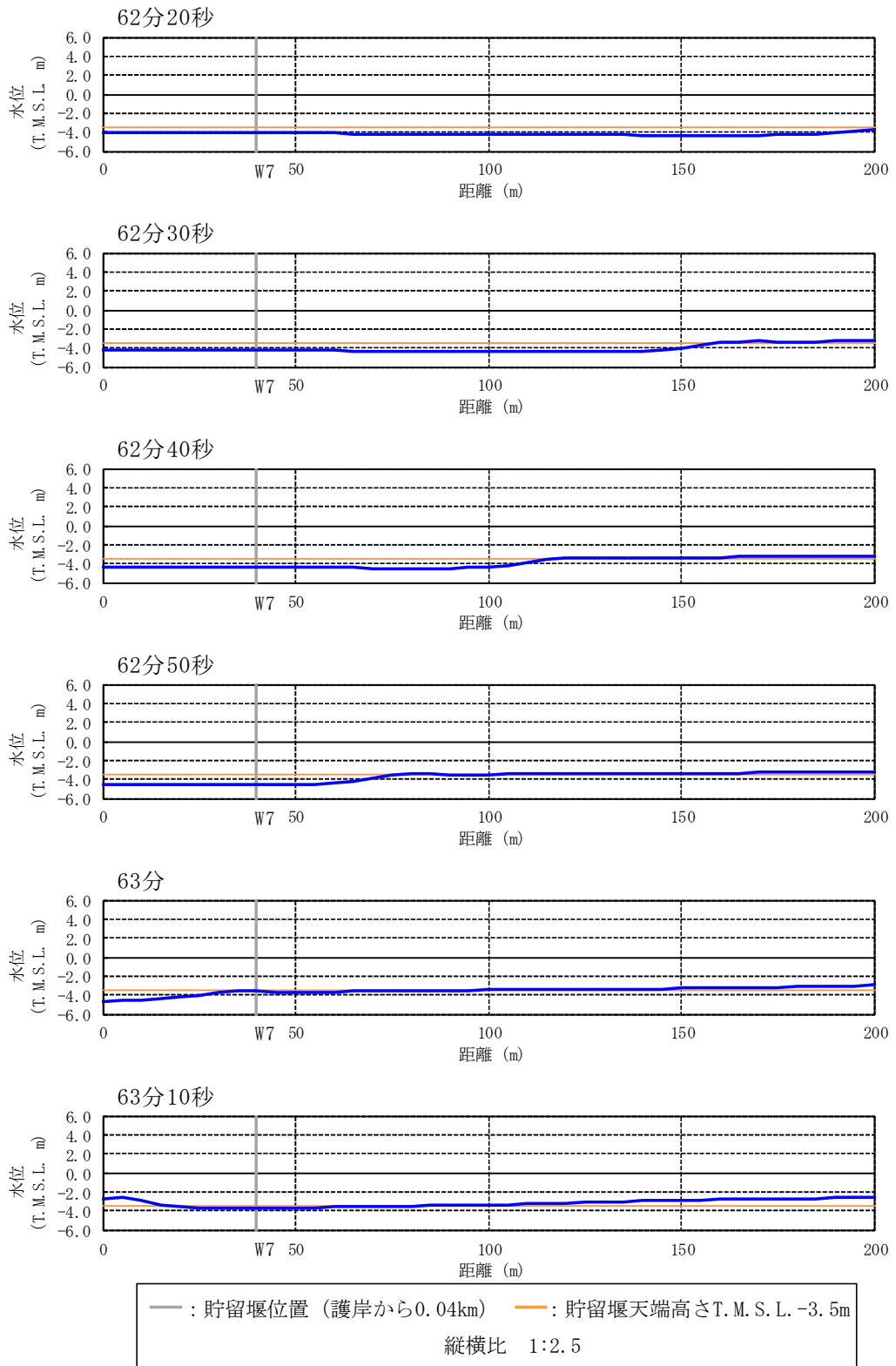


図 4.7 添 1-4.4-12 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1)

[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。

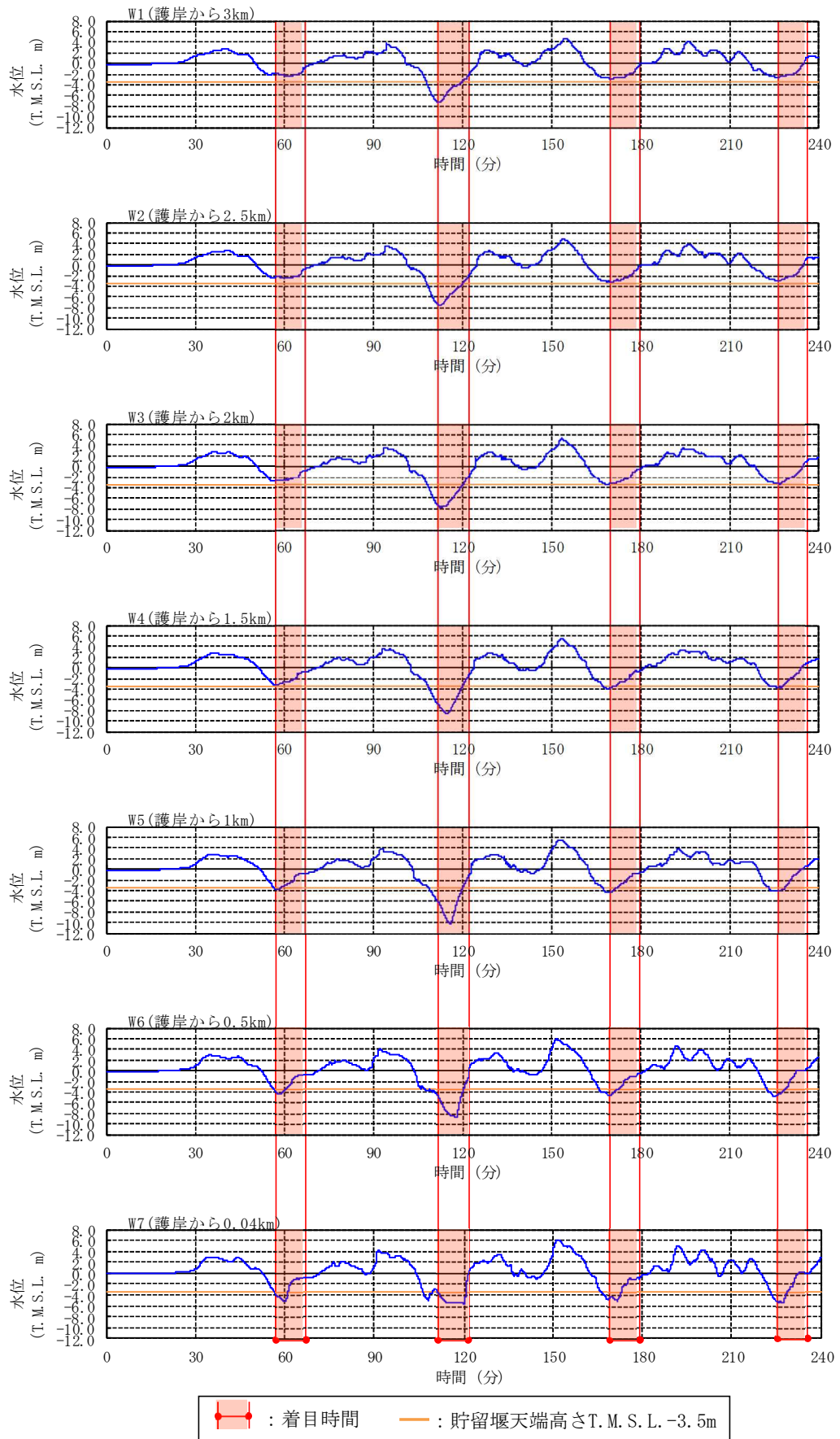


図 4.7 添 1-4.4-13 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [0-240 分]

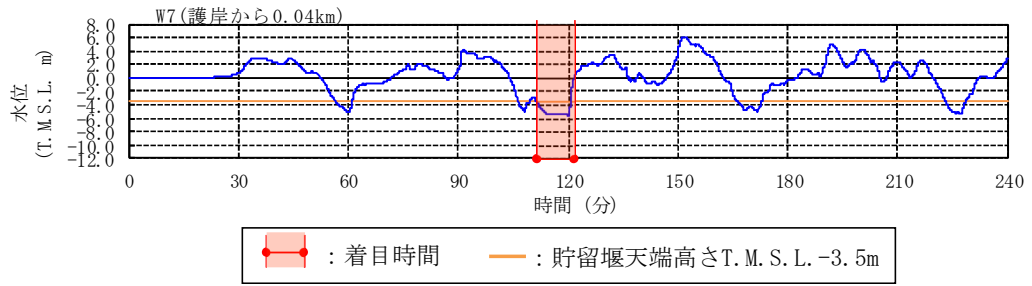


図 4.7 添 1-4.4-14 水位時刻歴波形の着目時間範囲（基準津波 2）

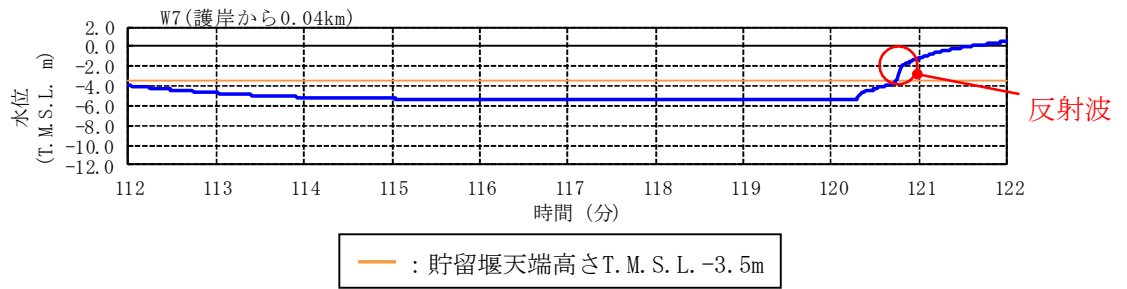


図 4.7 添 1-4.4-15 水位時刻歴波形（基準津波 2） [112-122 分を拡大]

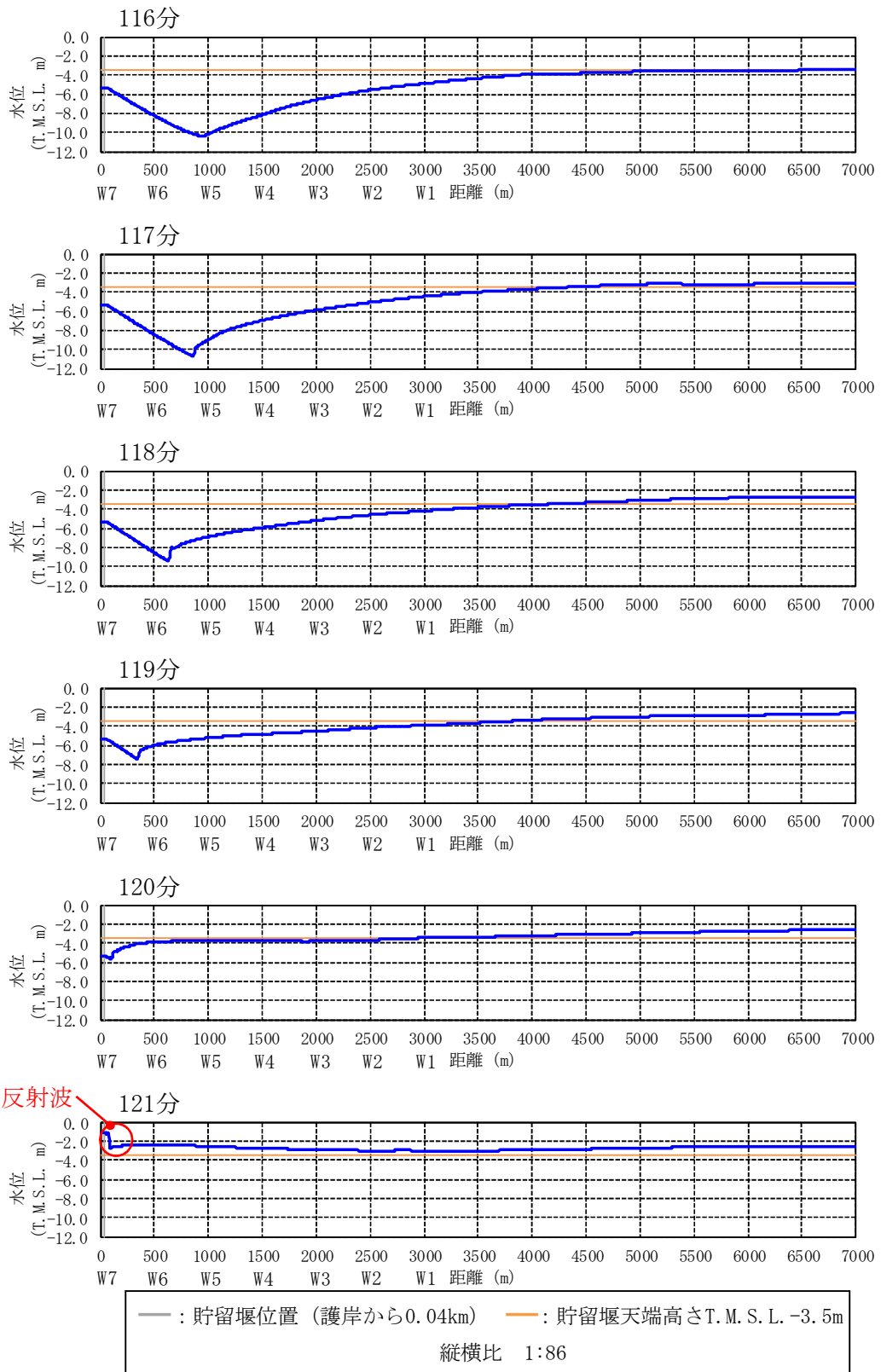


図 4.7 添 1-4.4-16 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [116-121 分]

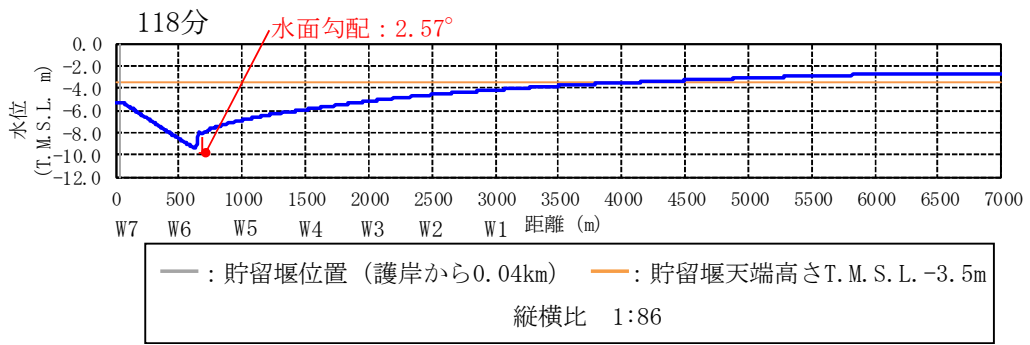


図 4.7 添 1-4.4-17 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 2, 118 分時点)

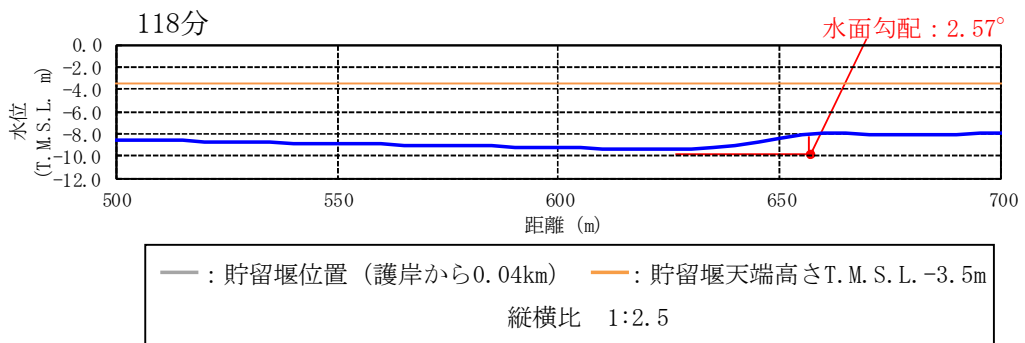


図 4.7 添 1-4.4-18 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 2, 118 分時点)
[500-700m を拡大]

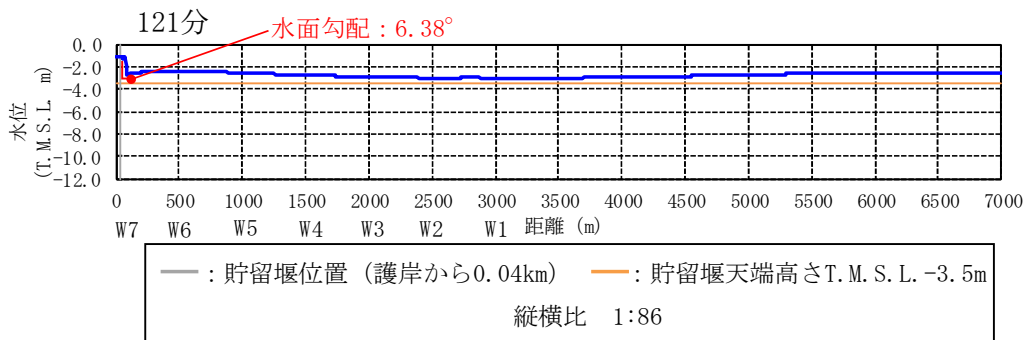


図 4.7 添 1-4.4-19 水位の空間分布と水面勾配 (基準津波 2, 121 分時点)

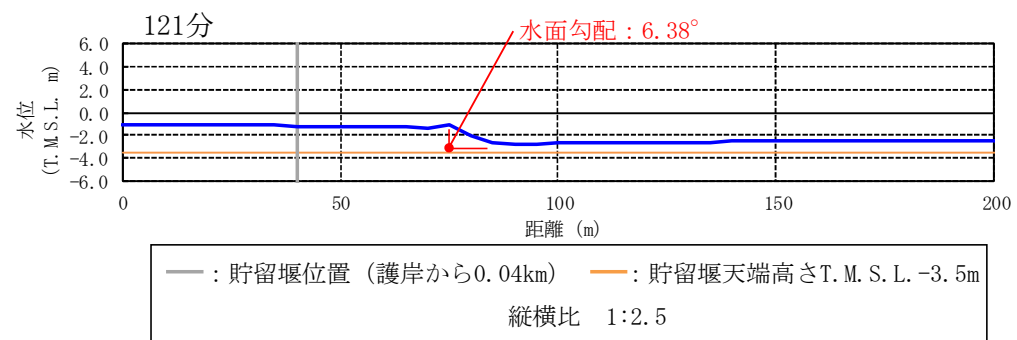


図 4.7 添 1-4.4-20 水位の空間分布 (基準津波 2, 121 分時点) [0-200m を拡大]

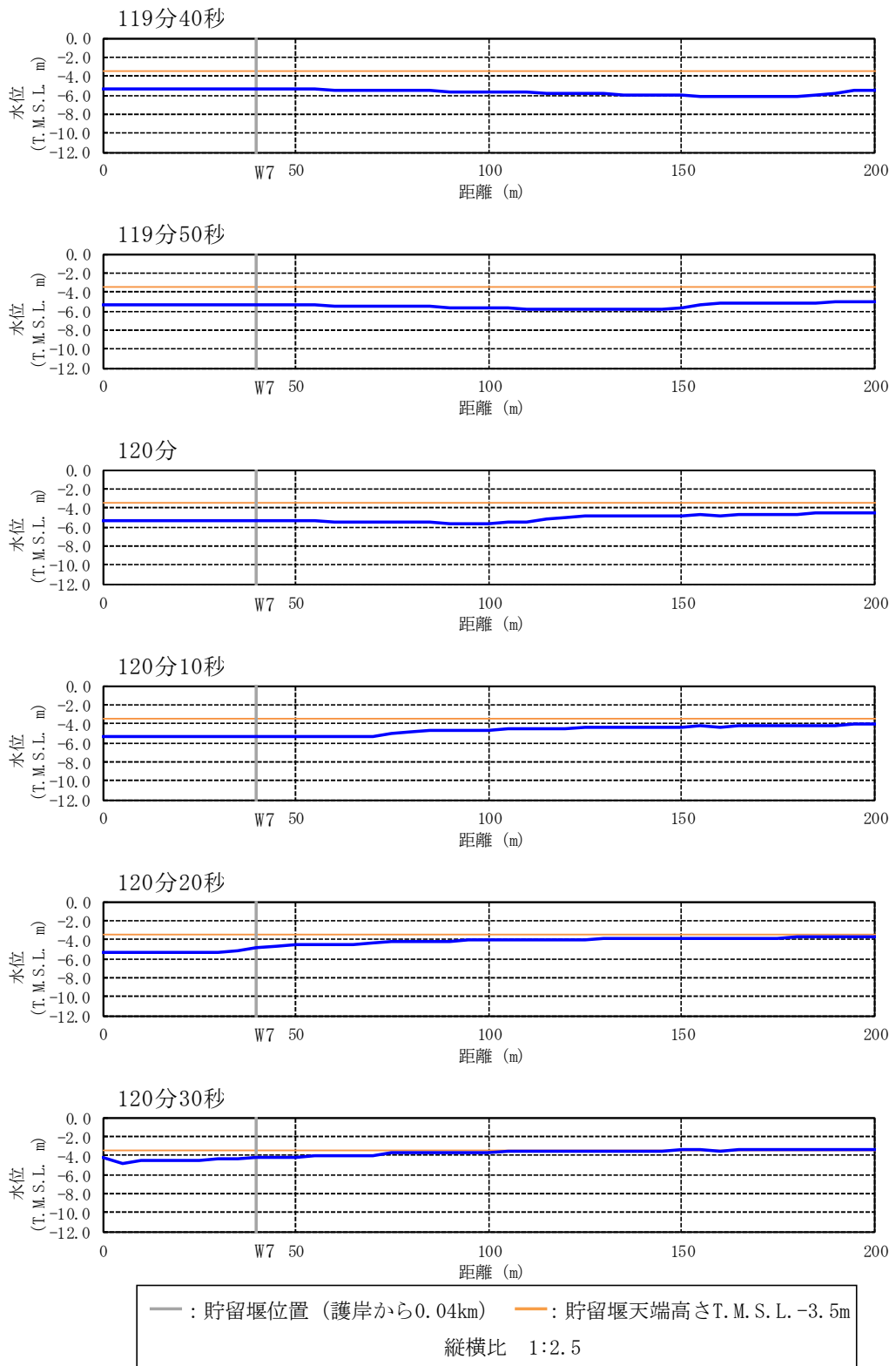


図 4.7 添 1-4.4-21 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2)

[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。

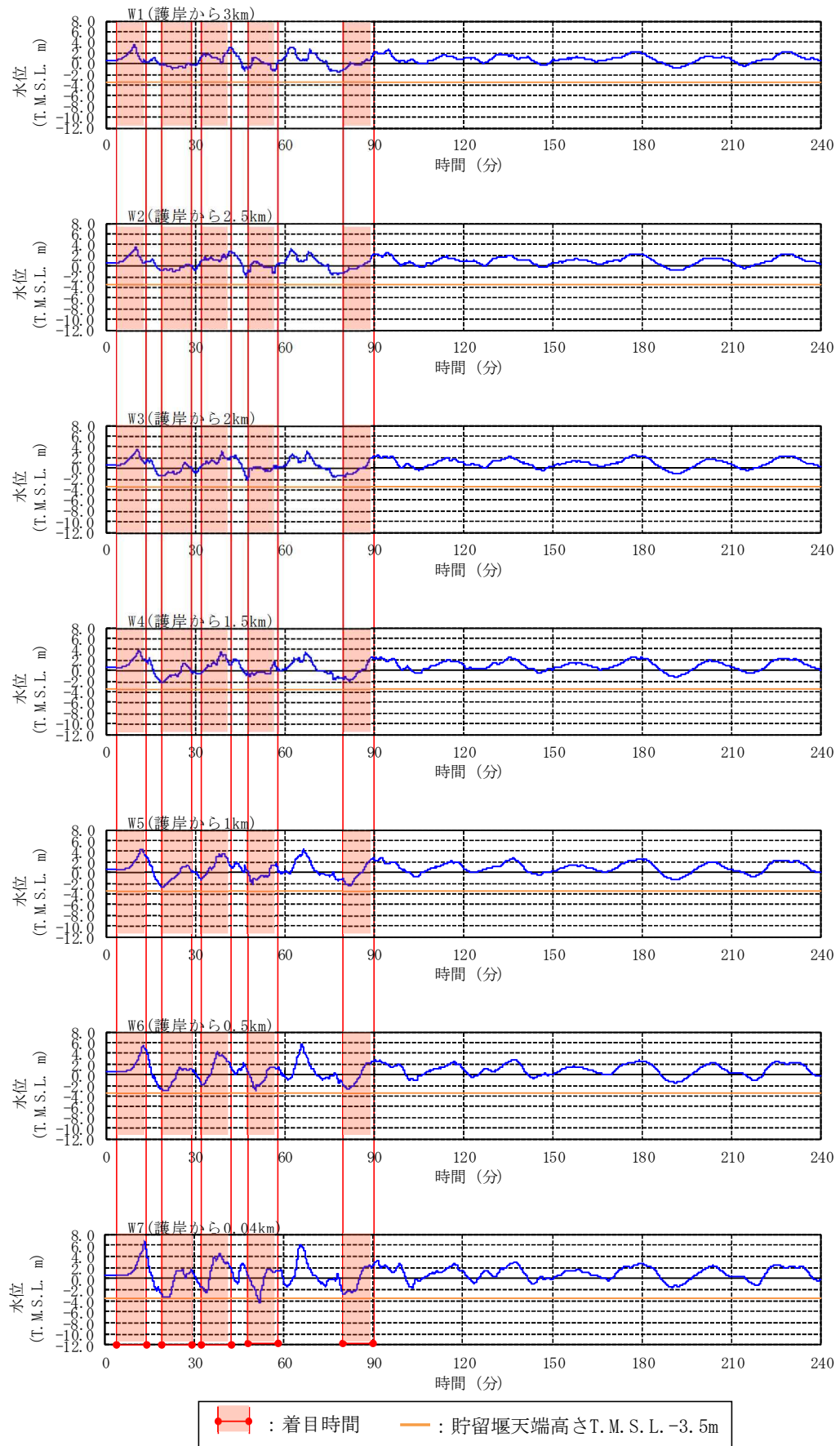


図 4.7 添 1-4.4-22 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [0-240 分]

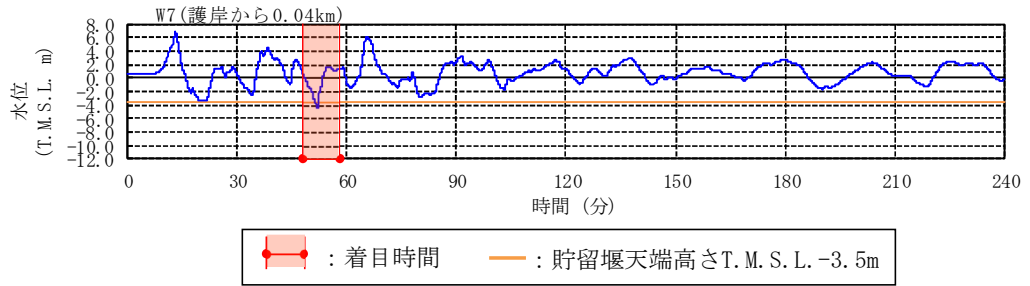


図 4.7 添 1-4.4-23 水位時刻歴波形の着目時間範囲 (基準津波 3)

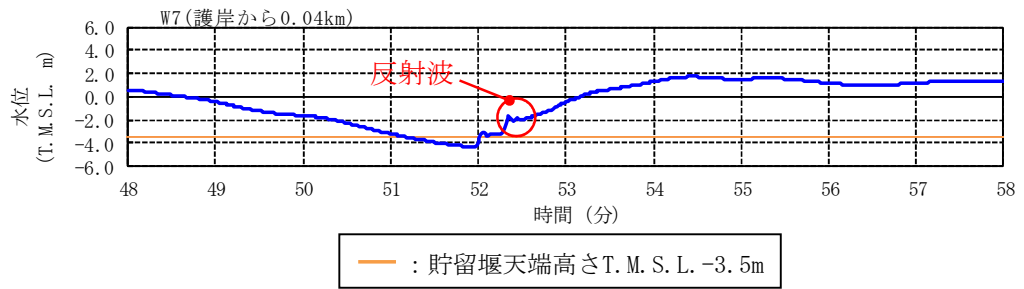


図 4.7 添 1-4.4-24 水位時刻歴波形 (基準津波 3) [48-58 分を拡大]

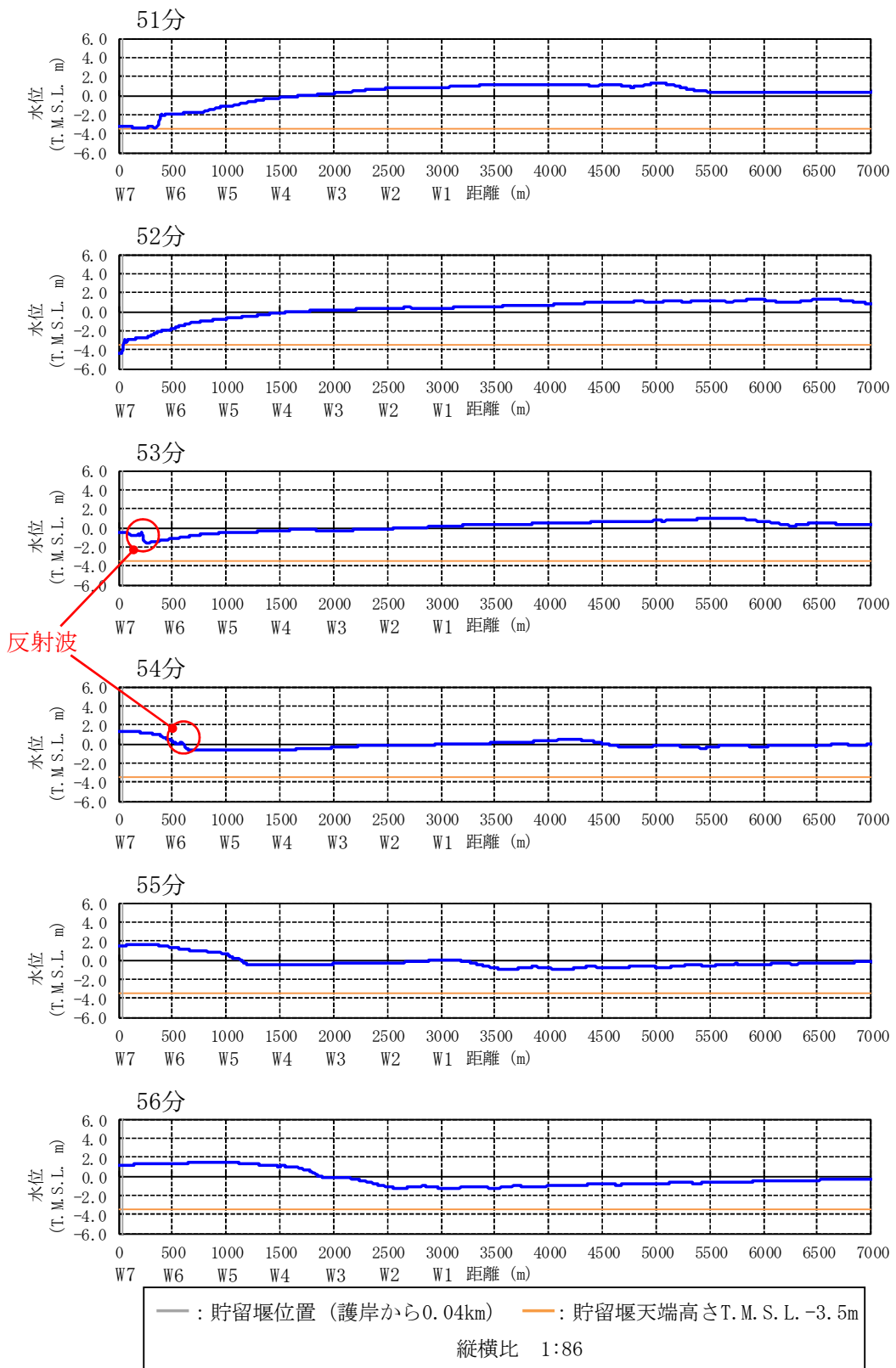


図 4.7 添 1-4.4-25 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分]

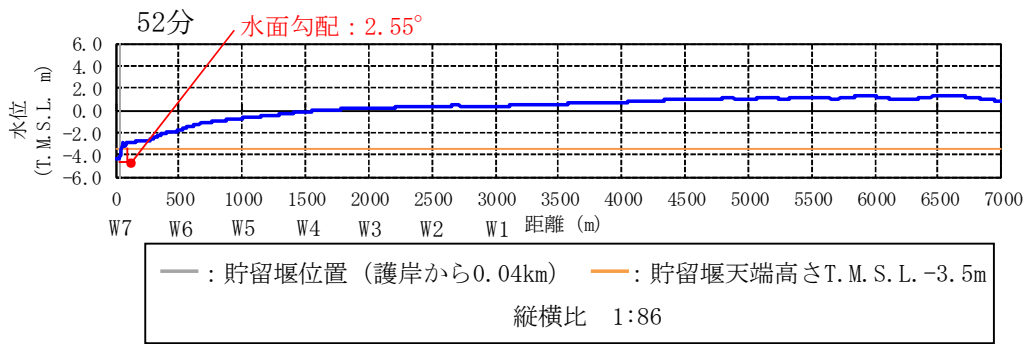


図 4.7 添 1-4.4-26 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 3, 52 分時点)

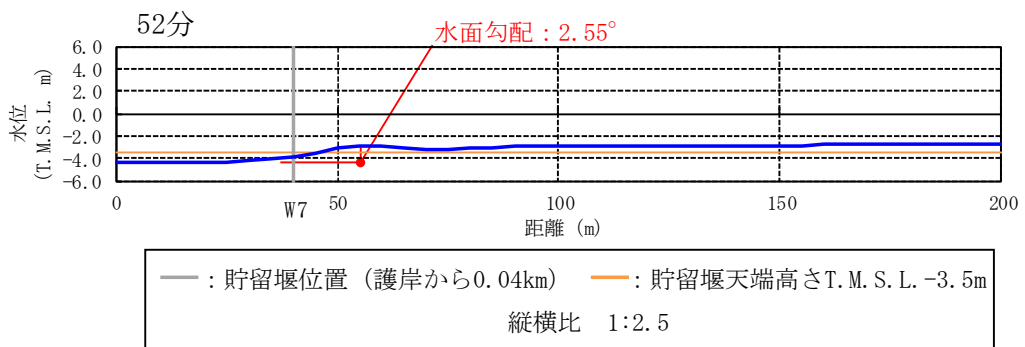


図 4.7 添 1-4.4-27 水位の空間分布 (基準津波 3, 52 分時点) [0-200m を拡大]

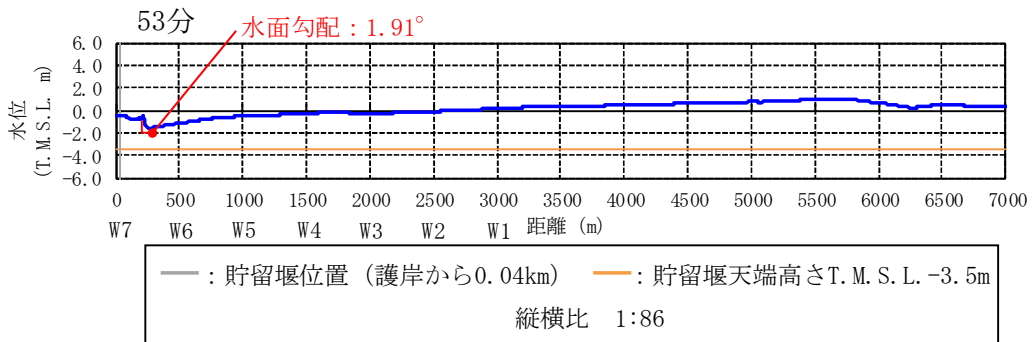


図 4.7 添 1-4.4-28 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 3, 53 分時点)

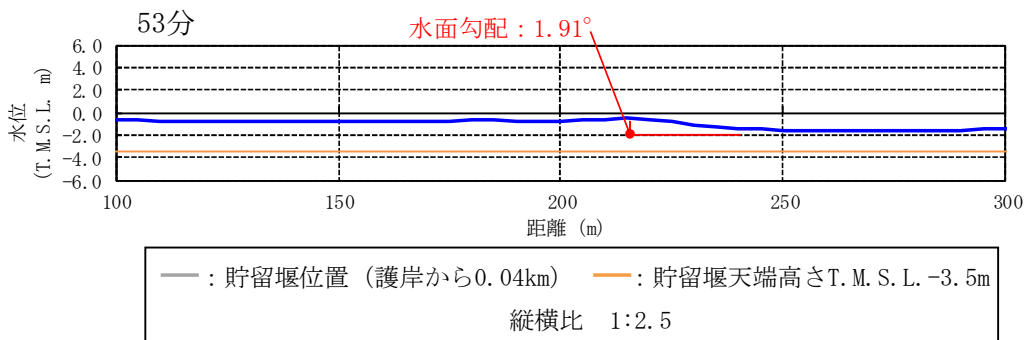


図 4.7 添 1-4.4-29 水位の空間分布 (基準津波 3, 53 分時点) [100-300m を拡大]

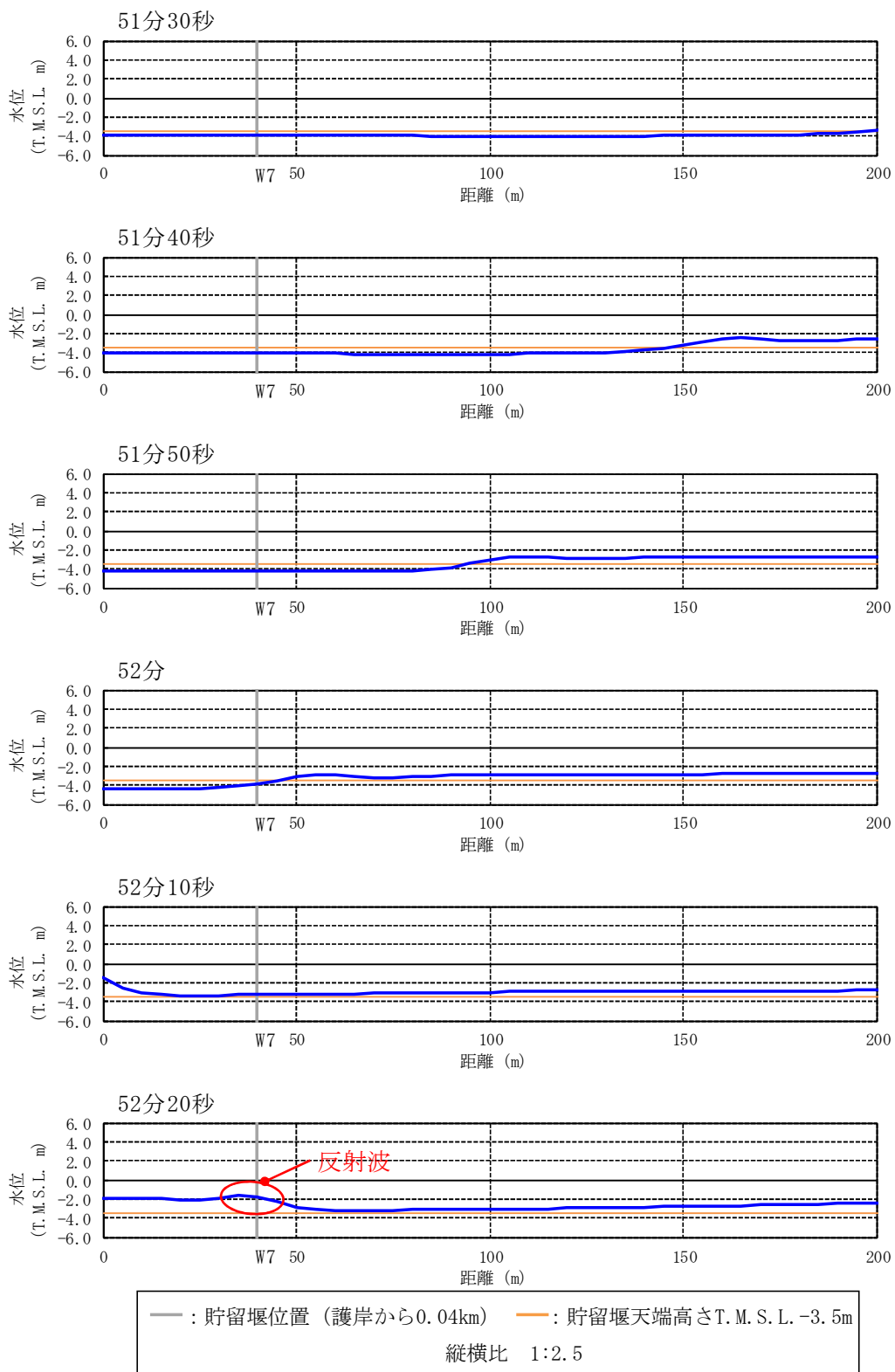


図 4.7 添 1-4.4-30 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3)

[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巻，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巻，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巻，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

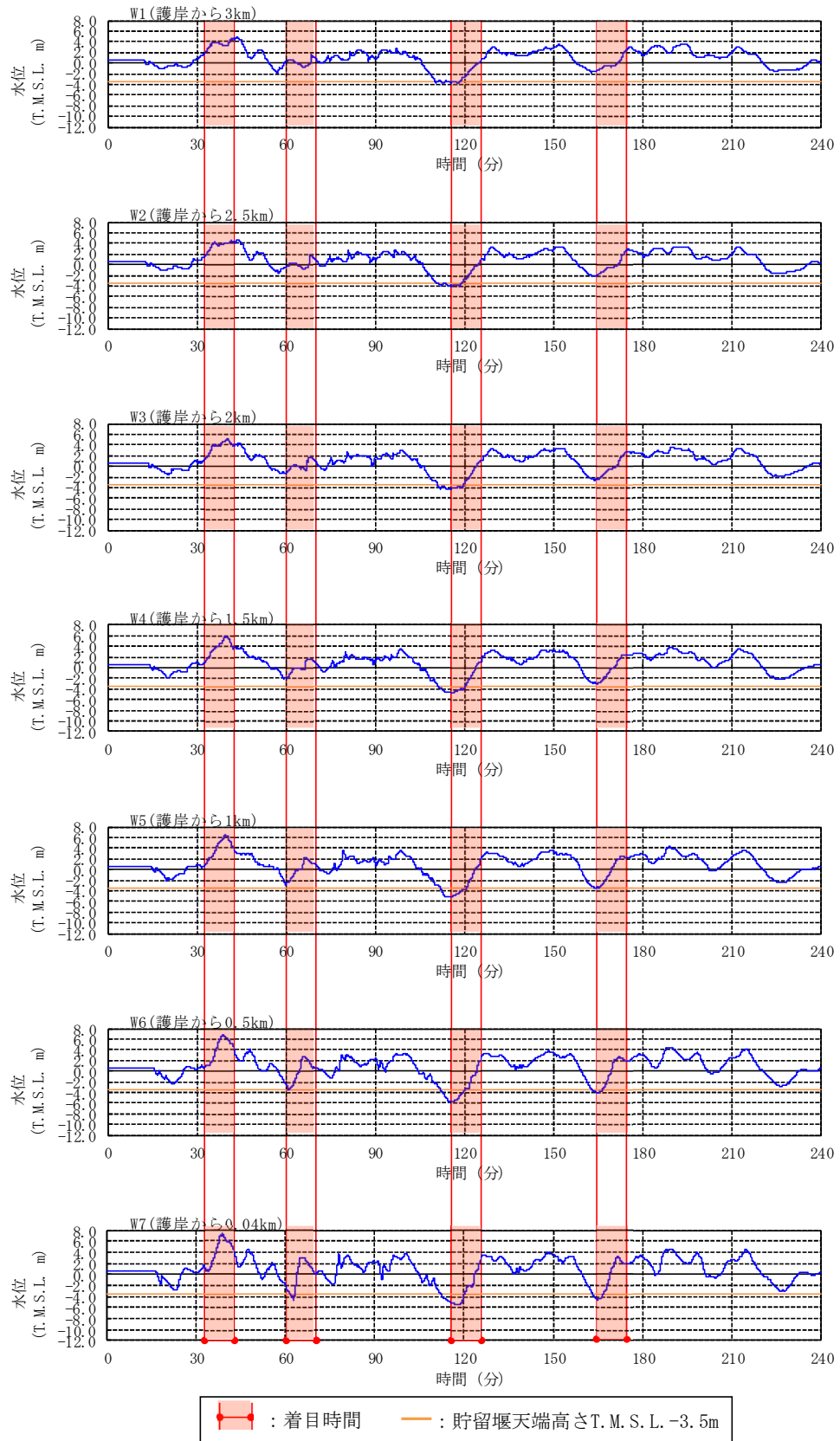


図 4.7 参 1-1 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [0-240 分]

b. 水位時刻歴波形(着目時間の拡大)

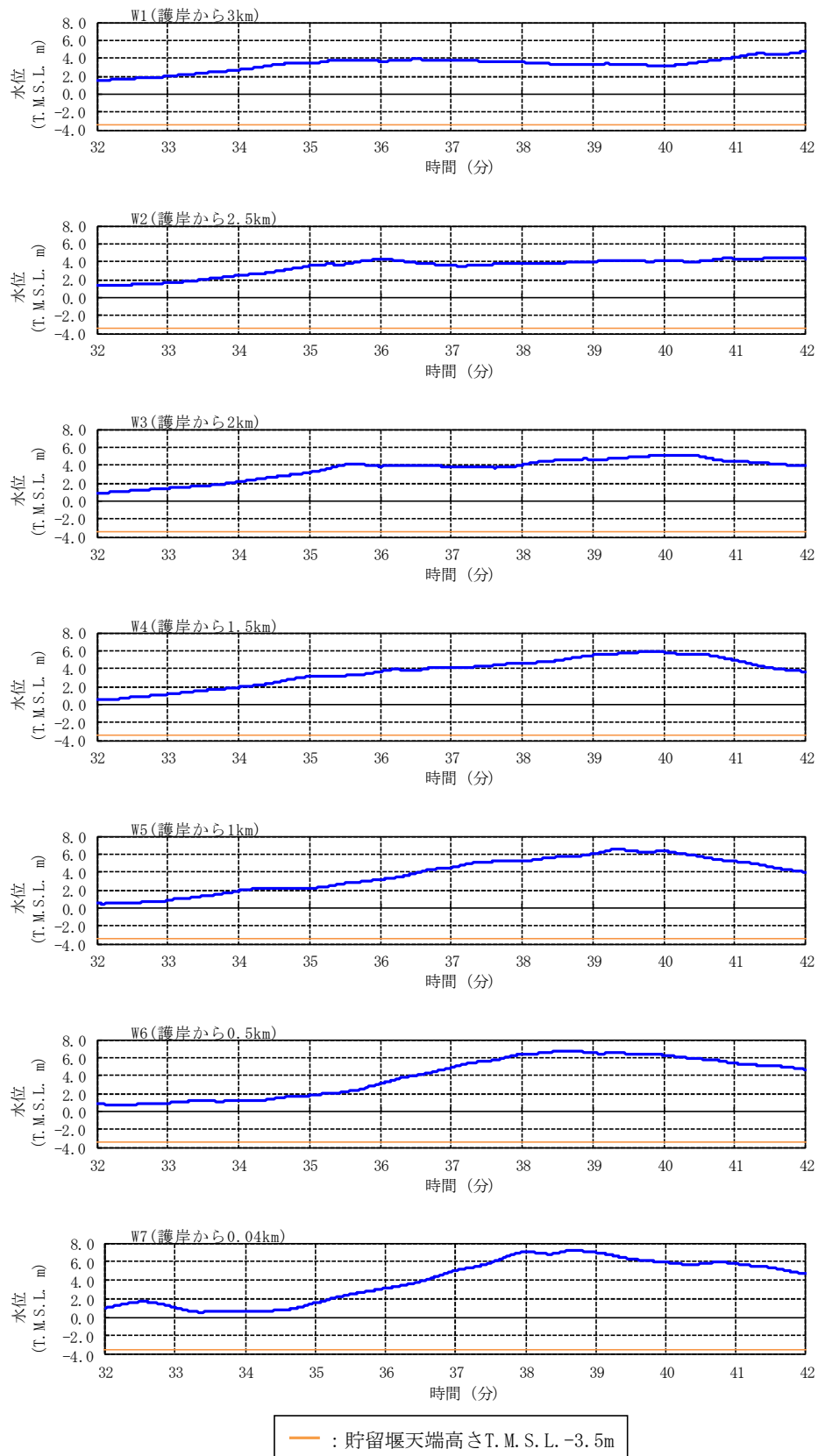


図 4.7 参 1-2 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [32-42 分を拡大]

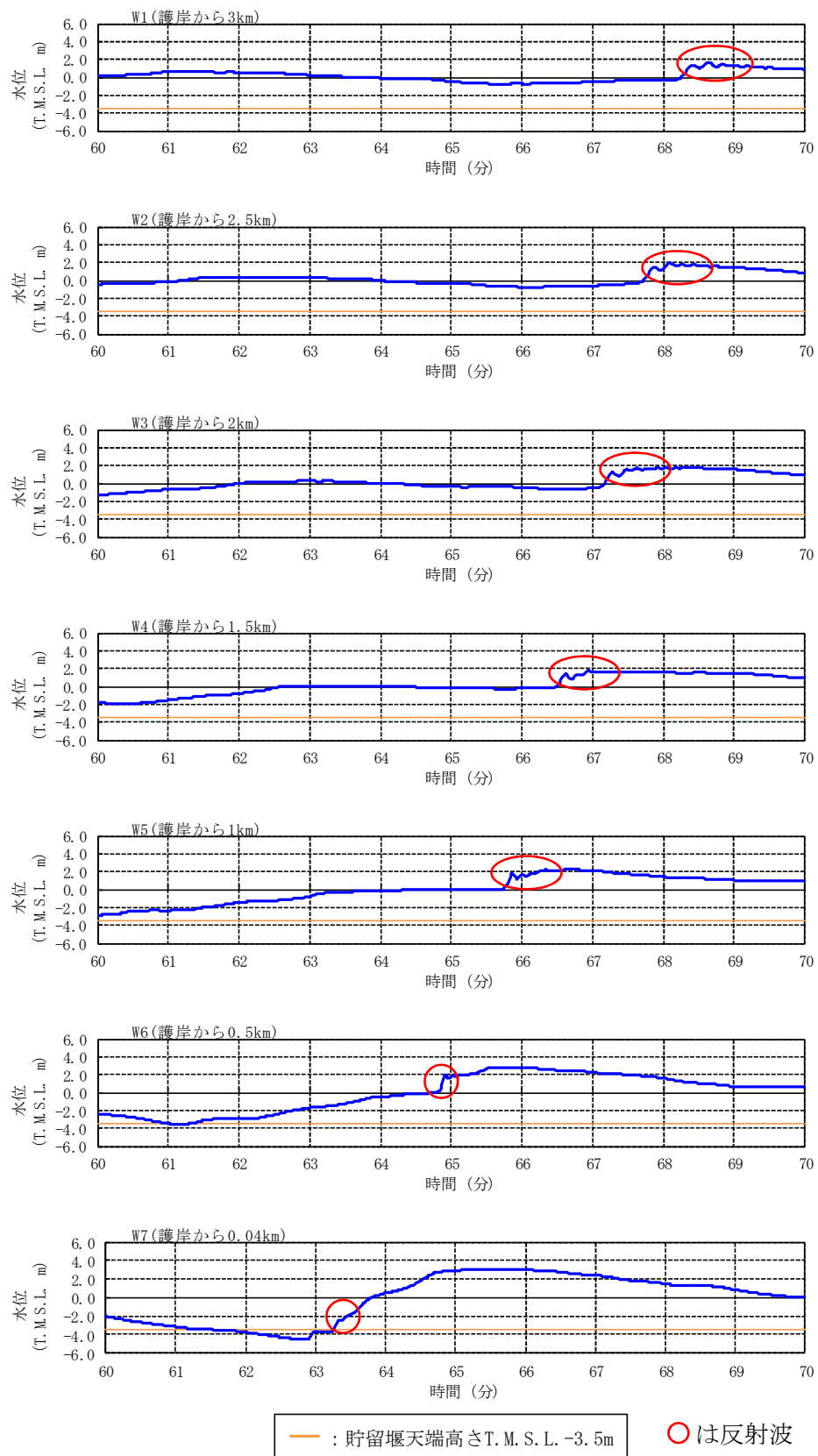


図 4.7 参 1-3 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [60-70 分を拡大]

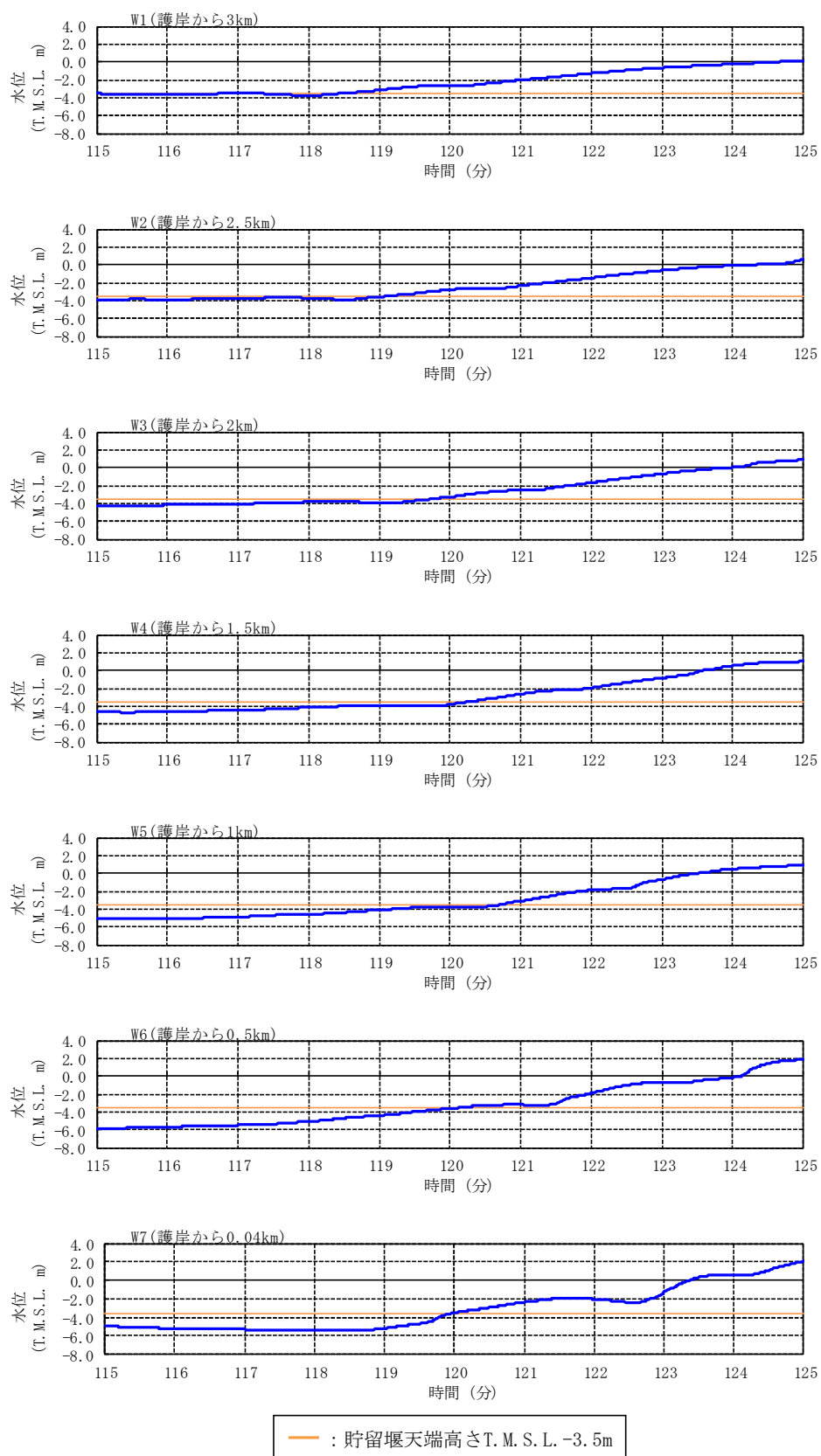


図 4.7 参 1-4 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [115-125 分を拡大]

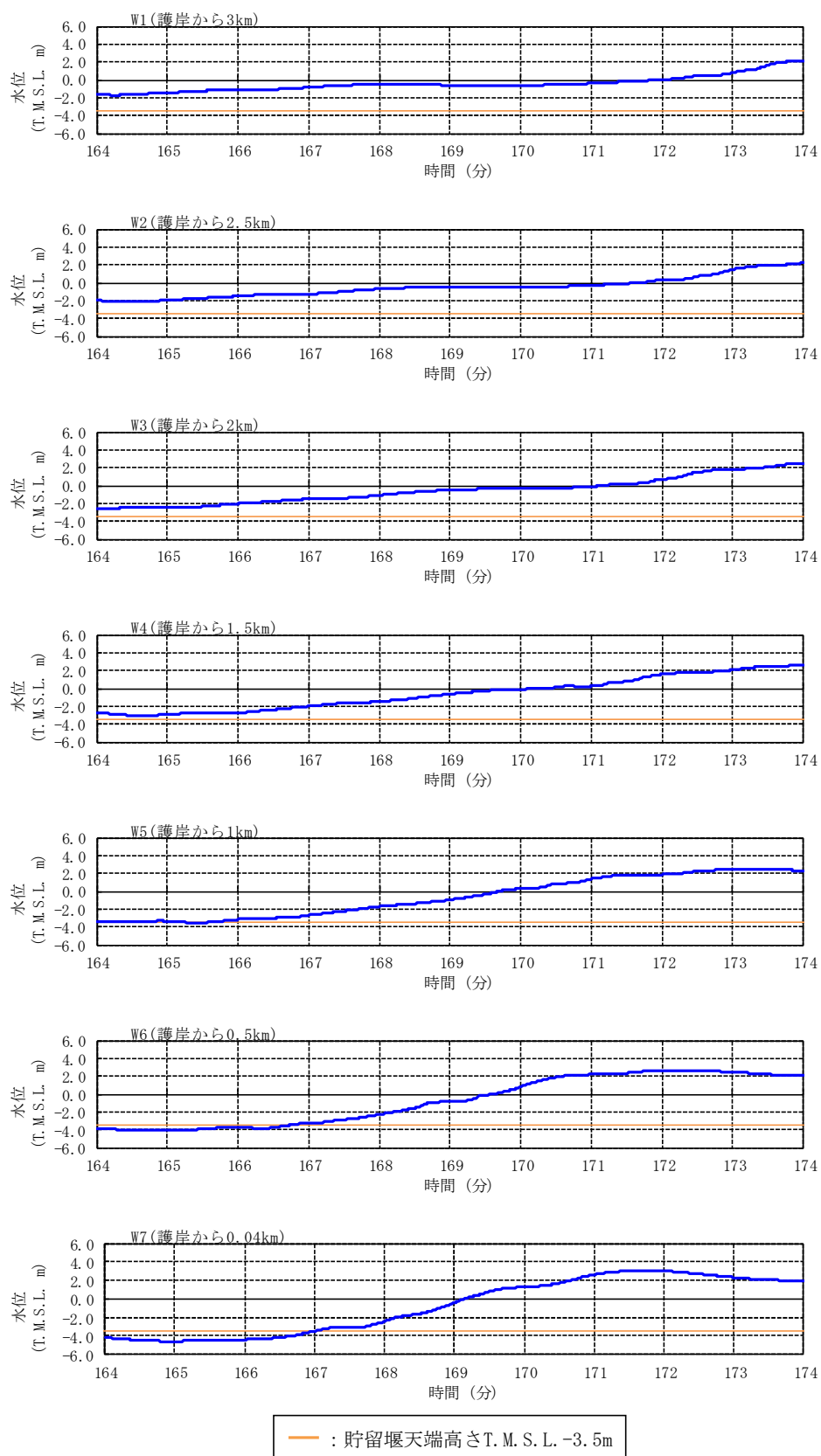


図 4.7 参 1-5 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [164-174 分を拡大]

c. 着目時間別の水位の空間分布
 (1) 全景

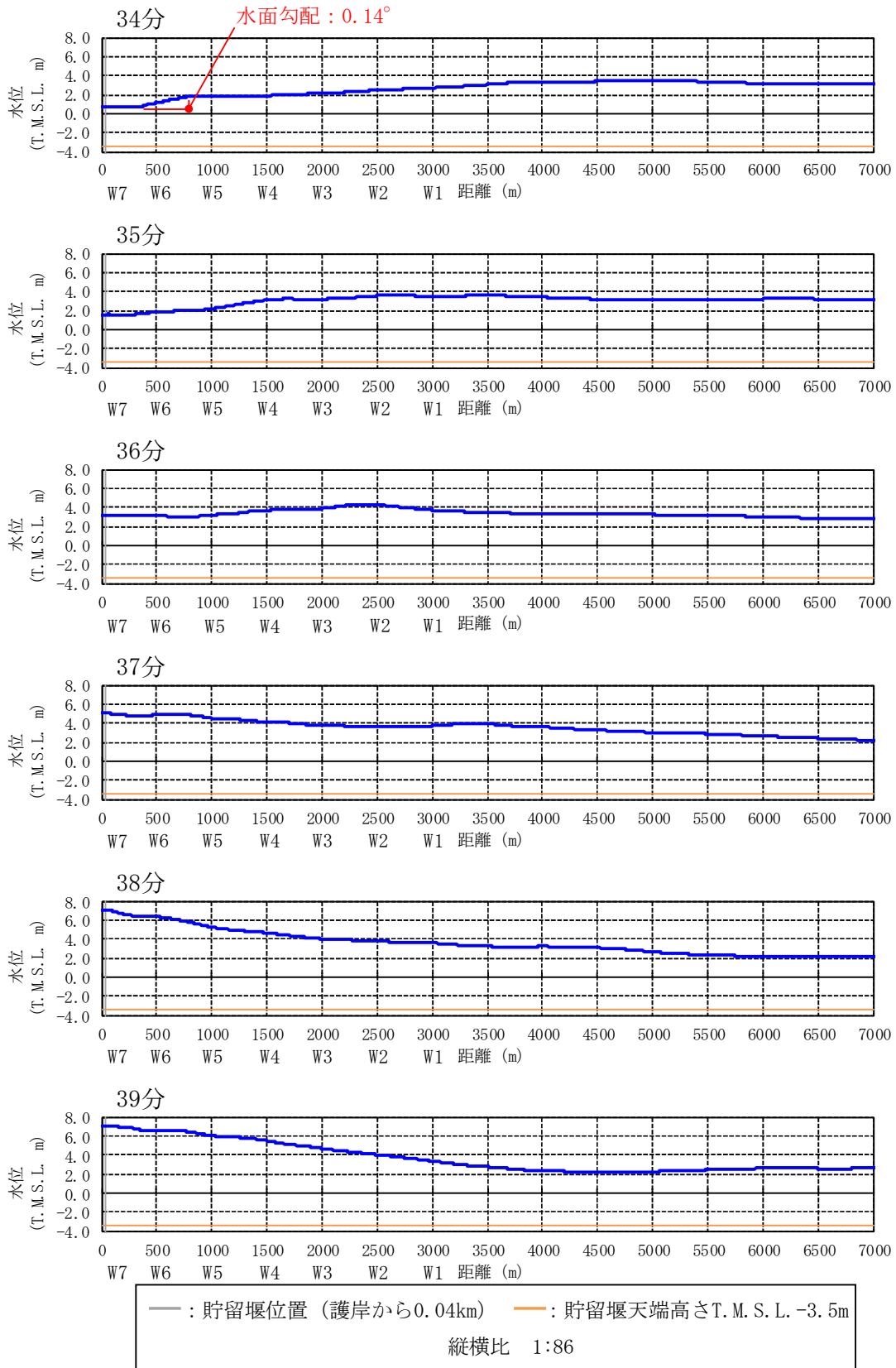


図 4.7 参 1-6 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [34-39 分]

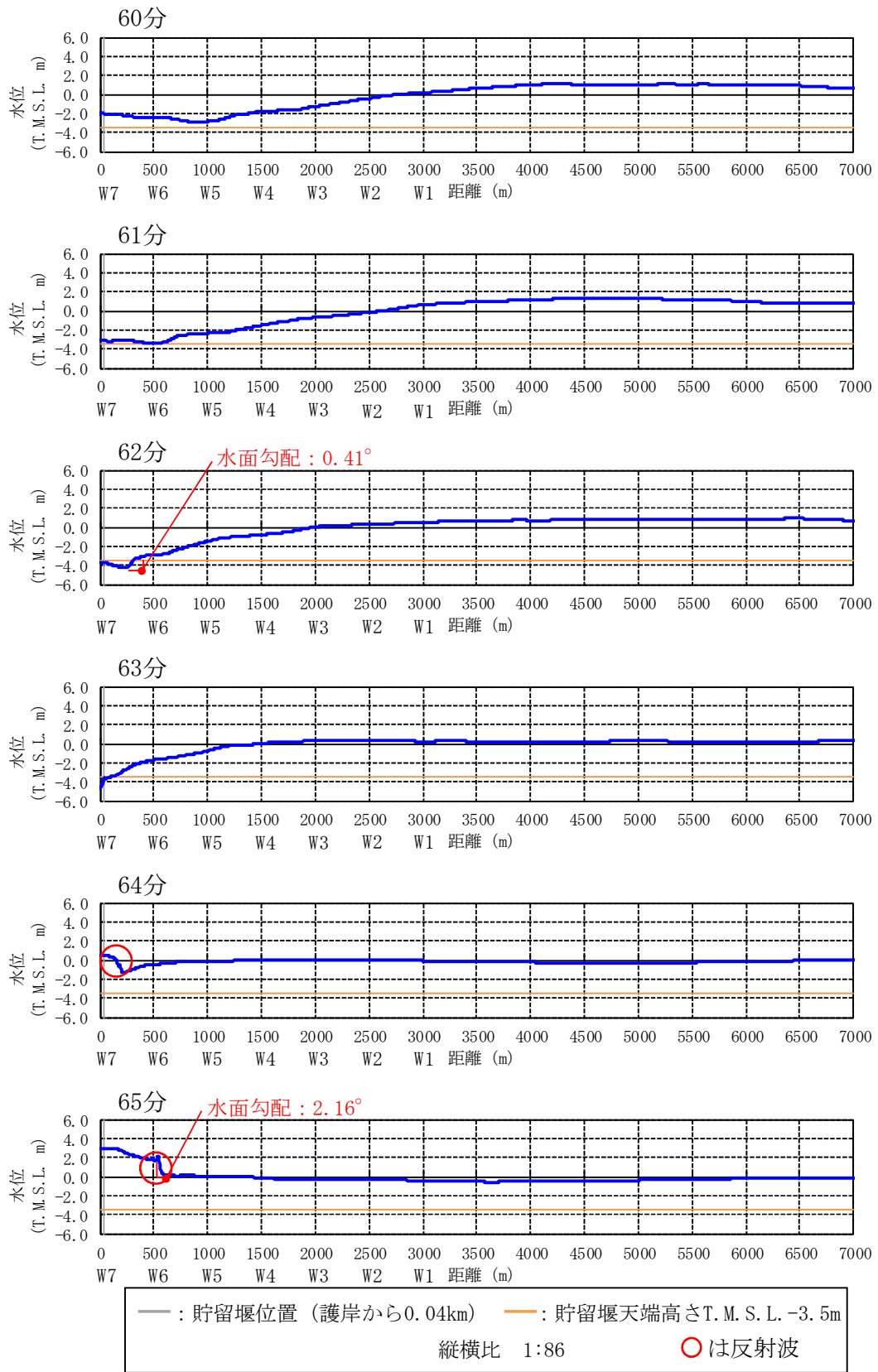


図 4.7 参 1-7 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [60-65 分]

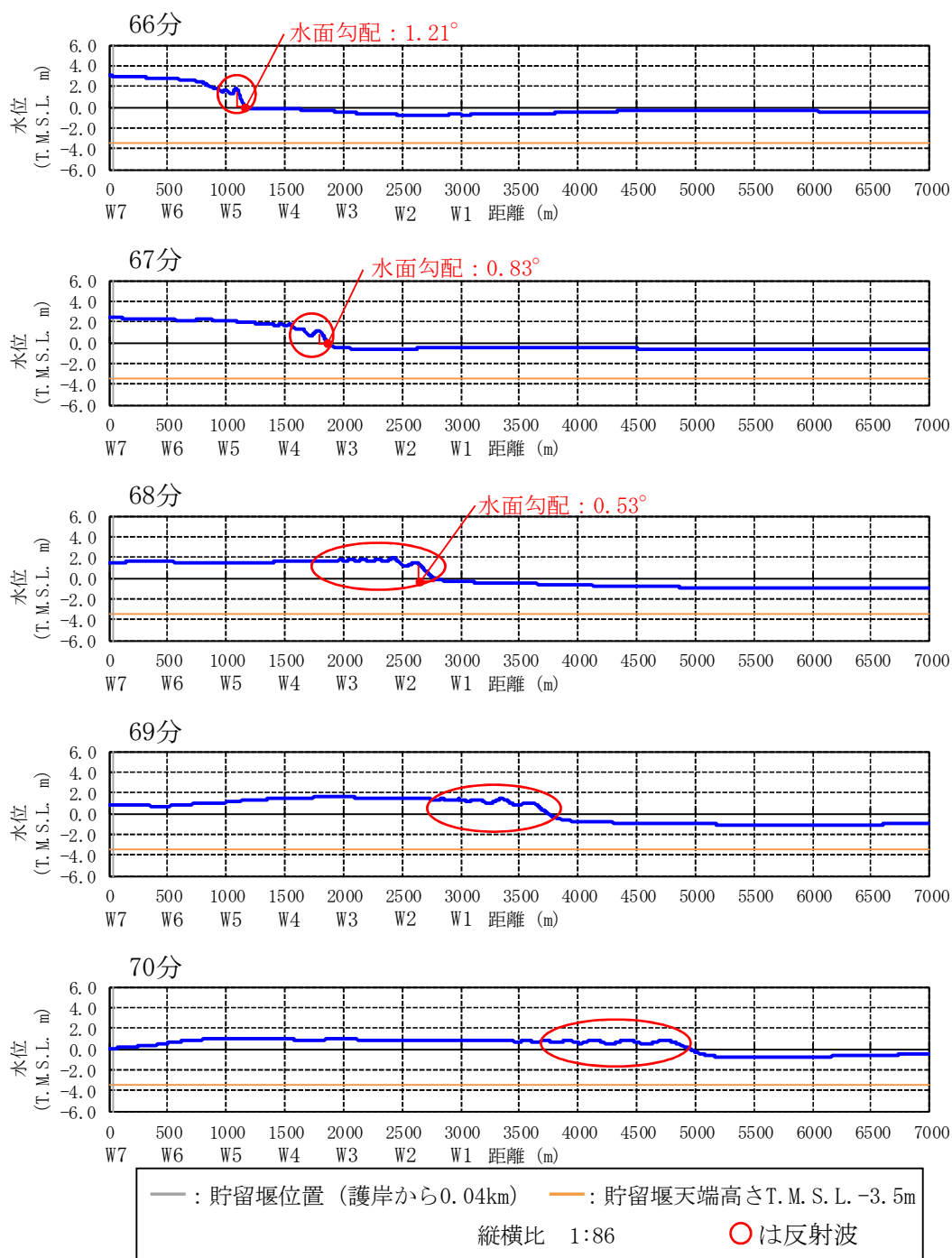


図 4.7 参 1-8 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [66-70 分]

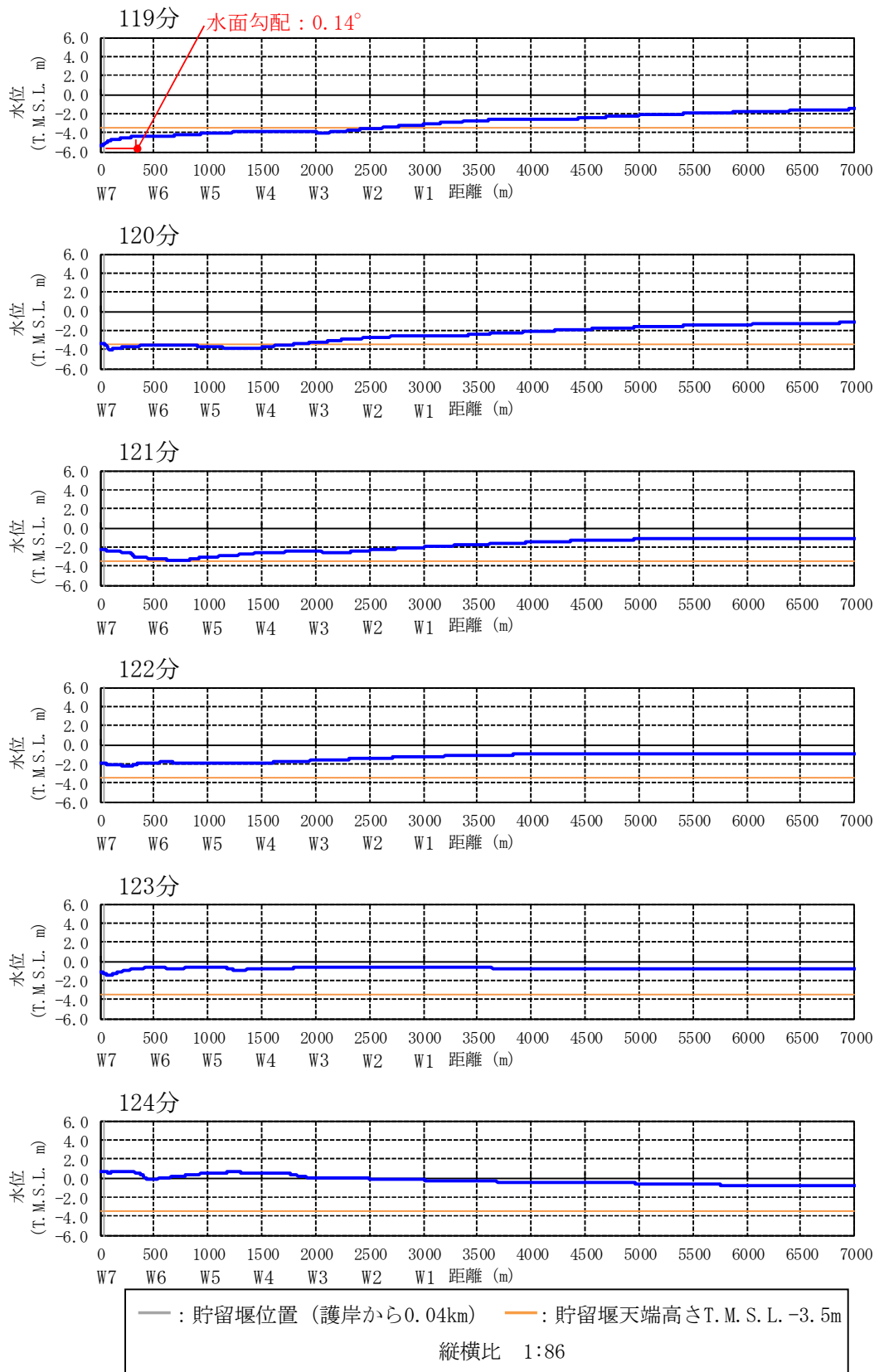


図 4.7 参 1-9 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [119-124 分]

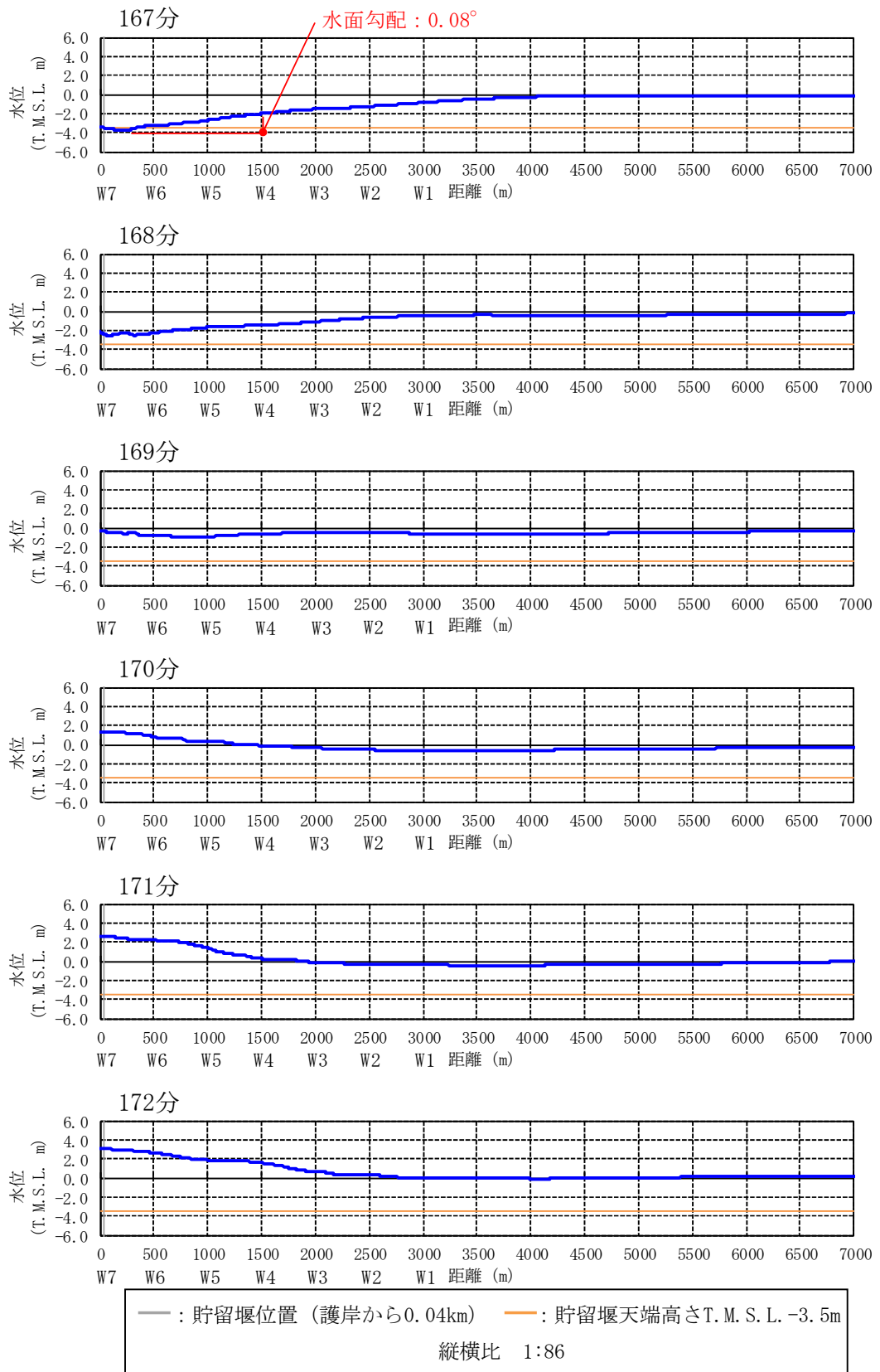


図 4.7 参 1-10 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [167-172 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

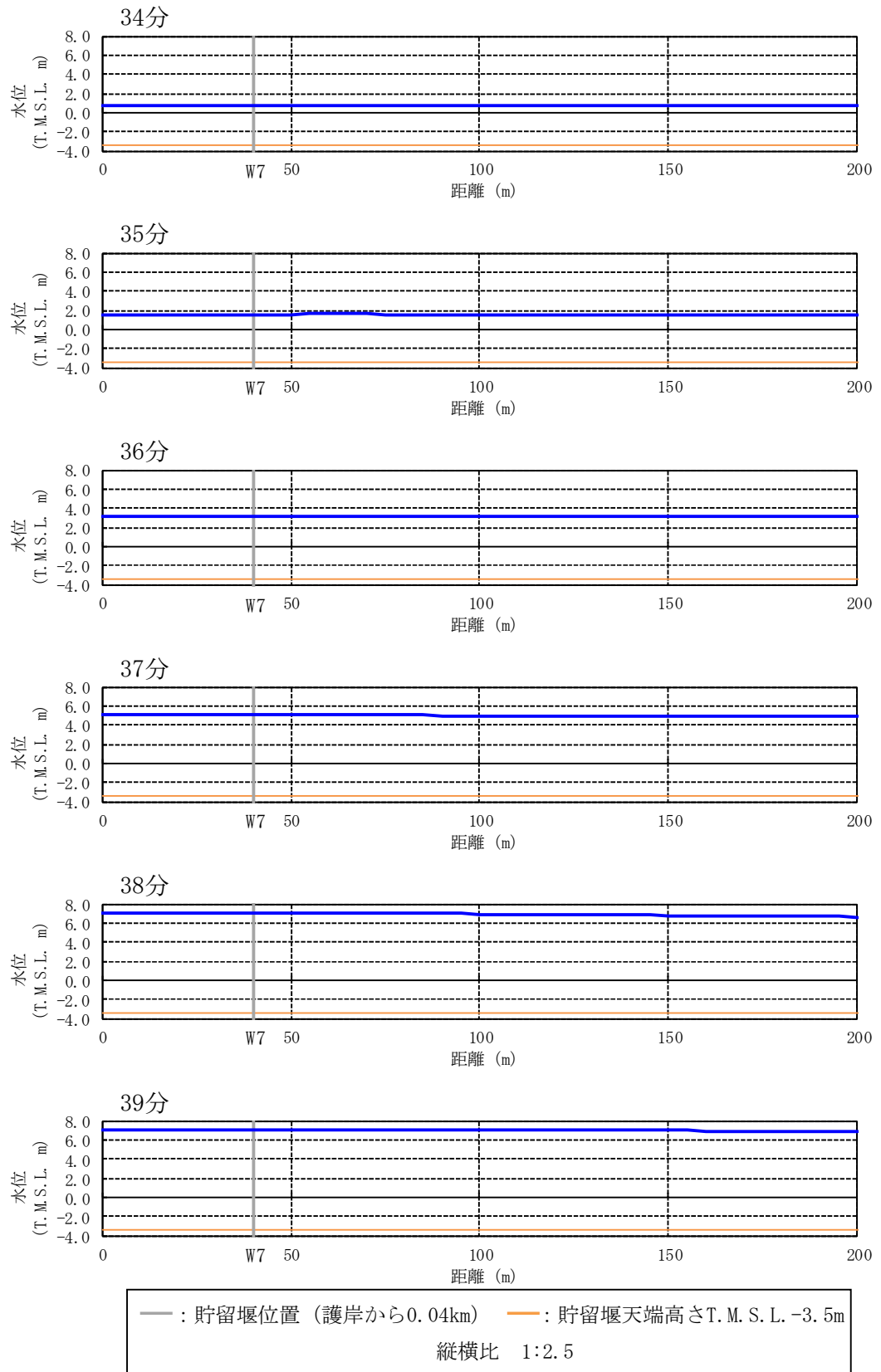


図 4.7 参 1-11 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [34-39 分, 0-200m を拡大]

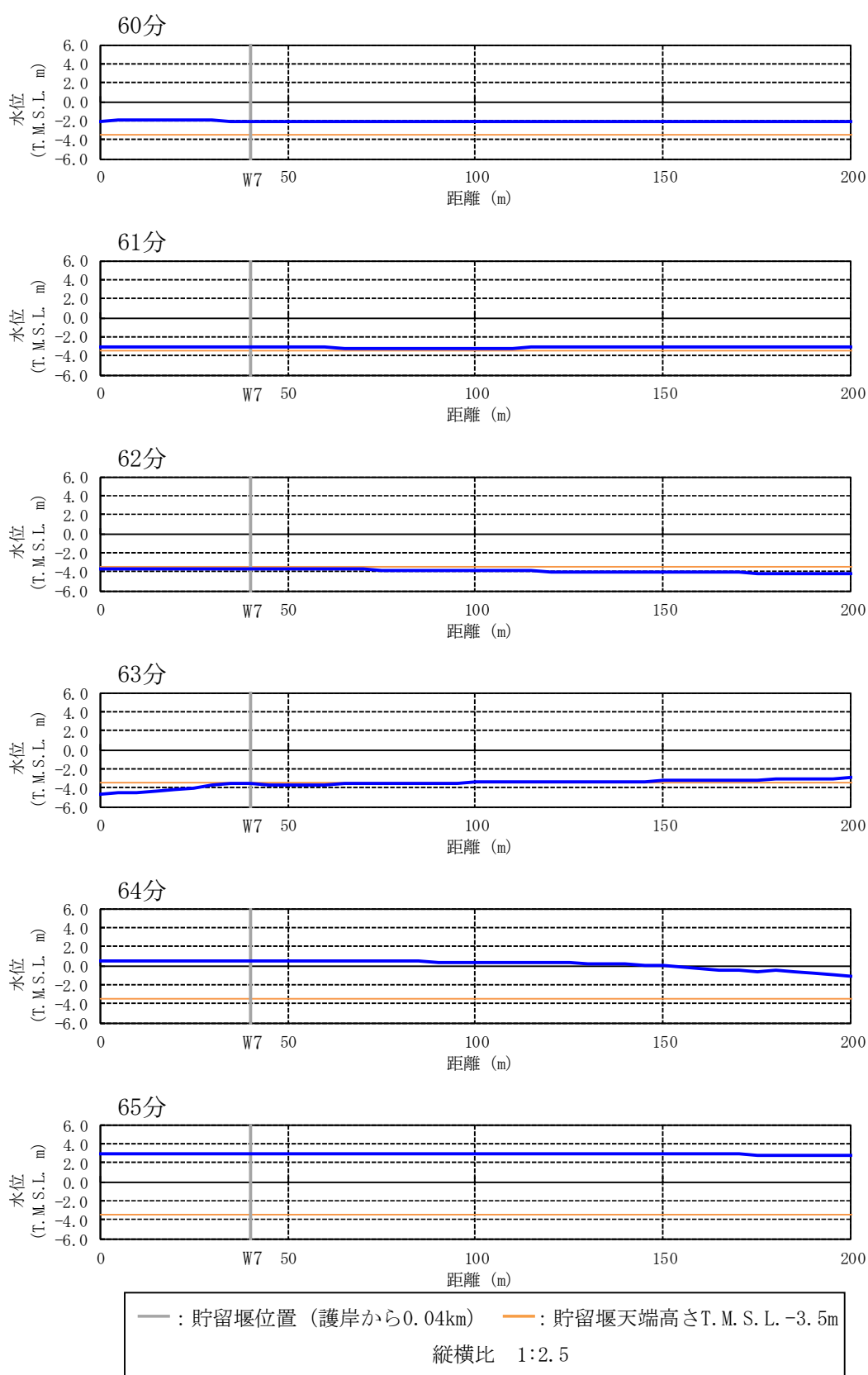


図 4.7 参 1-12 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [60-65 分, 0-200m を拡大]

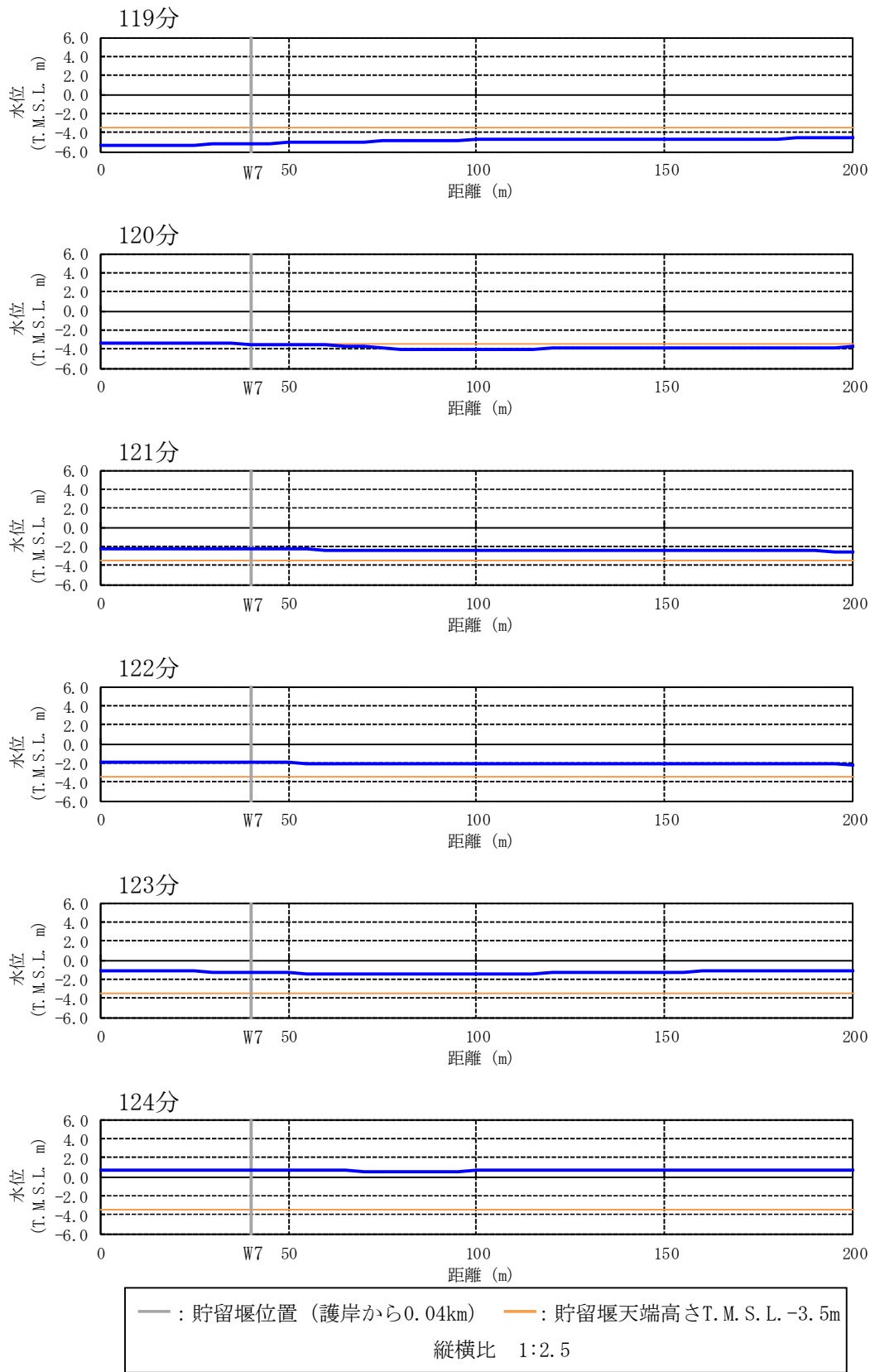


図 4.7 参 1-13 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [119-124 分, 0-200m を拡大]

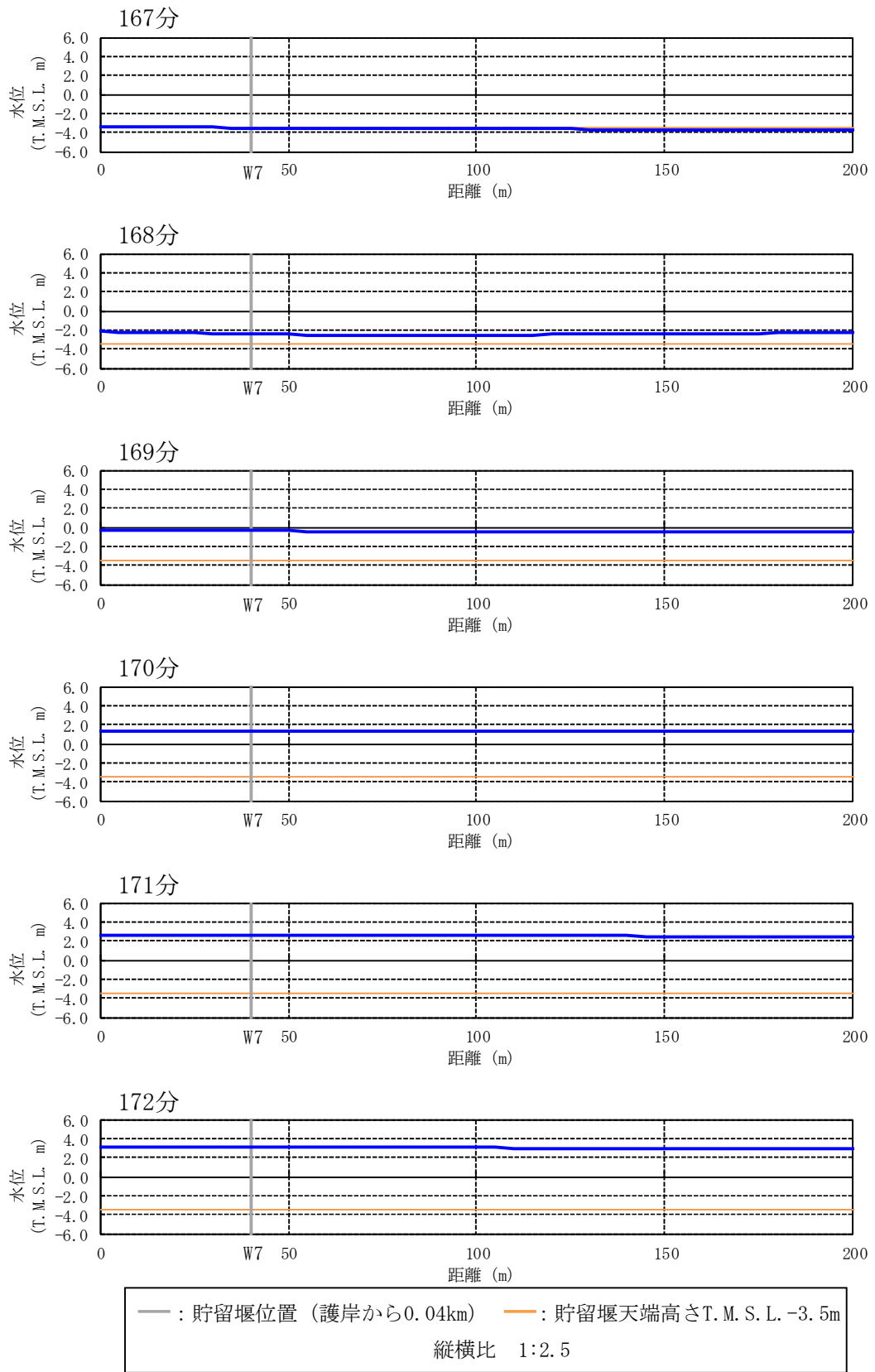


図 4.7 参 1-14 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [167-172 分, 0-200m を拡大]

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

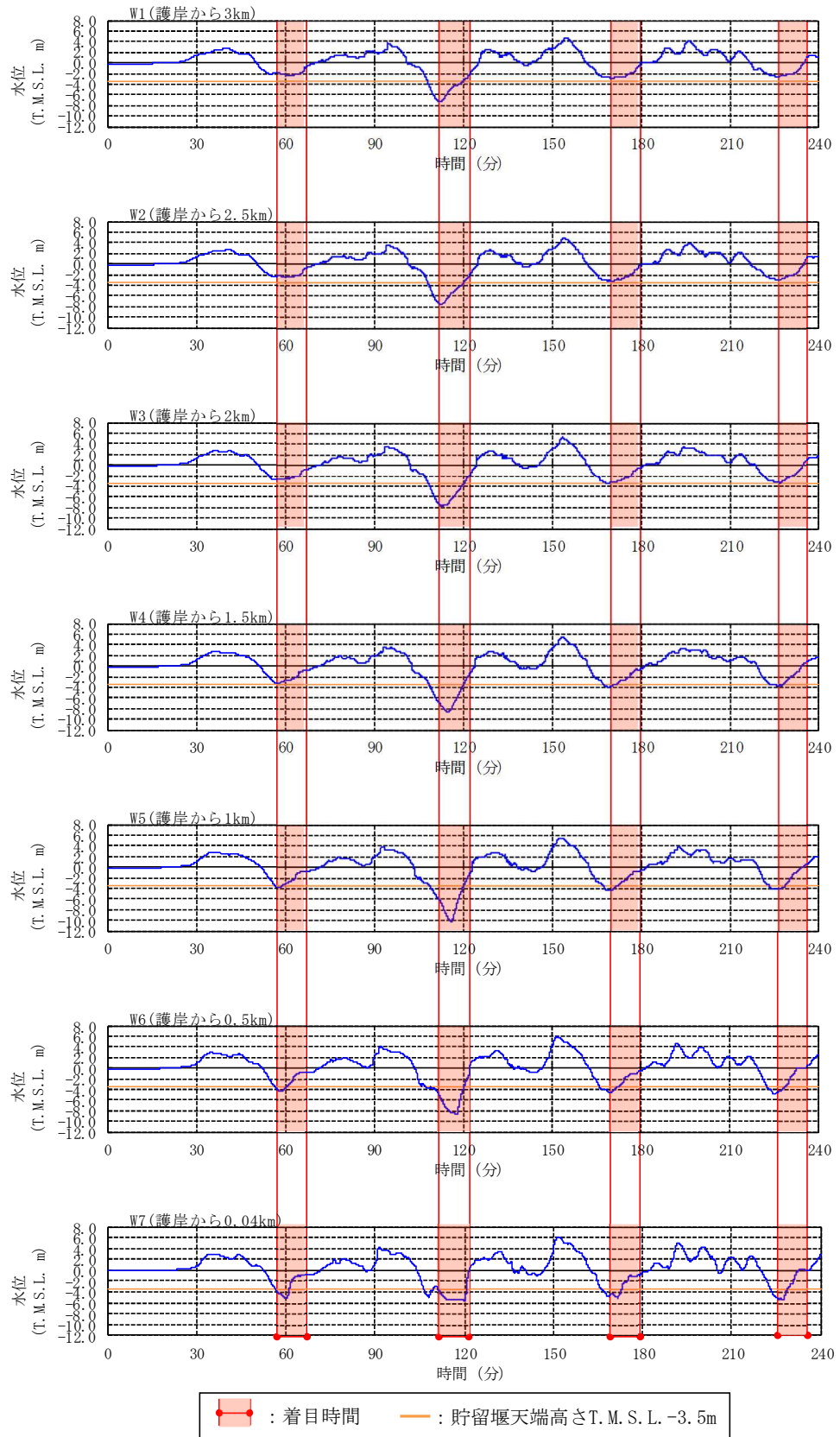


図 4.7 参 1-15 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [0-240 分]

b. 水位時刻歴波形(着目時間の拡大)

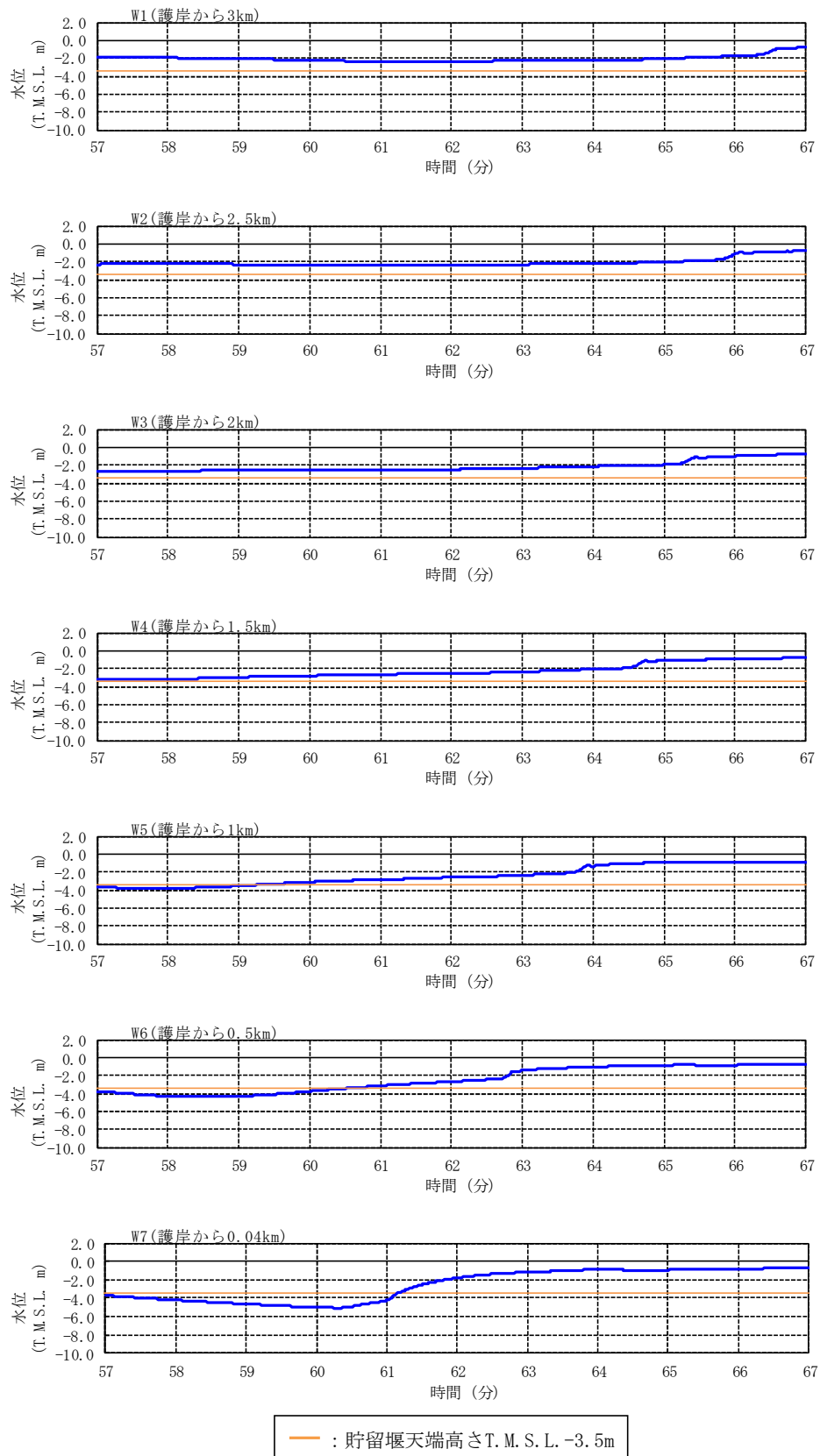


図 4.7 参 1-16 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [57-67 分を拡大]

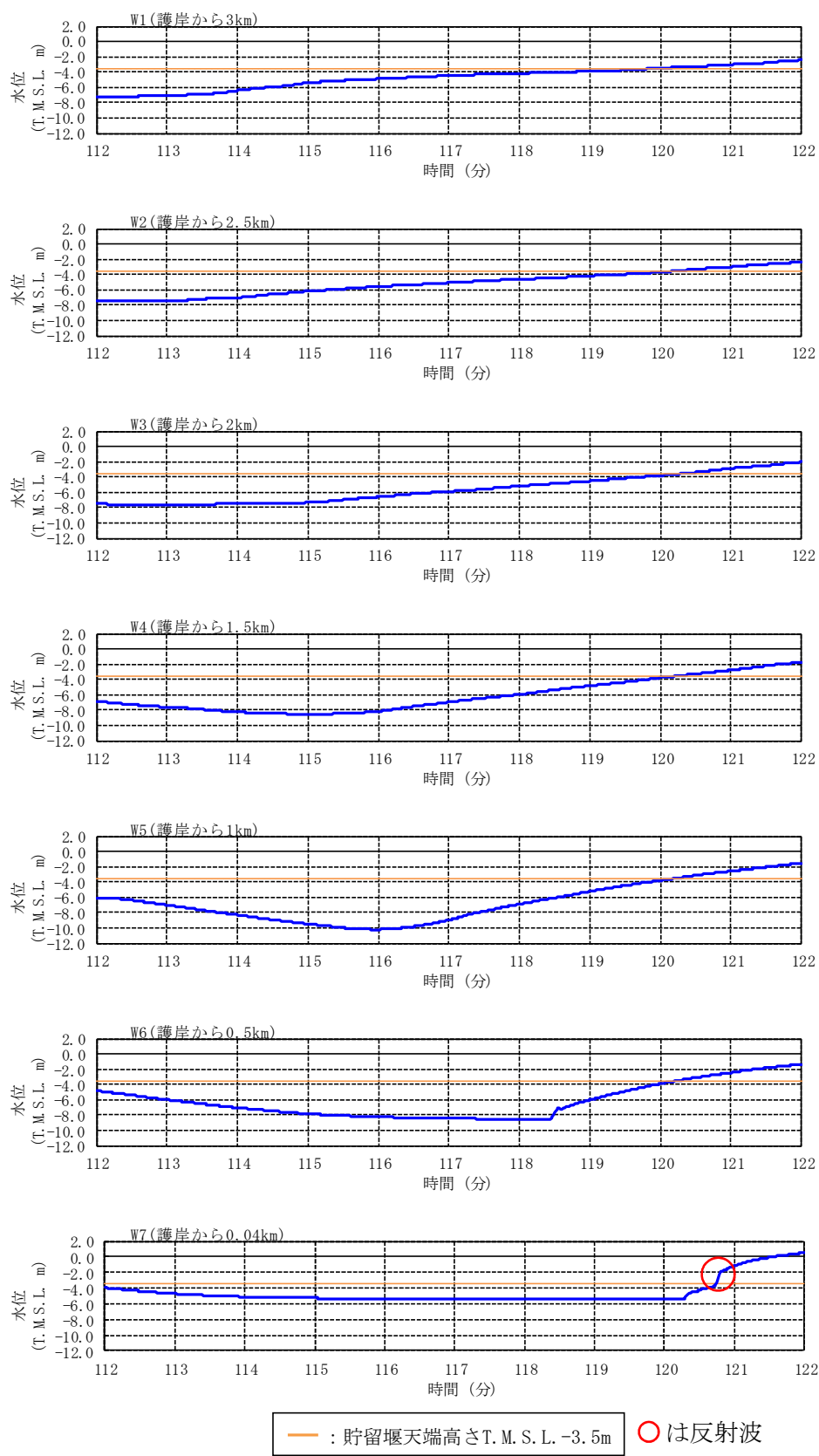


図 4.7 参 1-17 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [112-122 分を拡大]

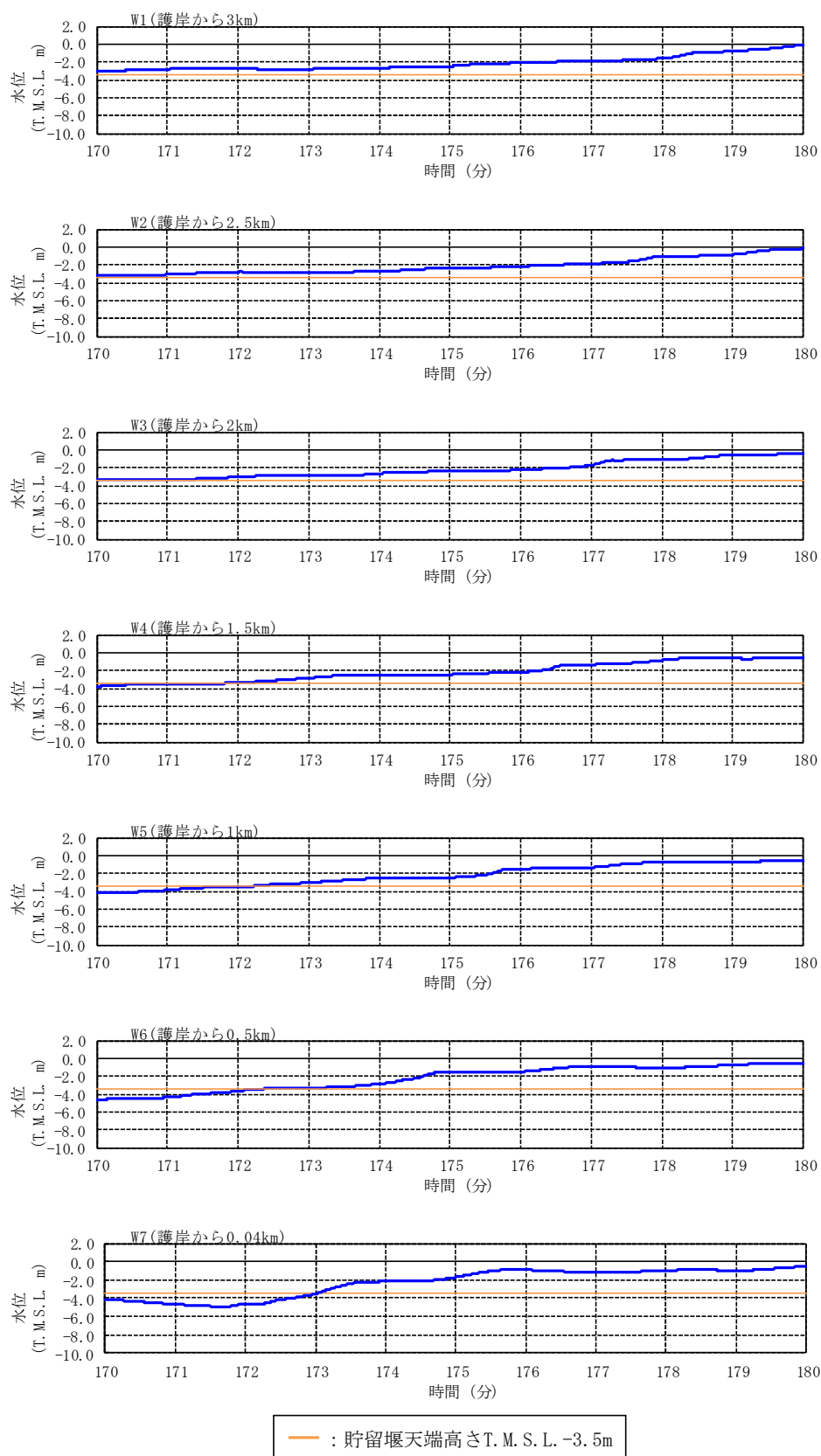


図 4.7 参 1-18 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [170-180 分を拡大]

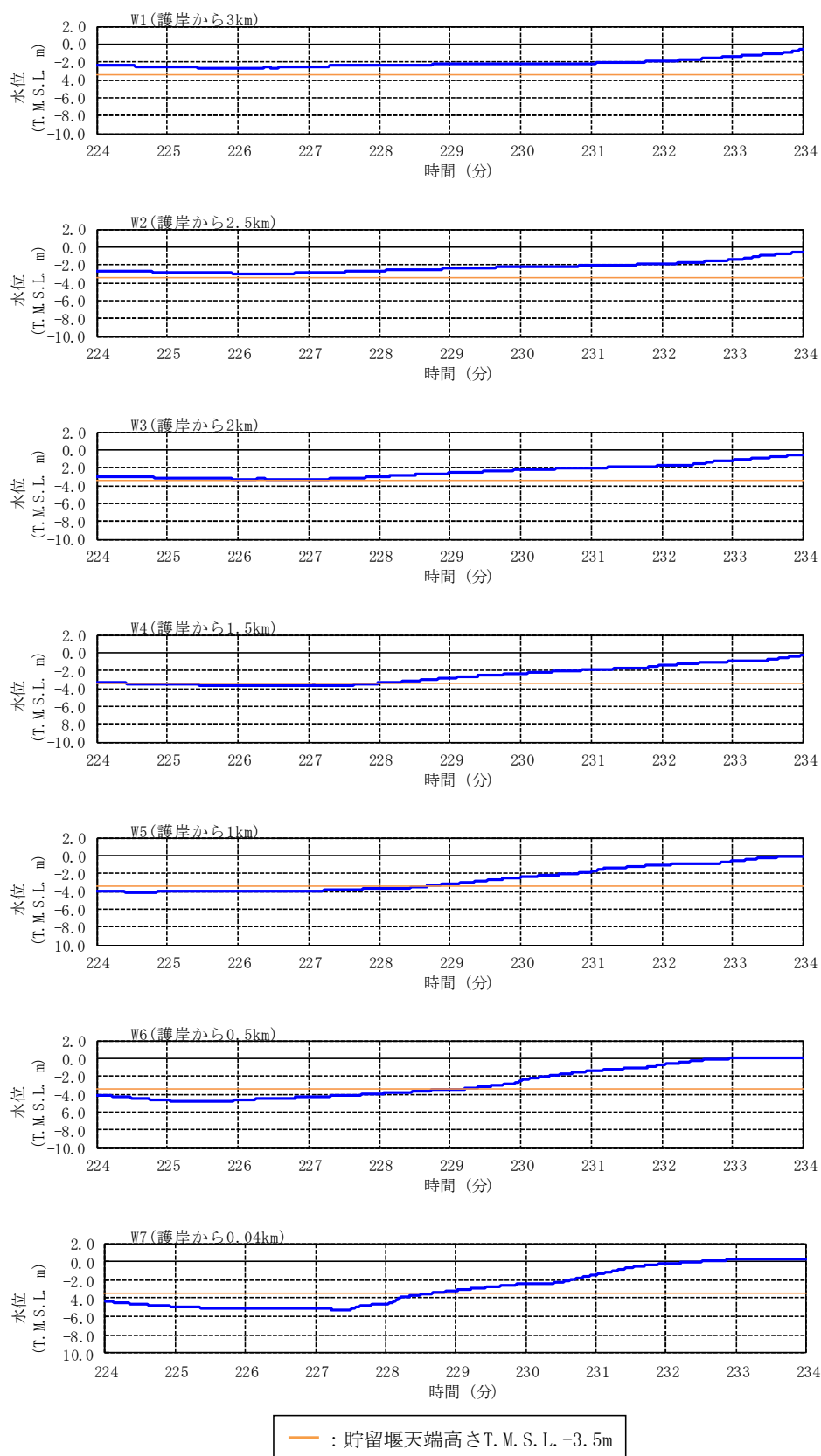


図 4.7 参 1-19 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [224-234 分を拡大]

c. 着目時間別の水位の空間分布
 (1) 全景

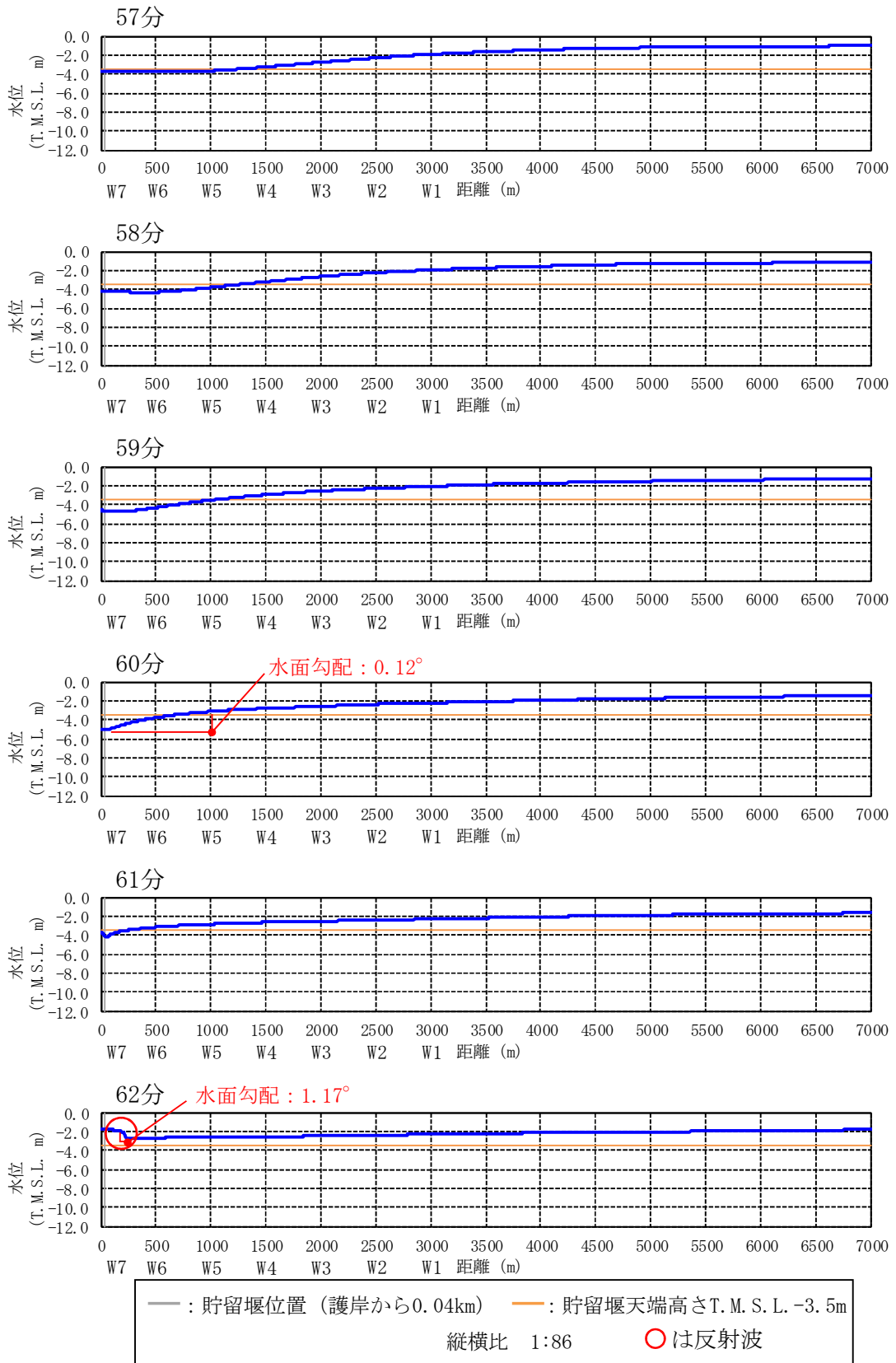


図 4.7 参 1-20 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [57-62 分]

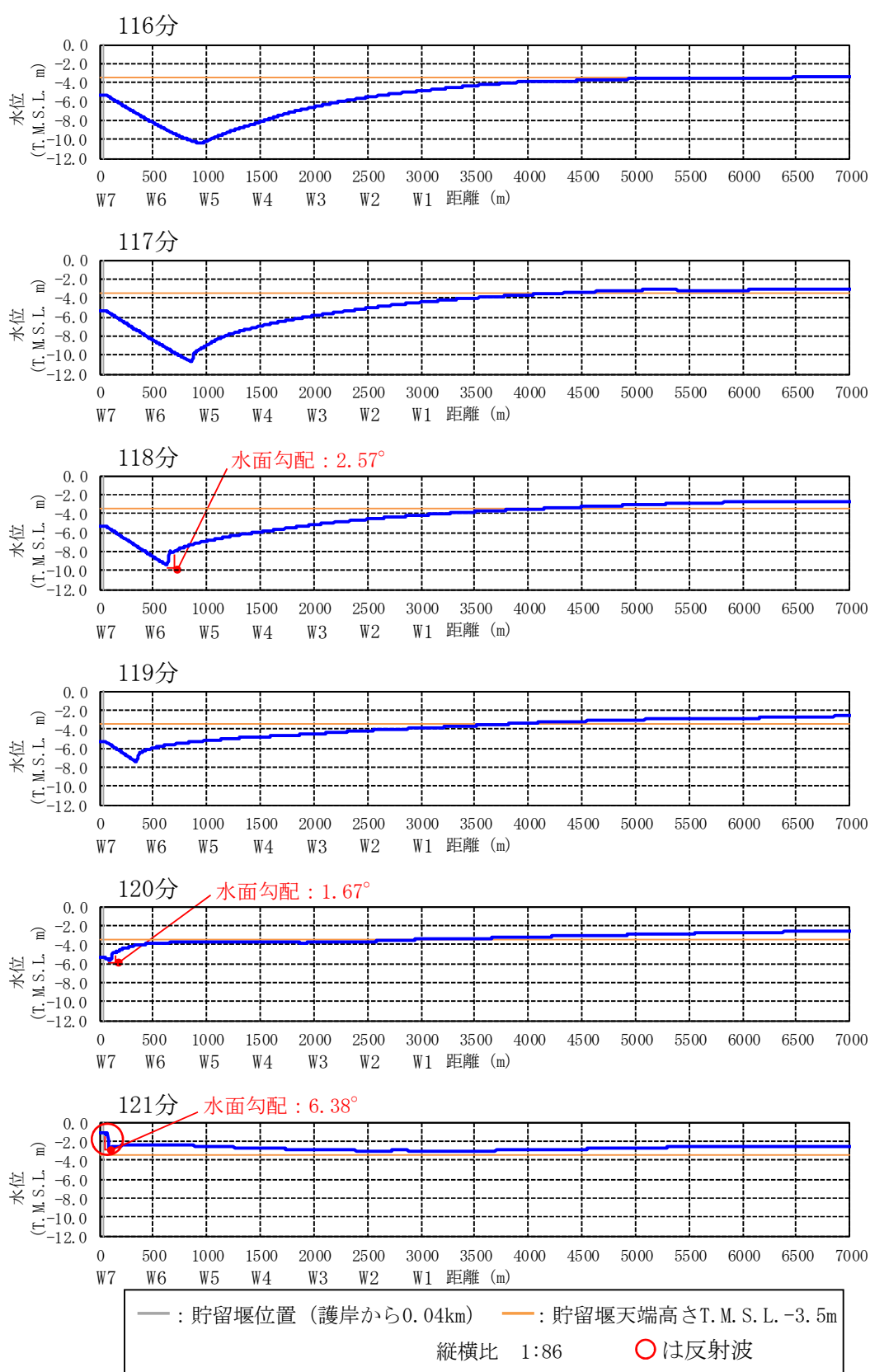


図 4.7 参 1-21 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [115-120 分]

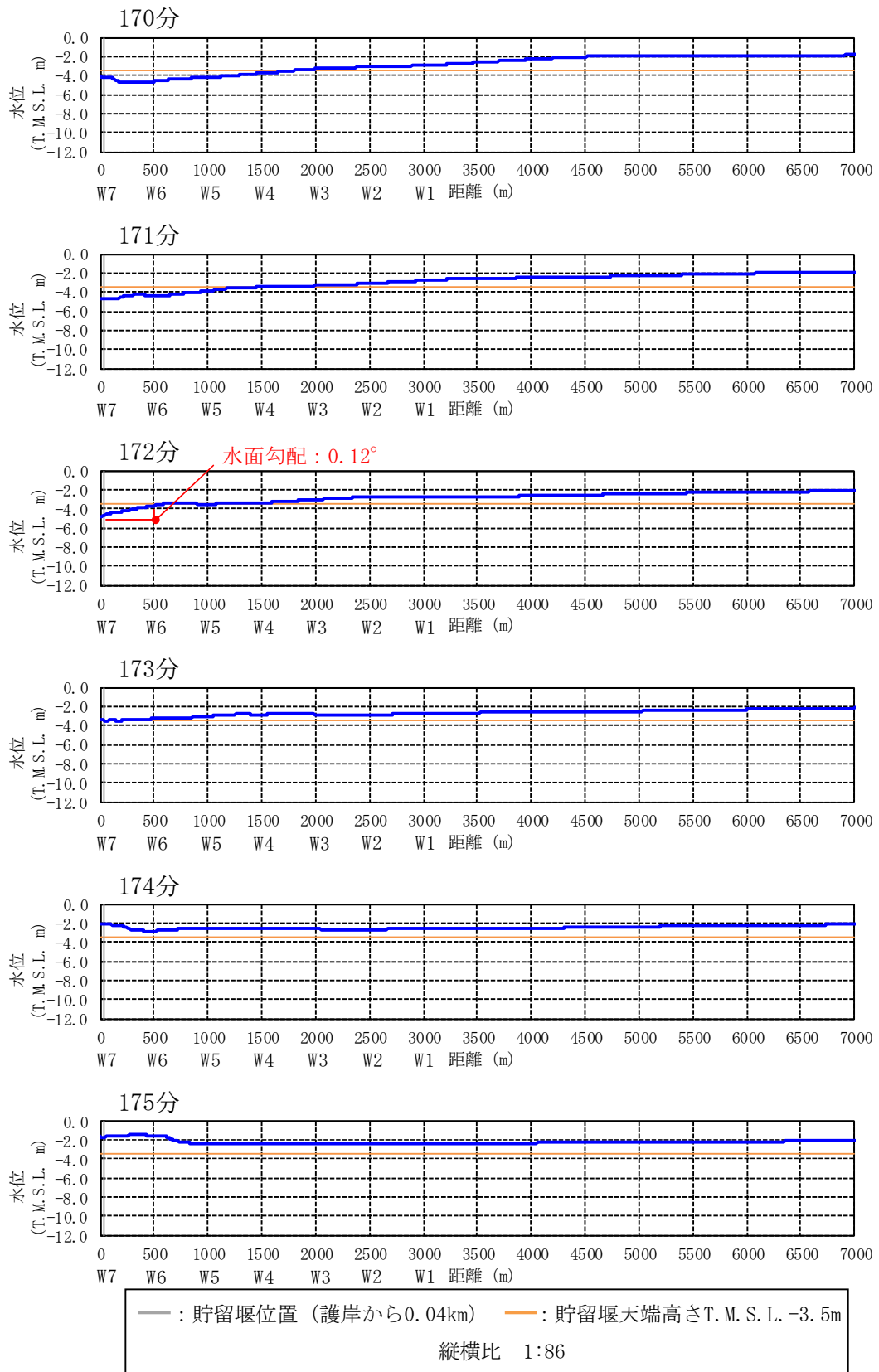


図 4.7 参 1-22 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [170-175 分]

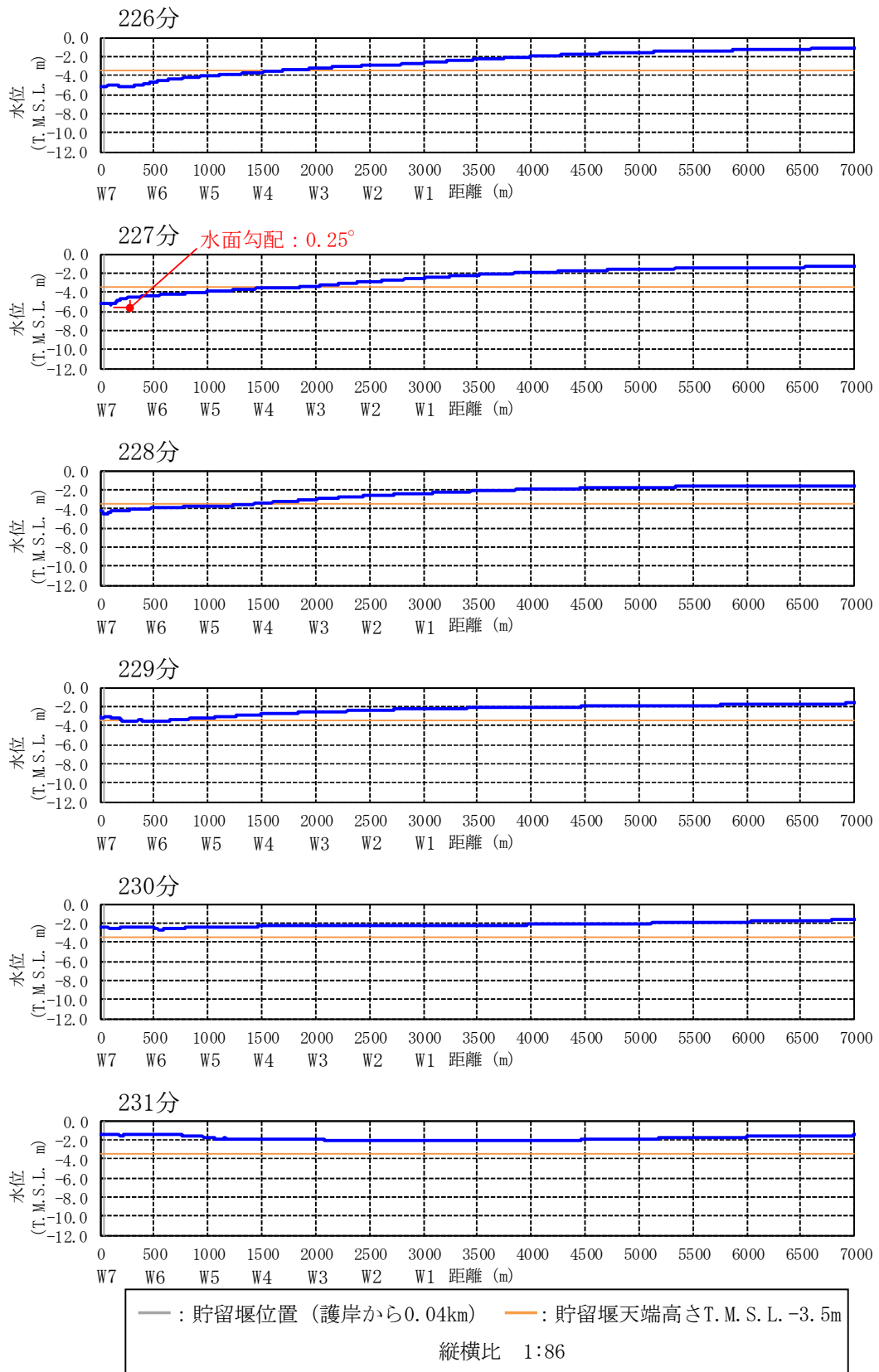


図 4.7 参 1-23 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [226-231 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

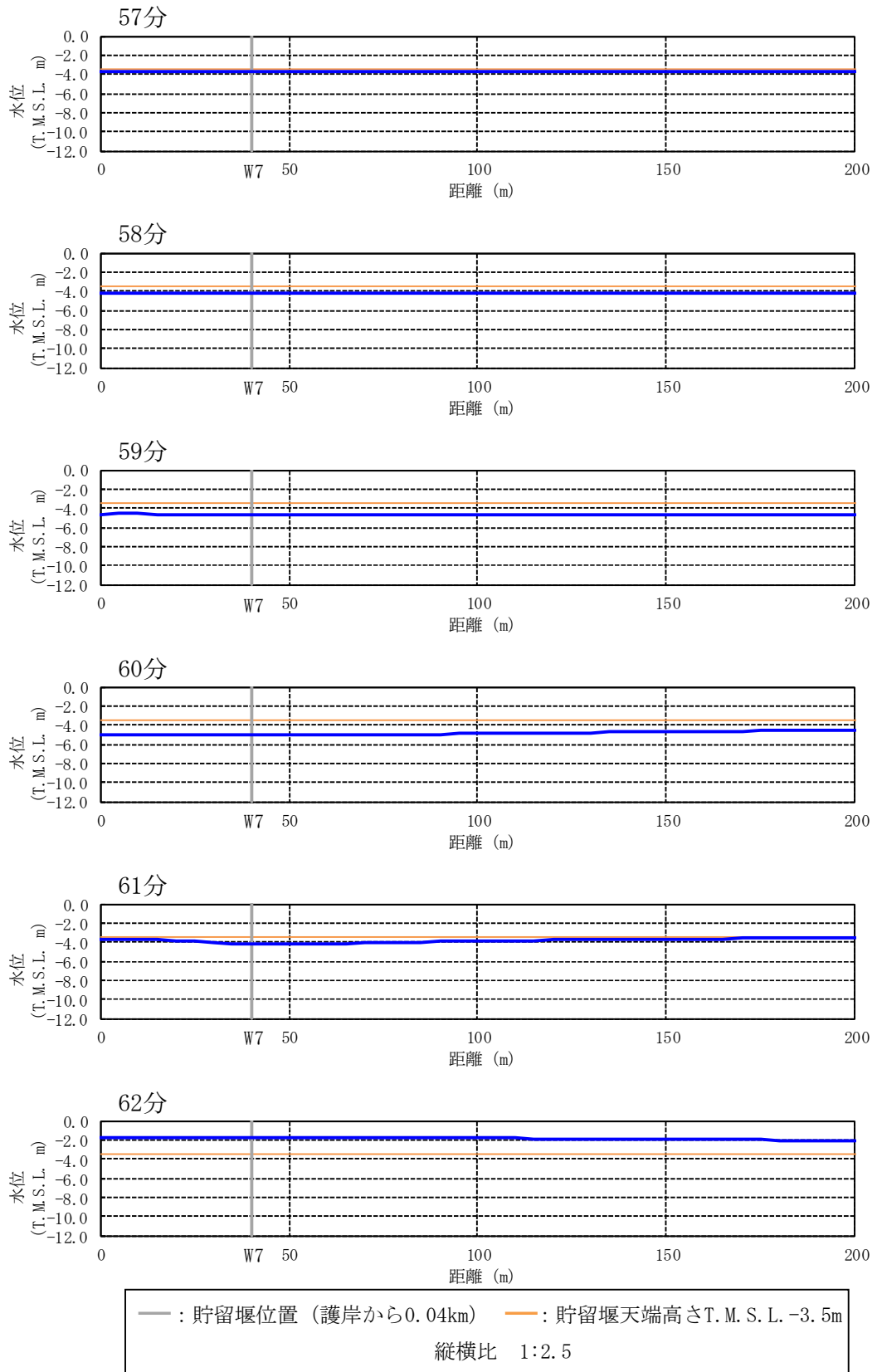


図 4.7 参 1-24 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [57-62 分, 0-200m を拡大]

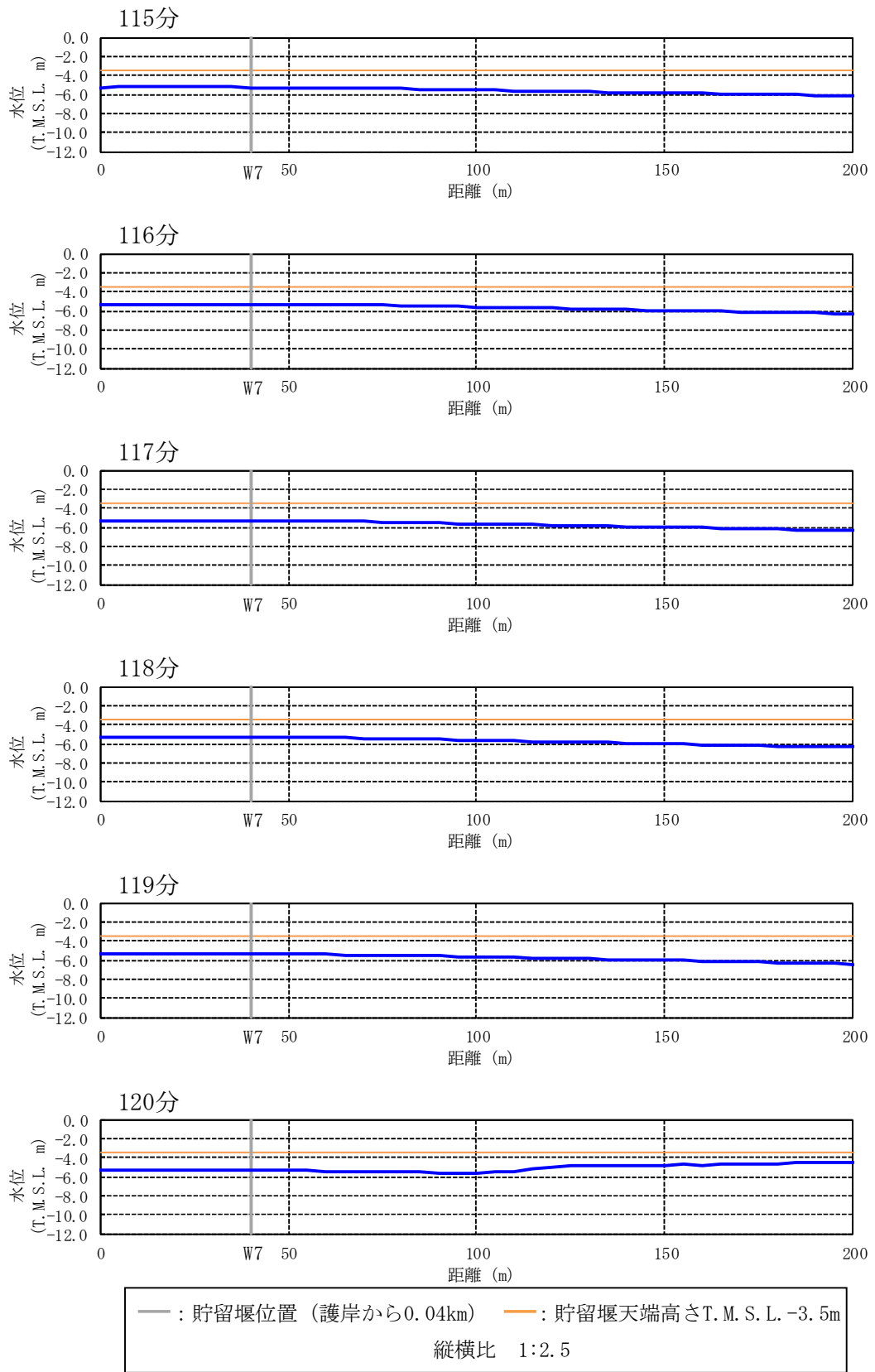


図 4.7 参 1-25 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [115-120 分, 0-200m を拡大]

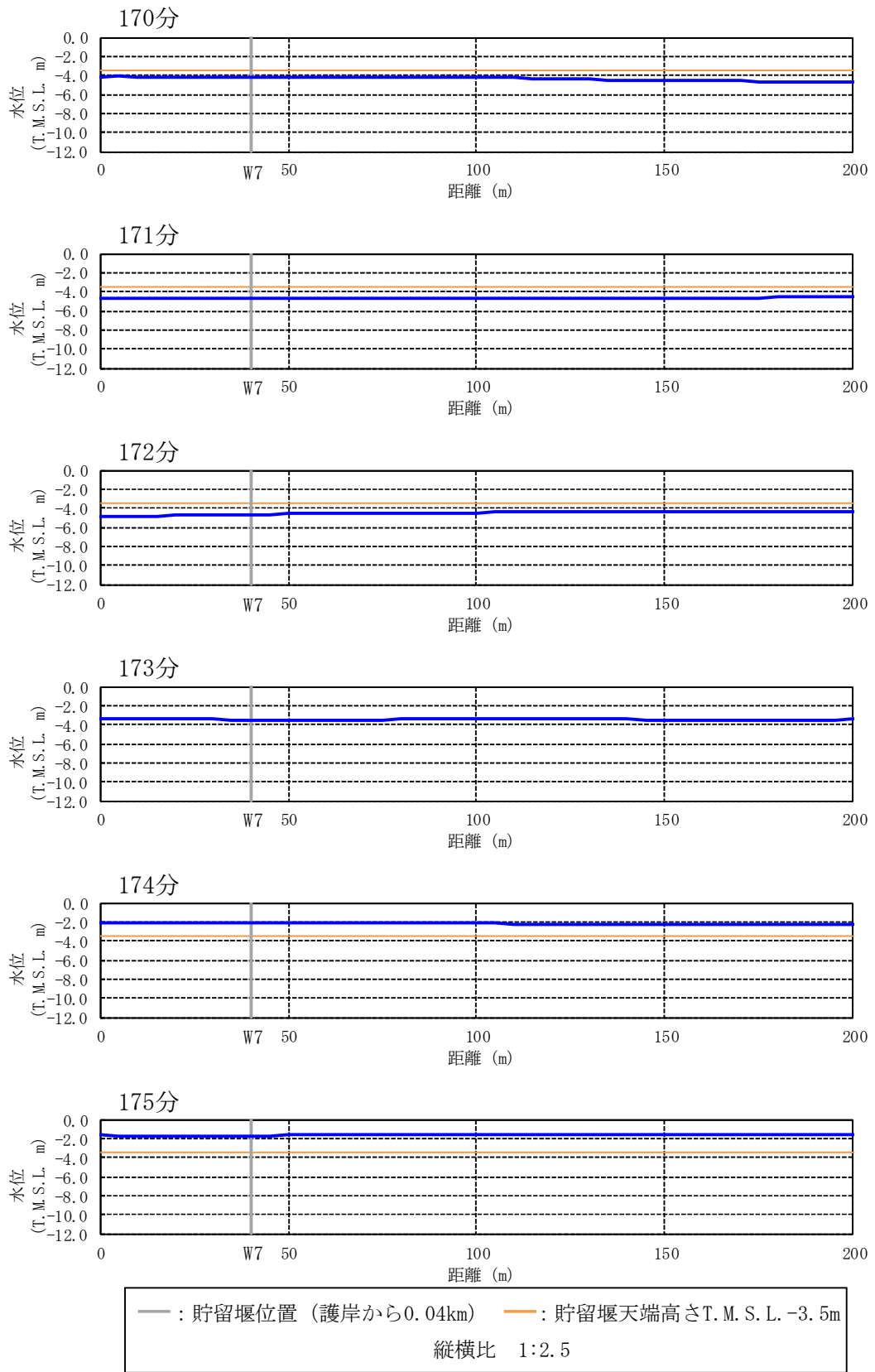


図 4.7 参 1-26 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [170-175 分, 0-200m を拡大]

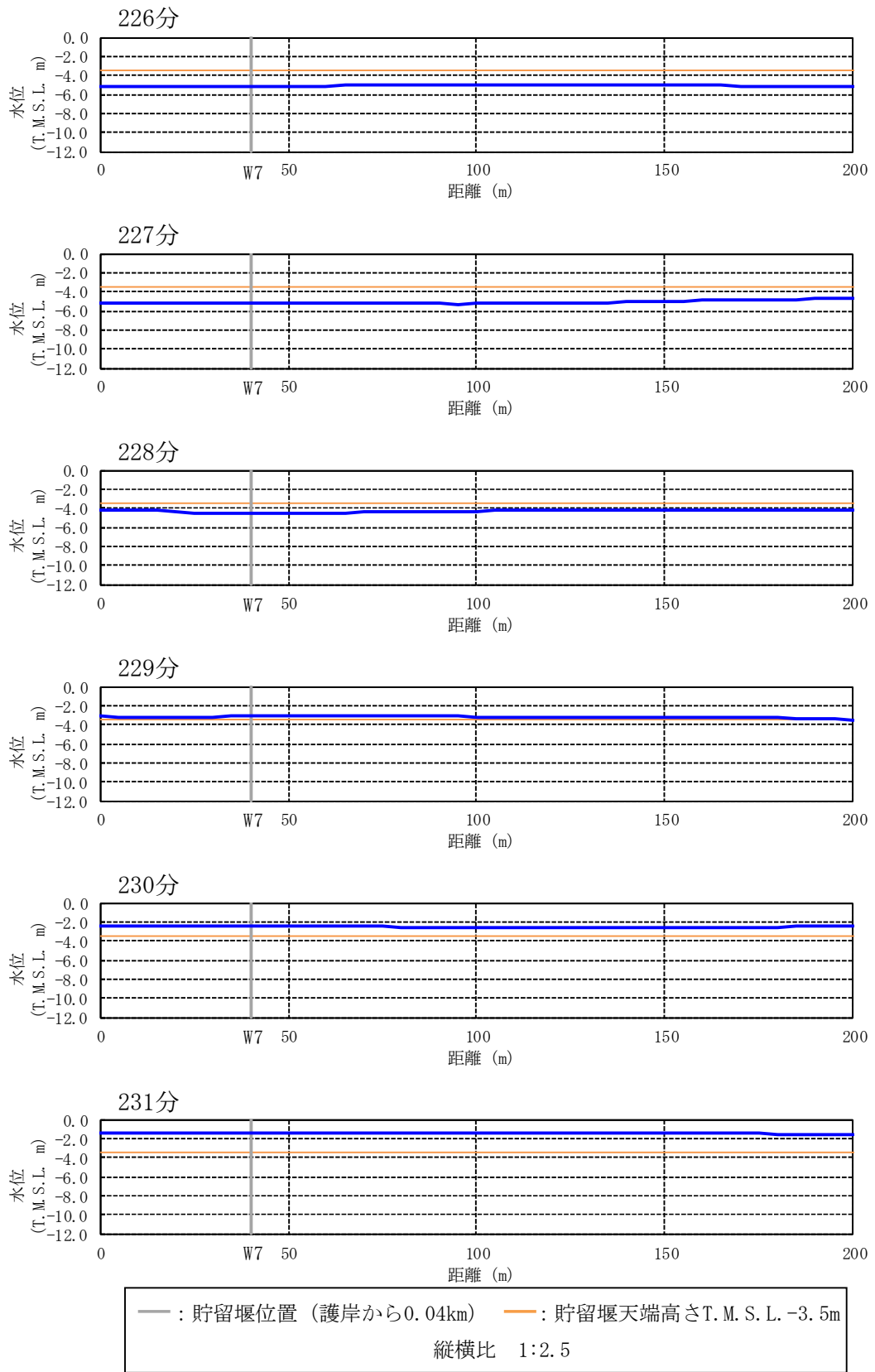


図 4.7 参 1-27 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [226-231 分, 0-200m を拡大]

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

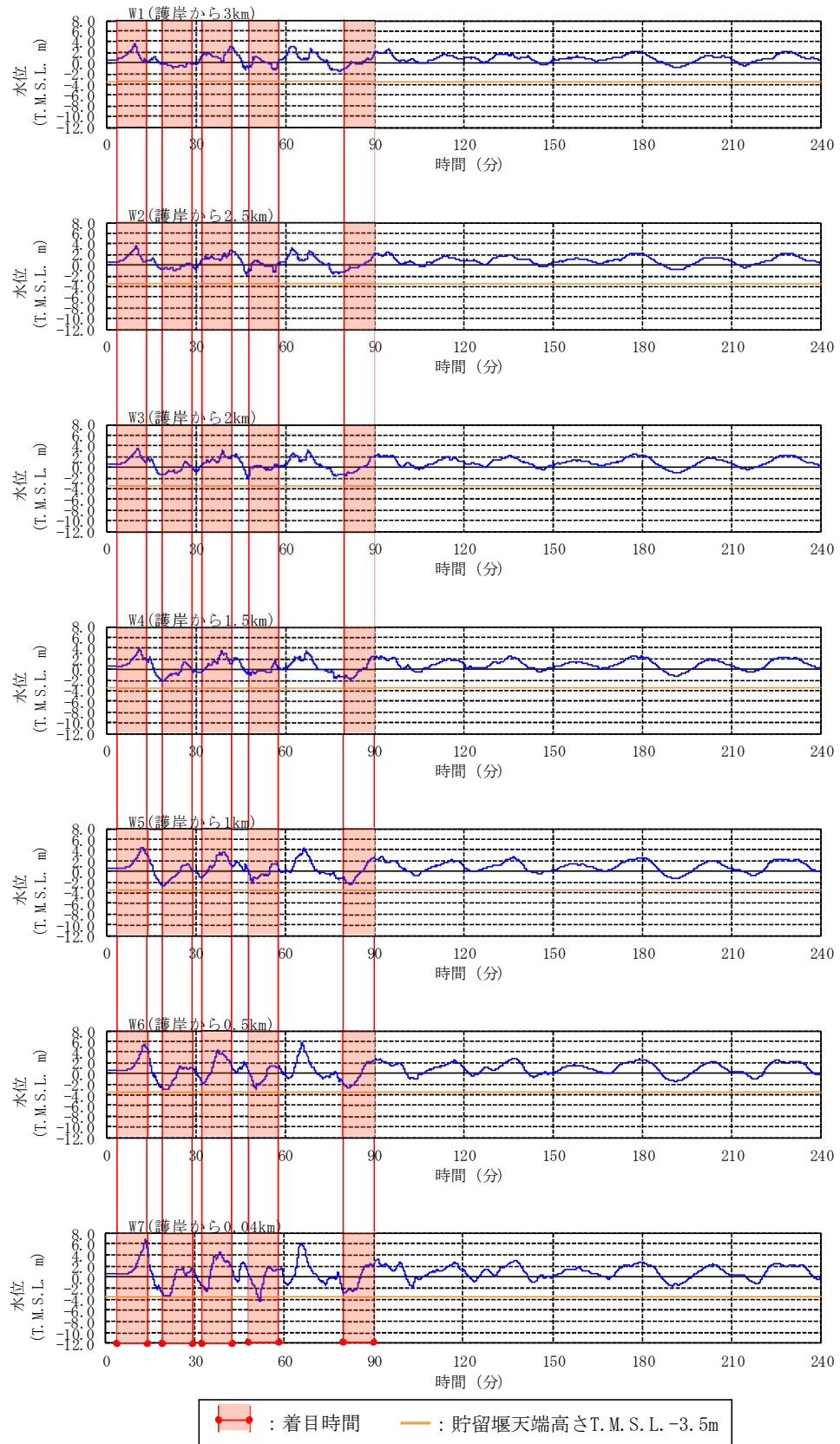


図 4.7 参 1-28 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [0-240 分]

b. 水位時刻歴波形(着目時間の拡大)

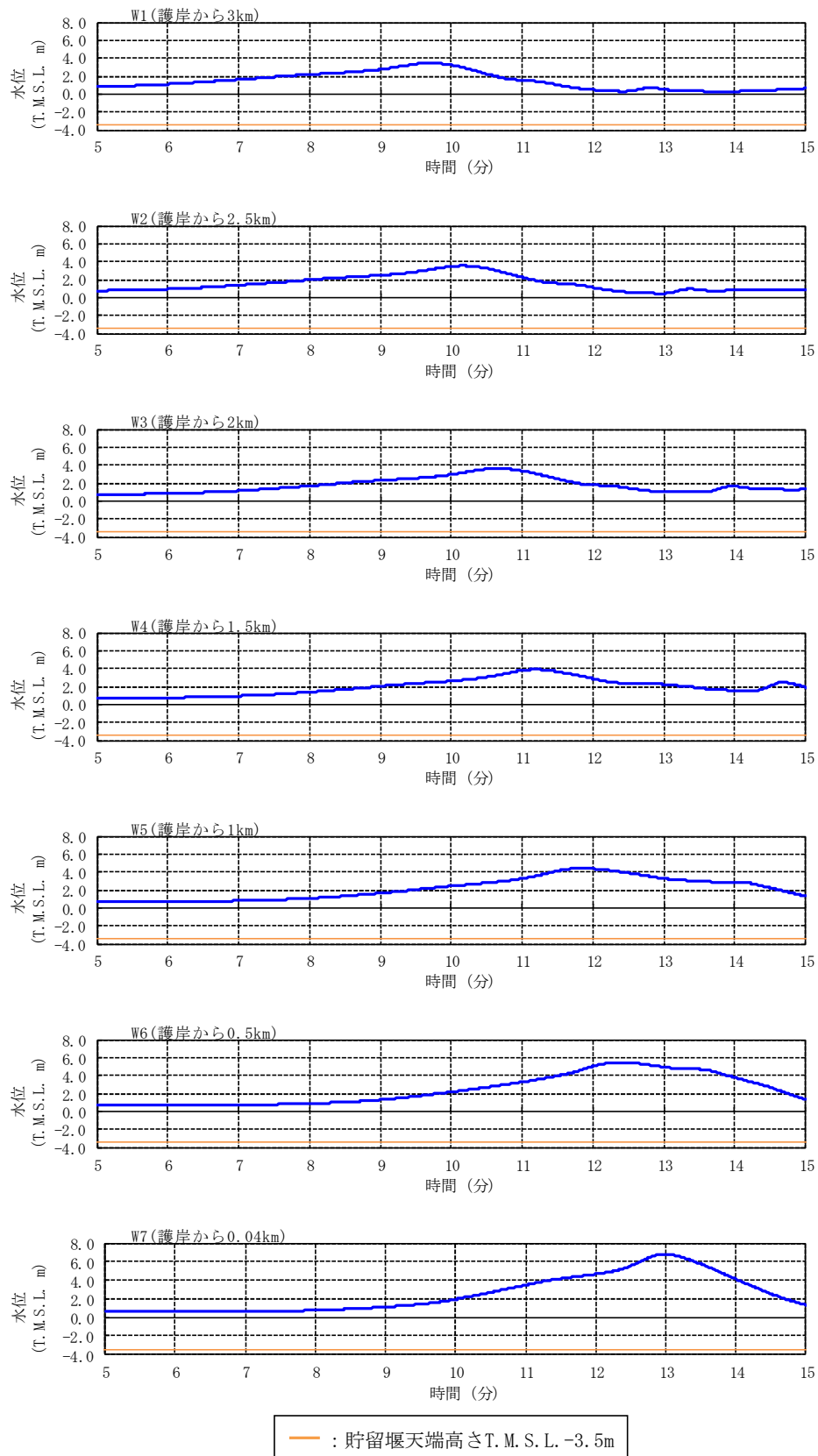


図 4.7 参 1-29 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [5-15 分を拡大]

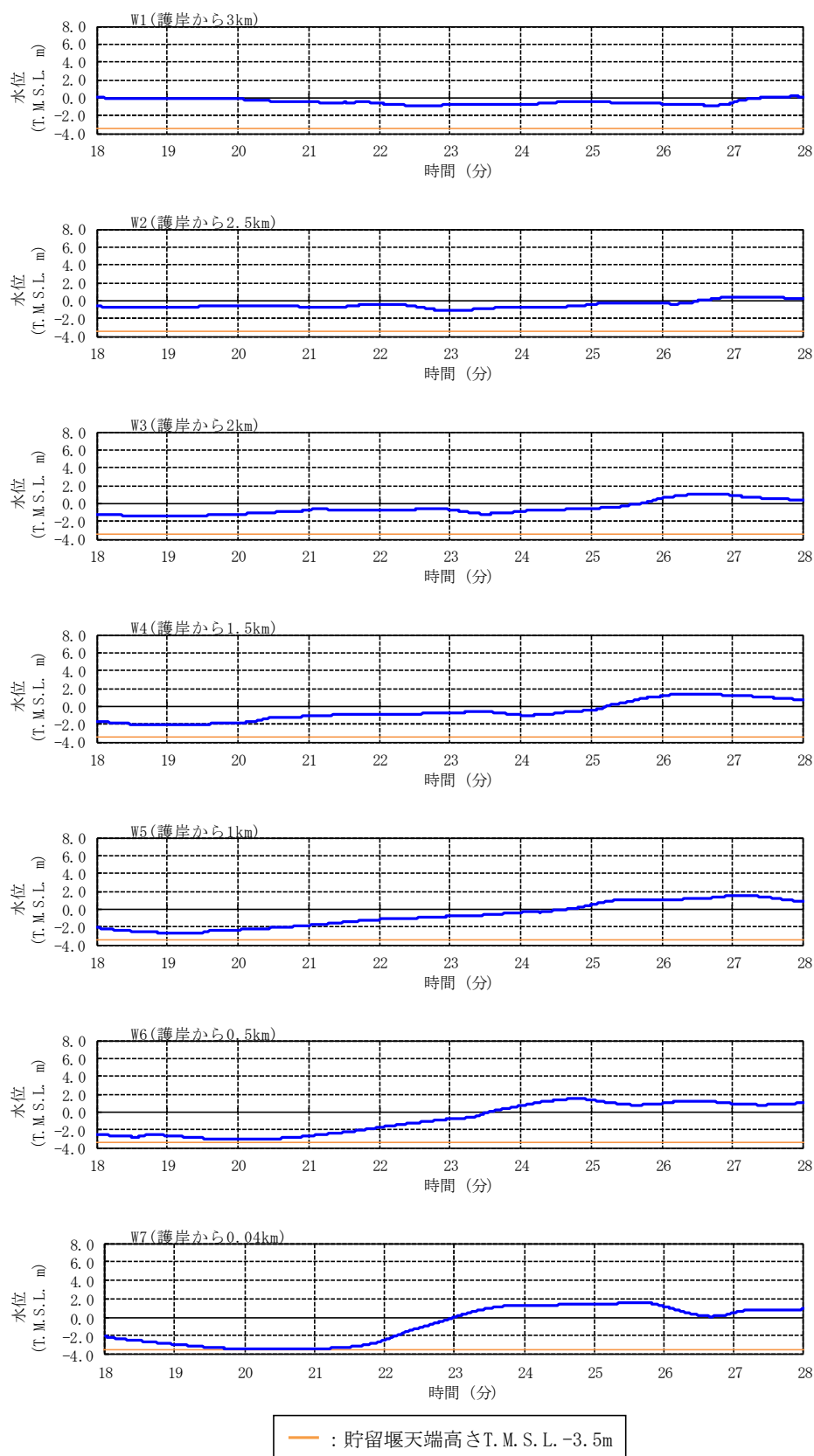


図 4.7 参 1-30 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [18-28 分を拡大]

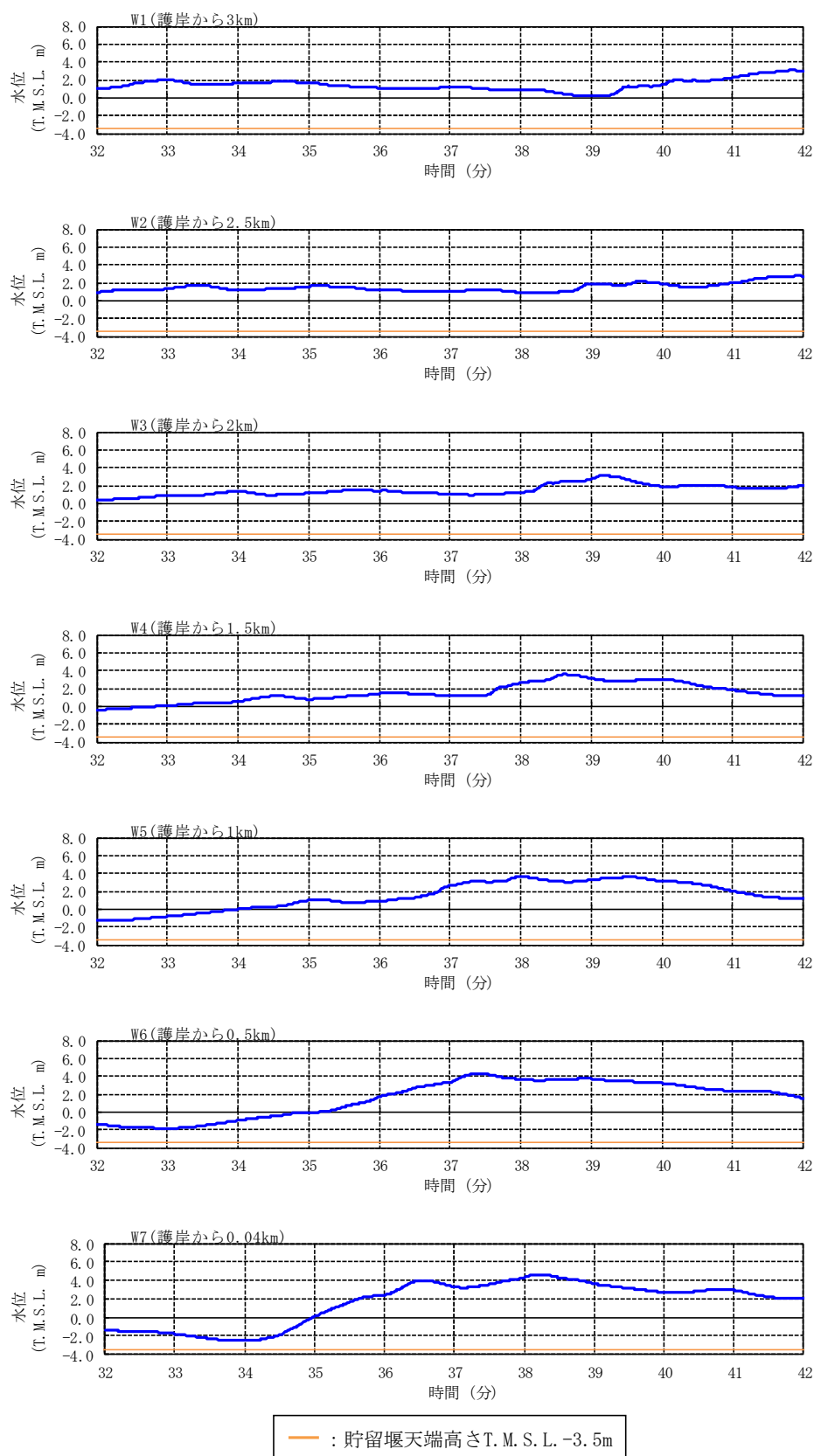


図 4.7 参 1-31 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [32-42 分を拡大]

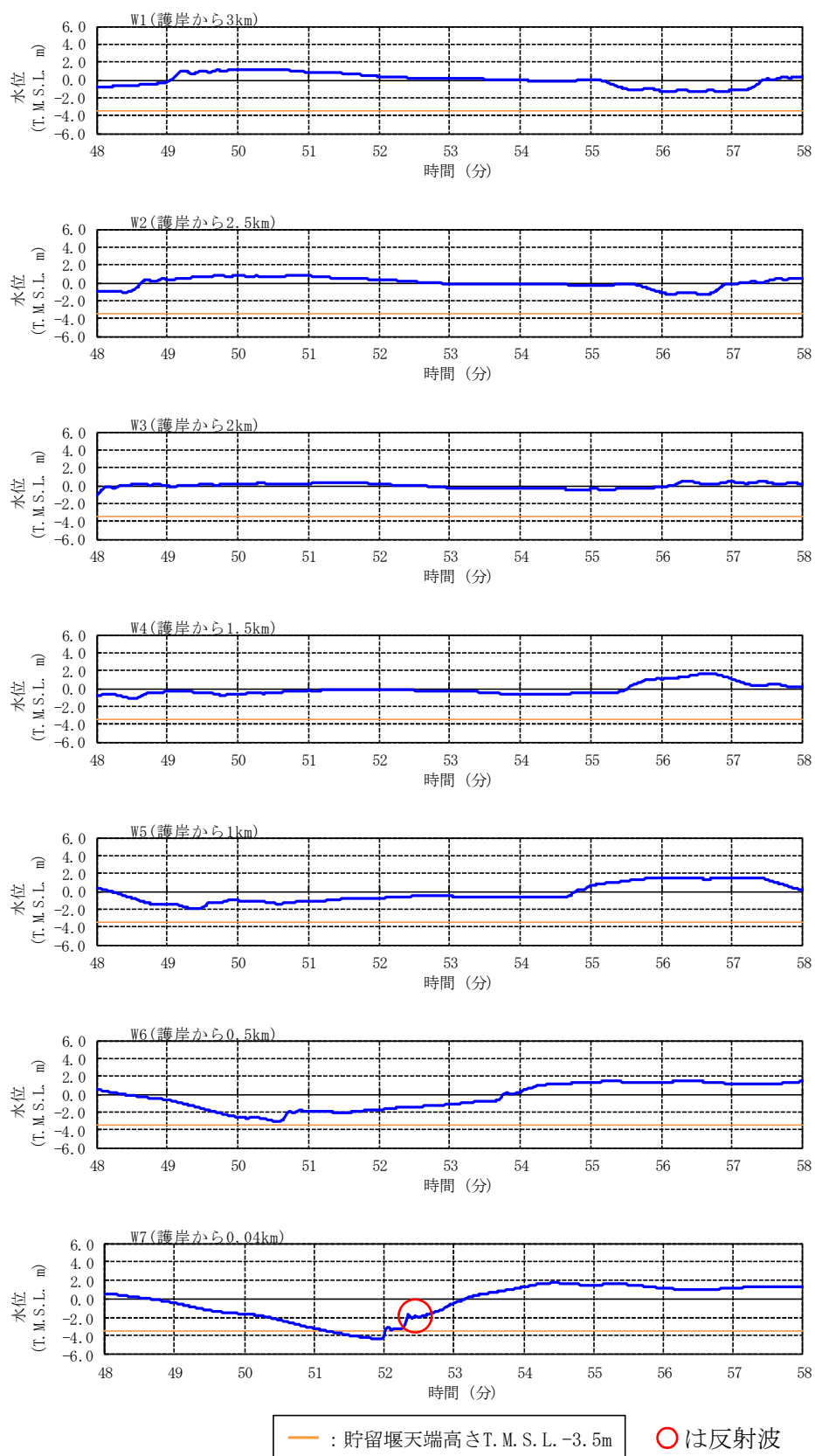


図 4.7 参 1-32 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [48-58 分を拡大]

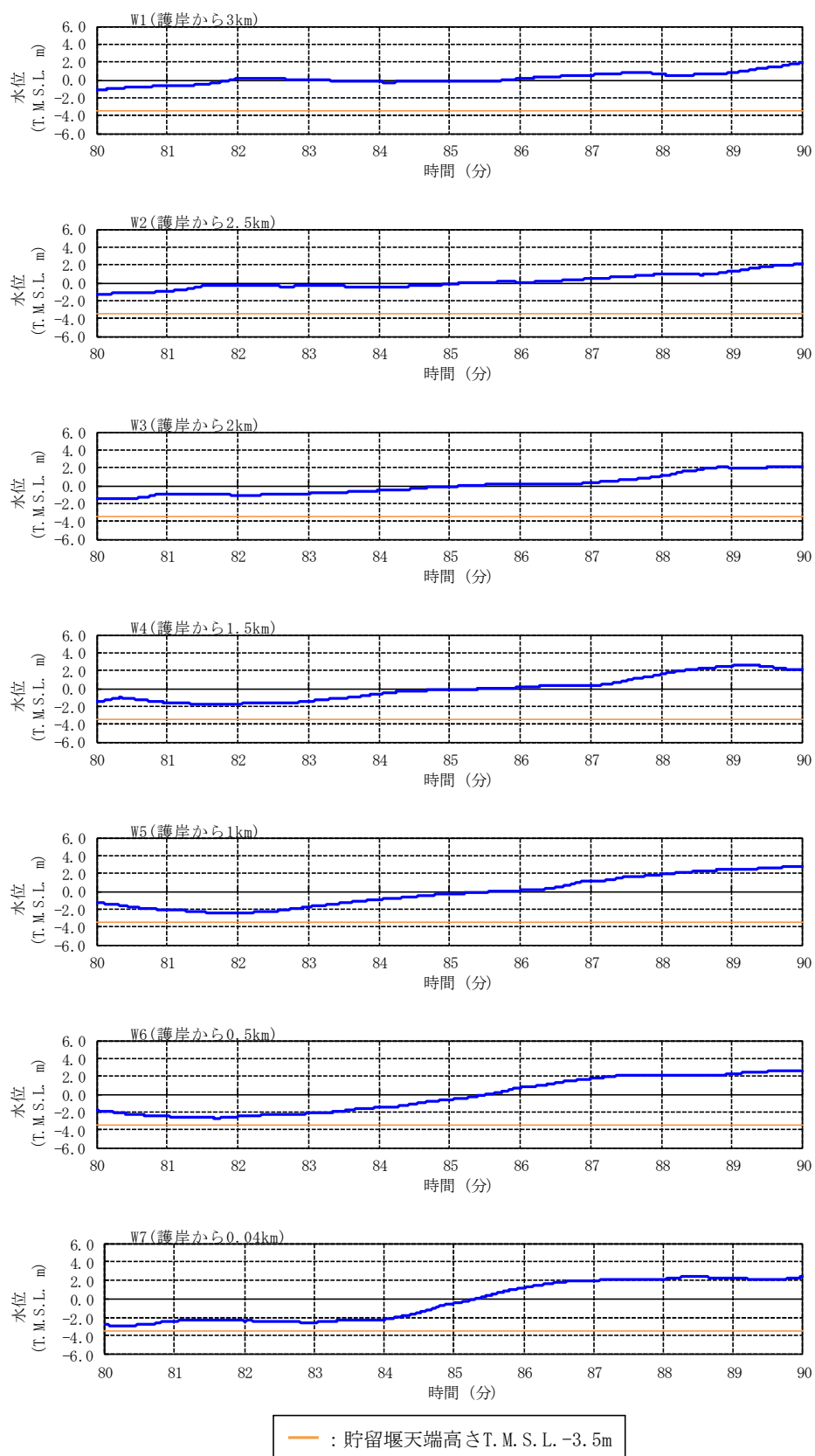


図 4.7 参 1-33 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [80-90 分を拡大]

c. 着目時間別の水位の空間分布

(1) 全景

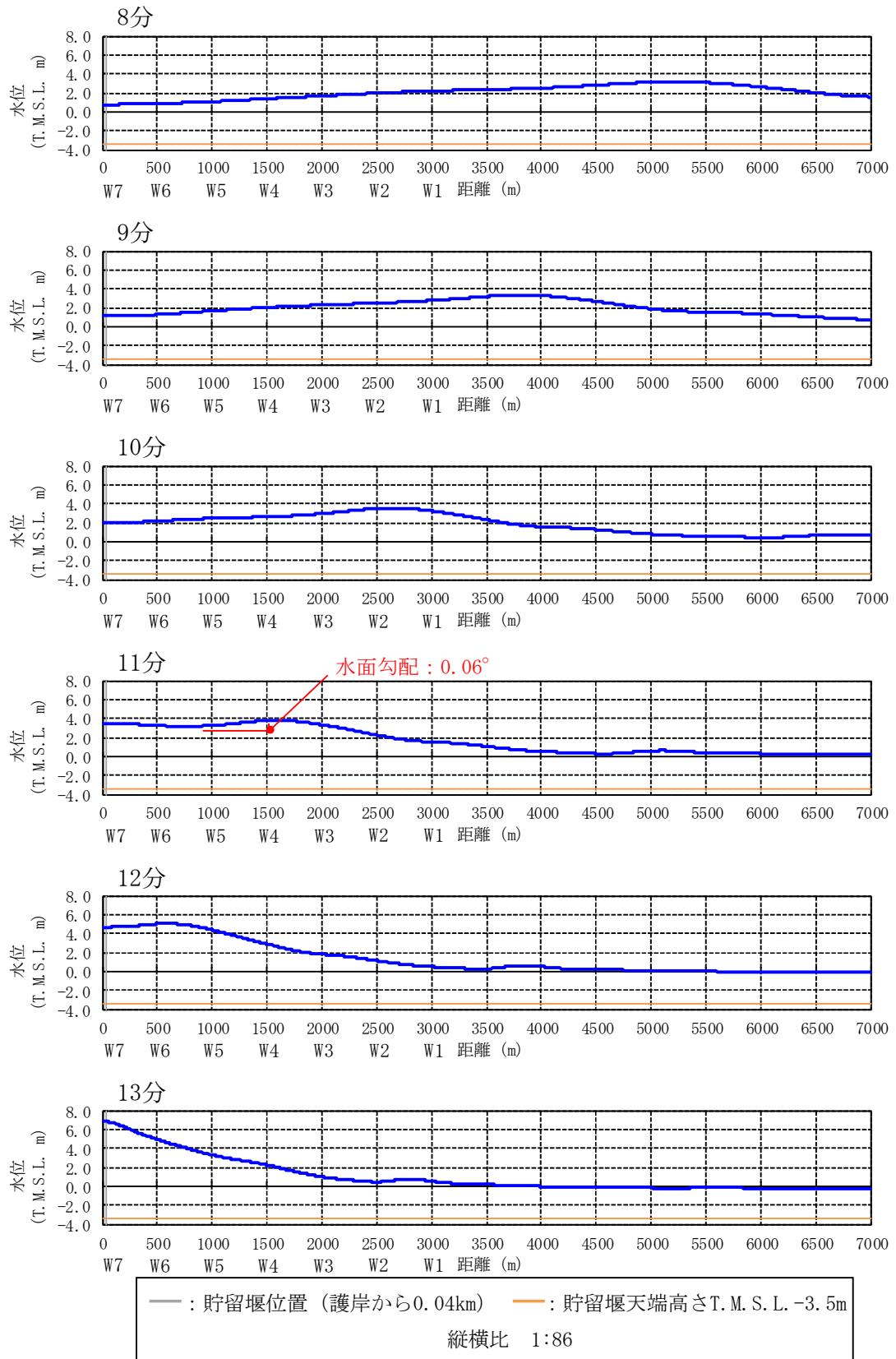


図 4.7 参 1-34 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [8-13 分]

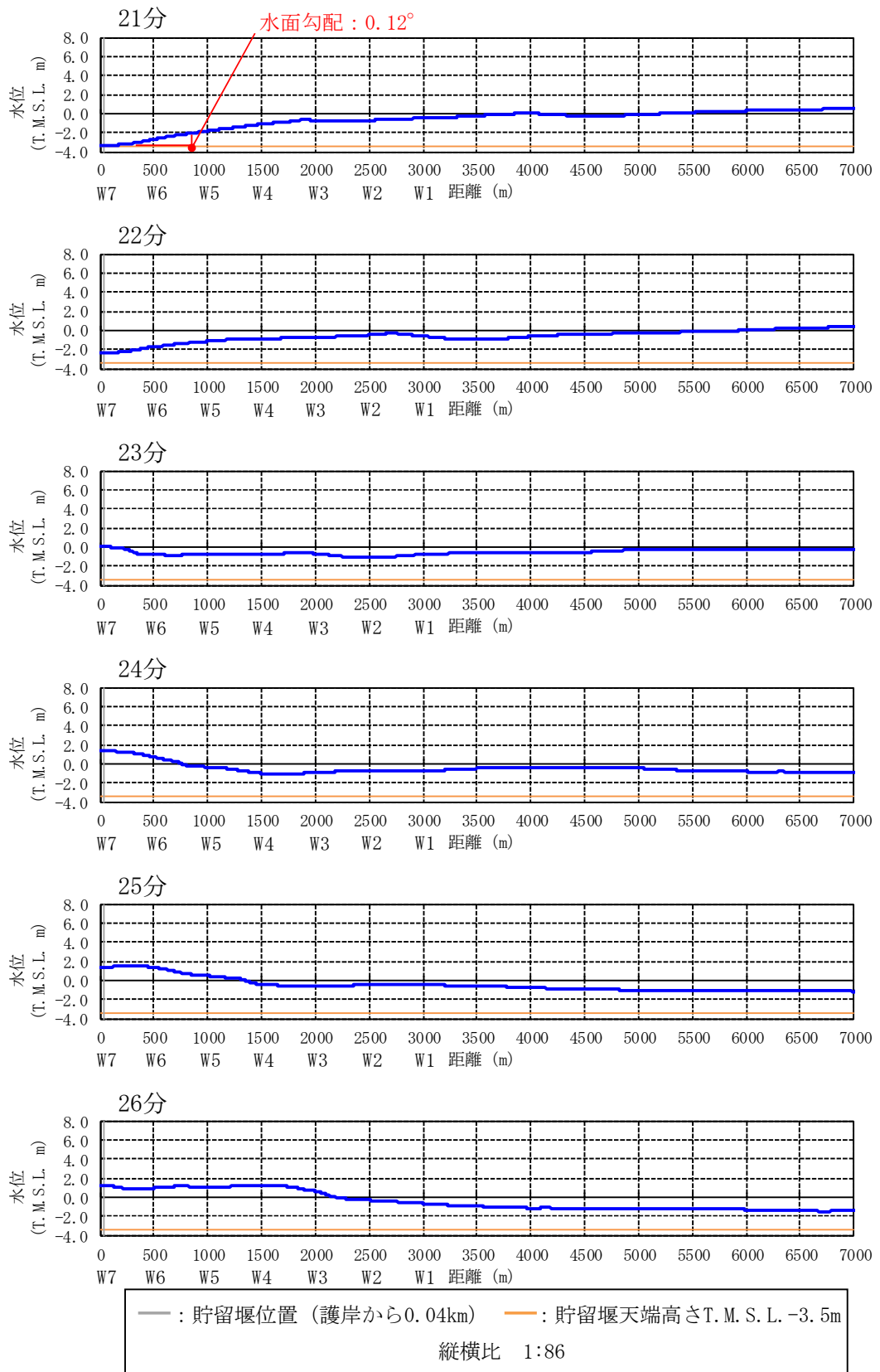


図 4.7 参 1-35 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [21-26 分]

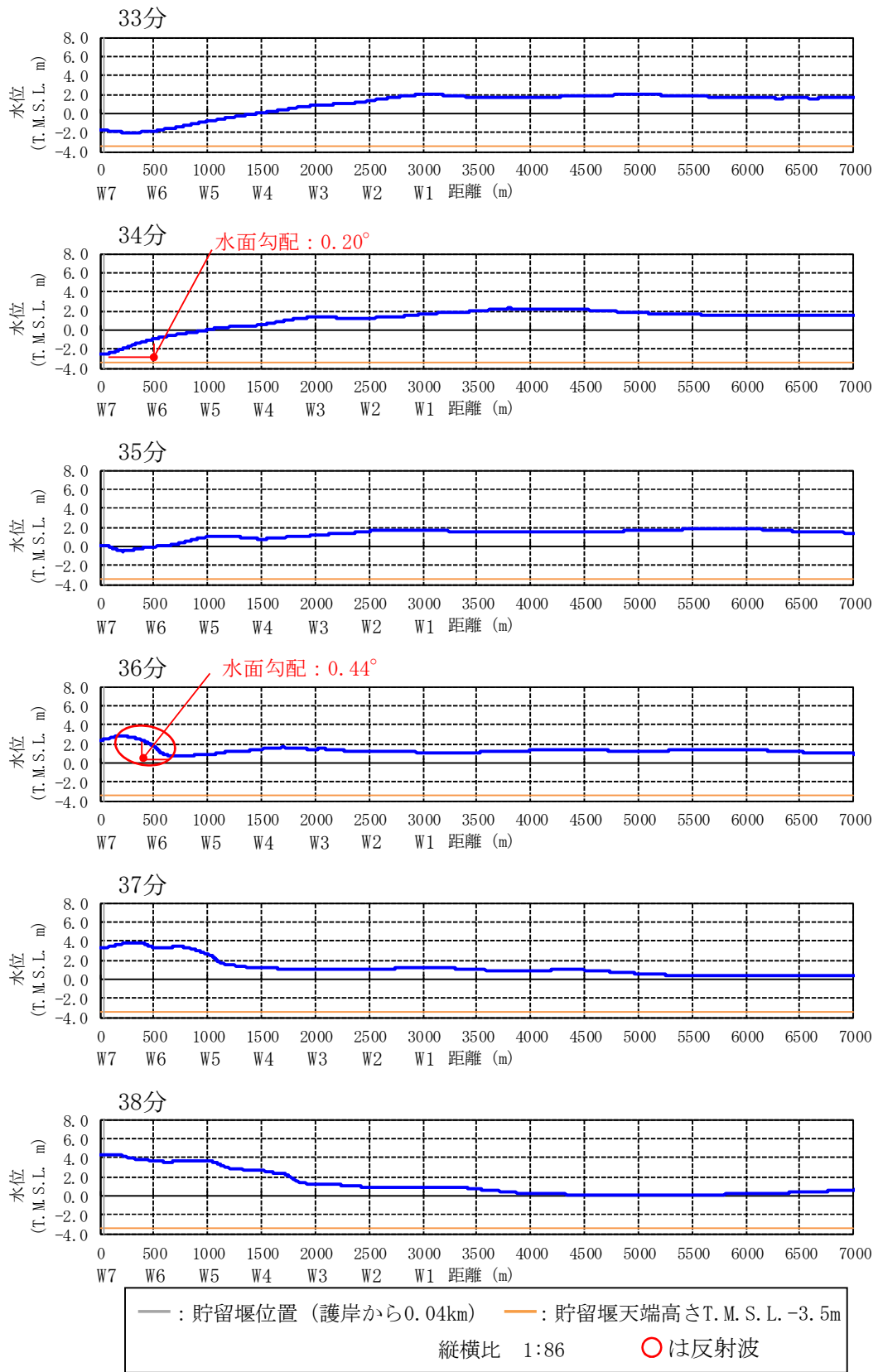


図 4.7 参 1-36 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [33-38 分]

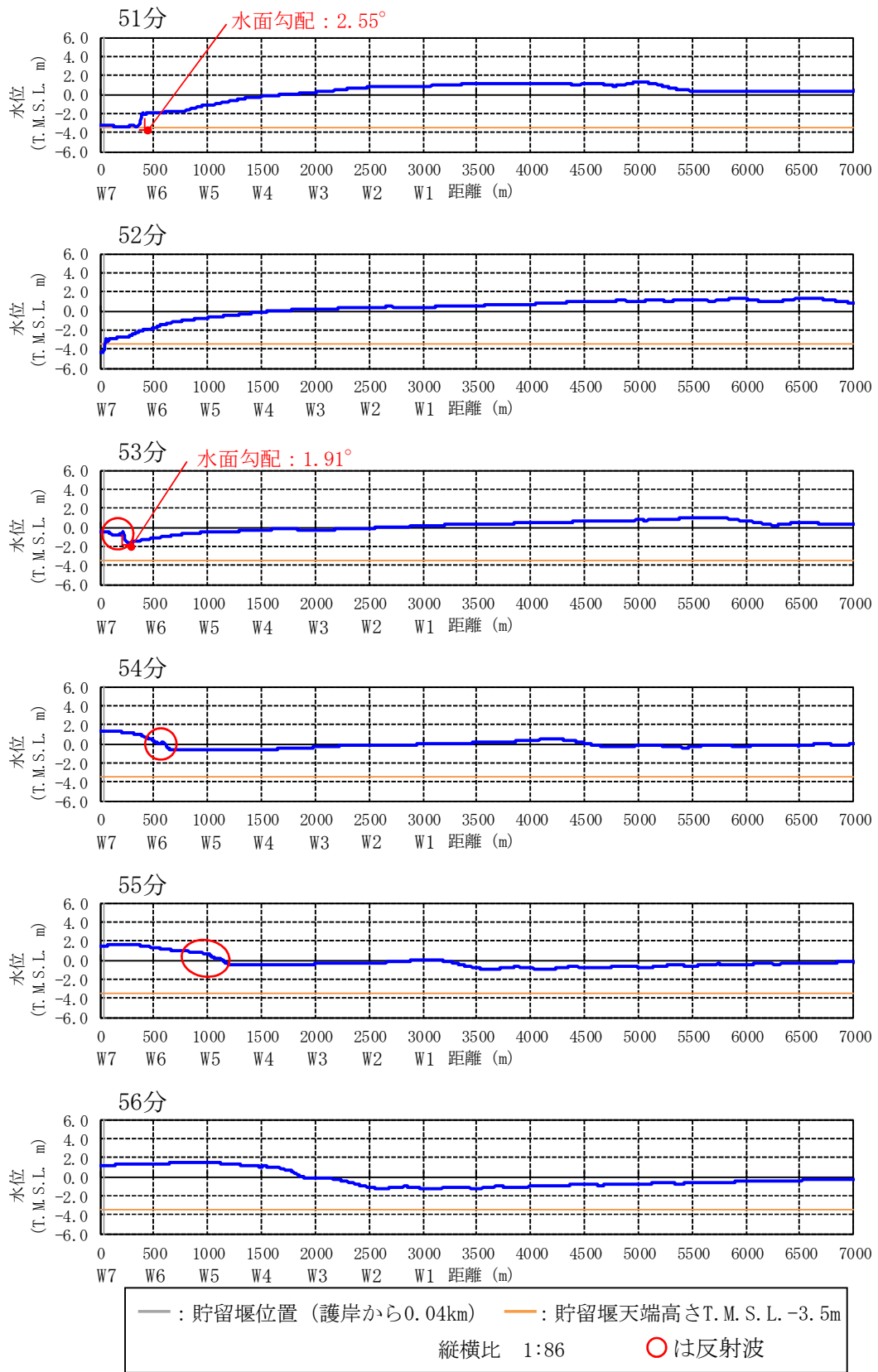


図 4.7 参 1-37 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分]

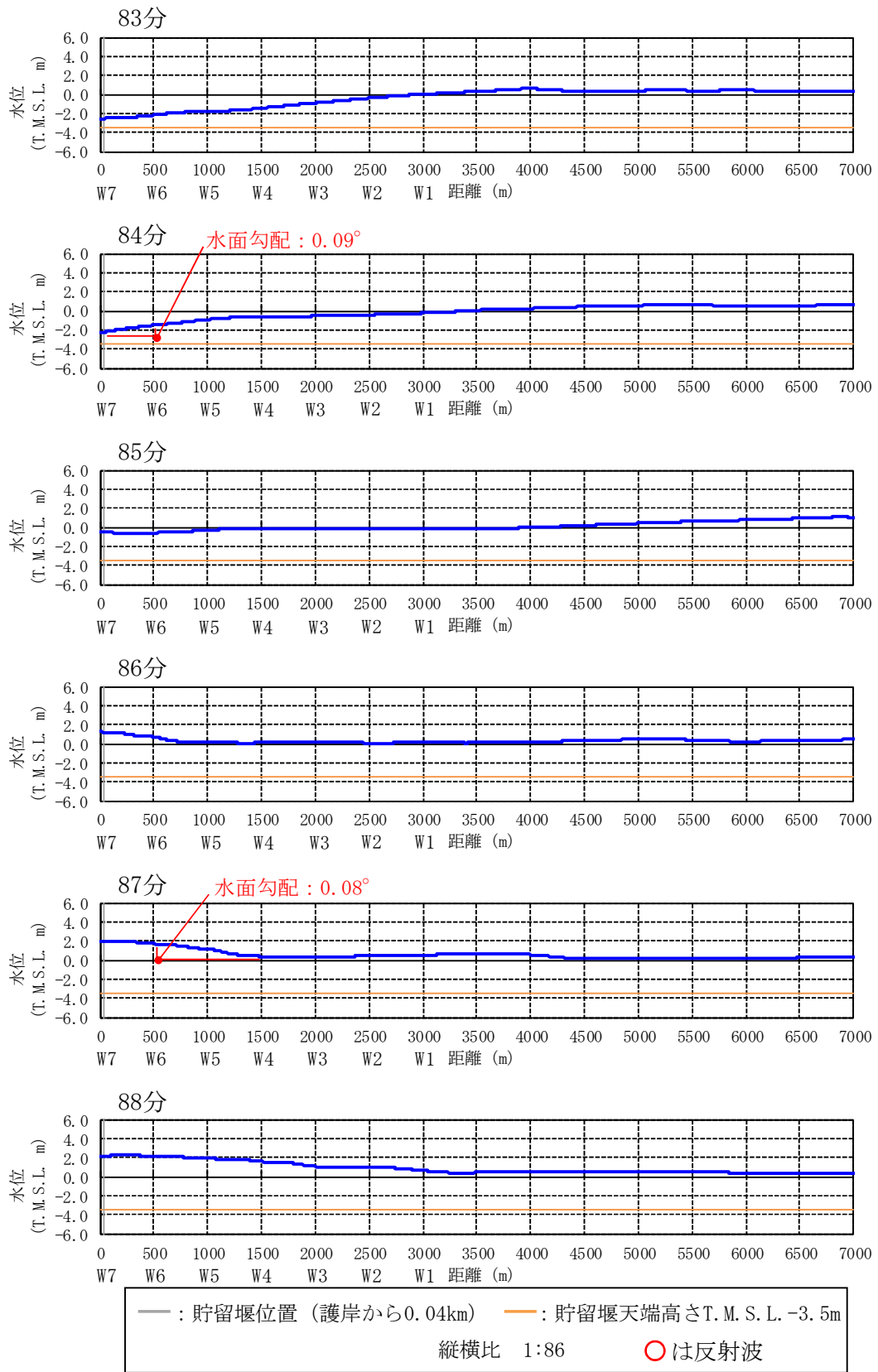


図 4.7 参 1-38 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [83-88 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

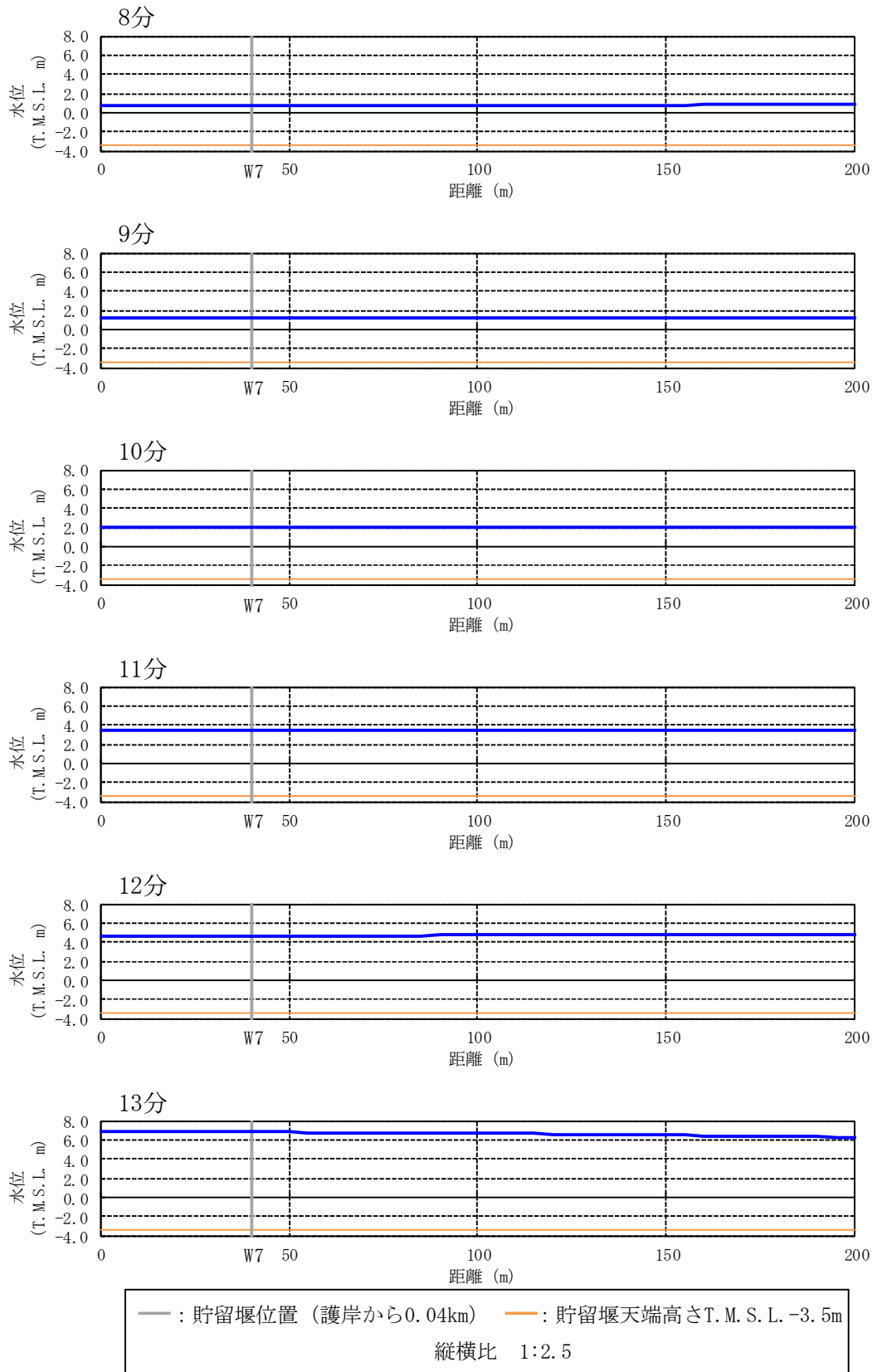


図 4.7 参 1-39 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [8-13 分, 0-200m を拡大]

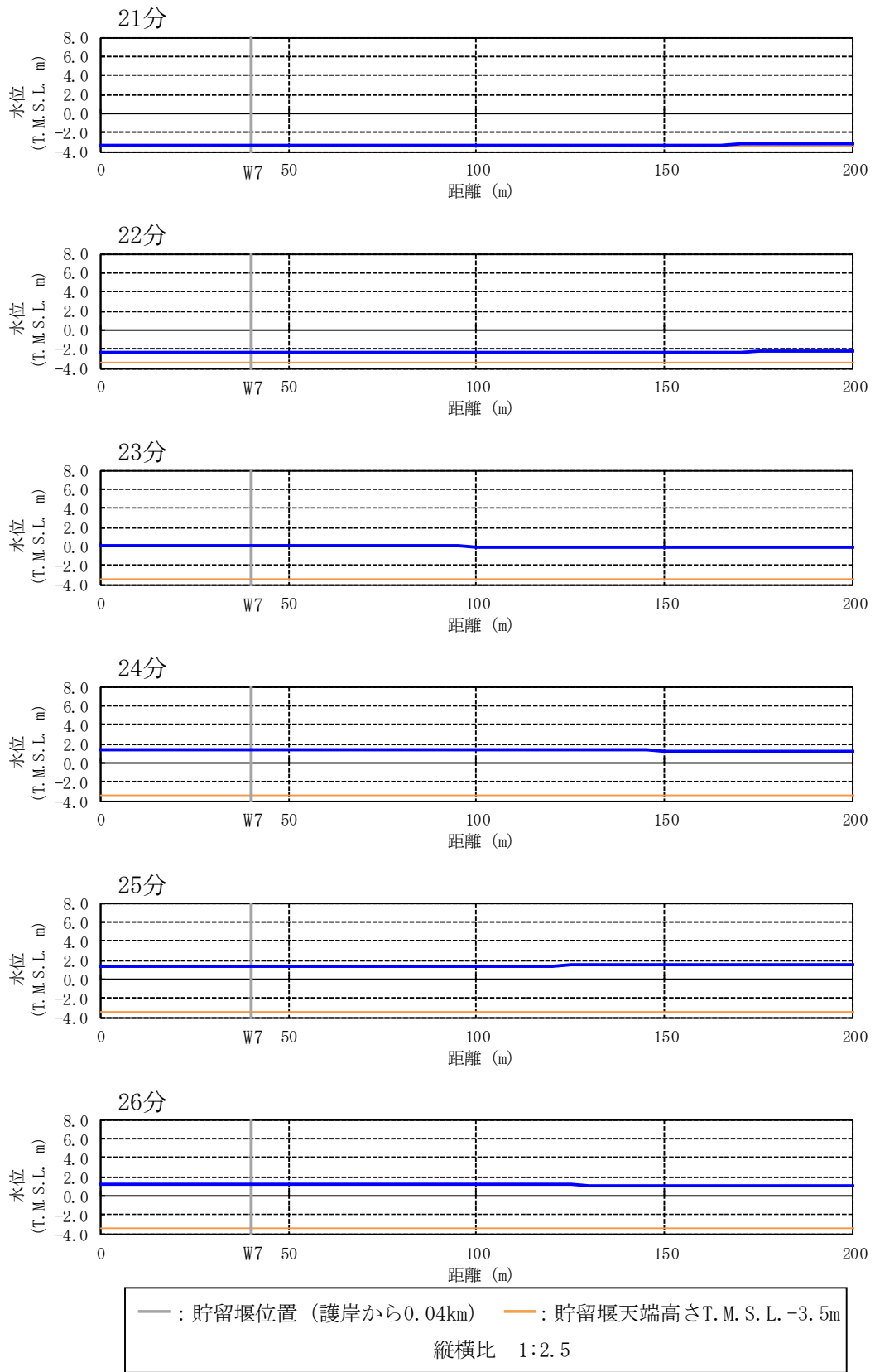


図 4.7 参 1-40 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [21-26 分, 0-200m を拡大]

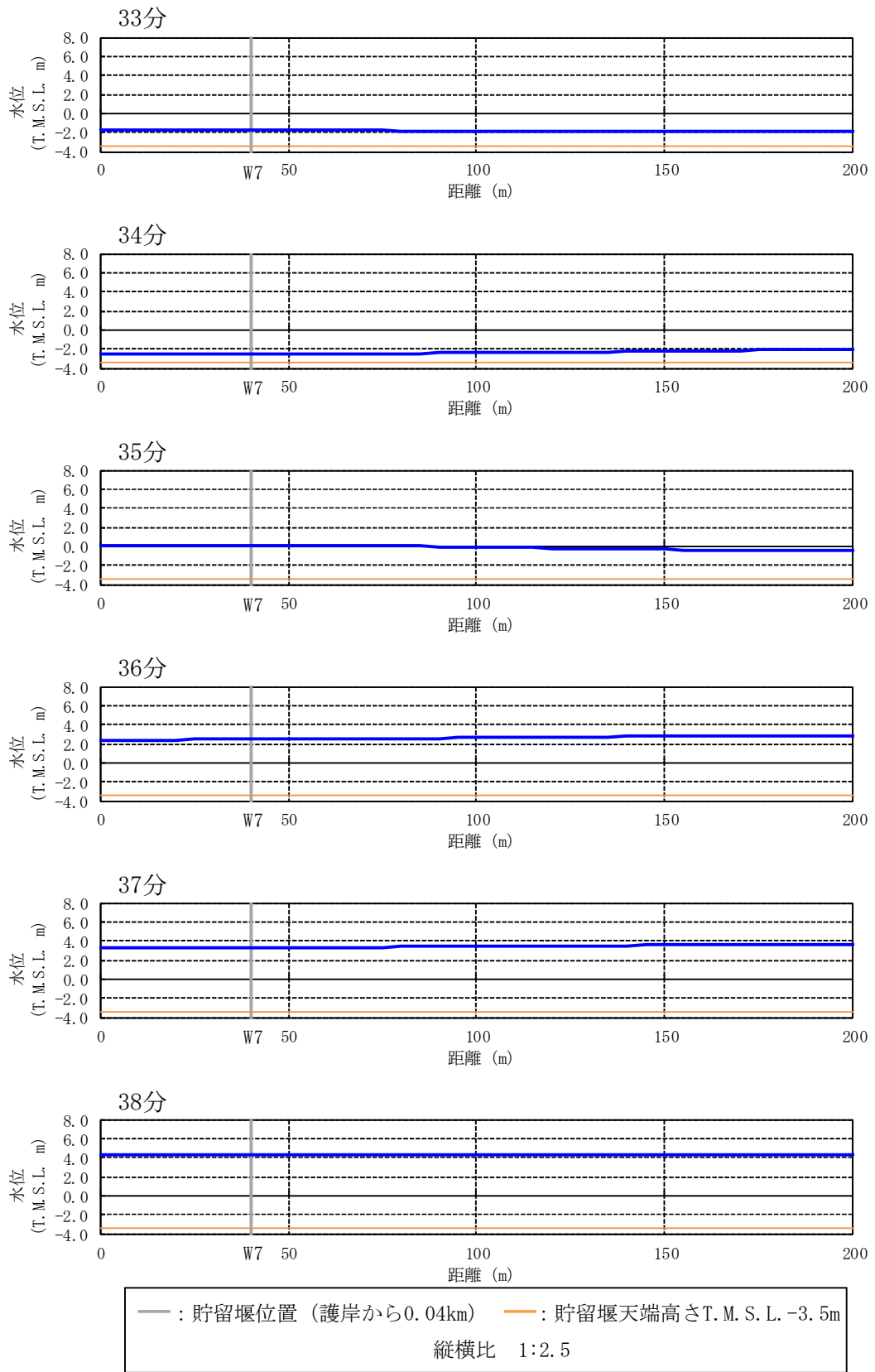


図 4.7 参 1-41 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [33-38 分, 0-200m を拡大]

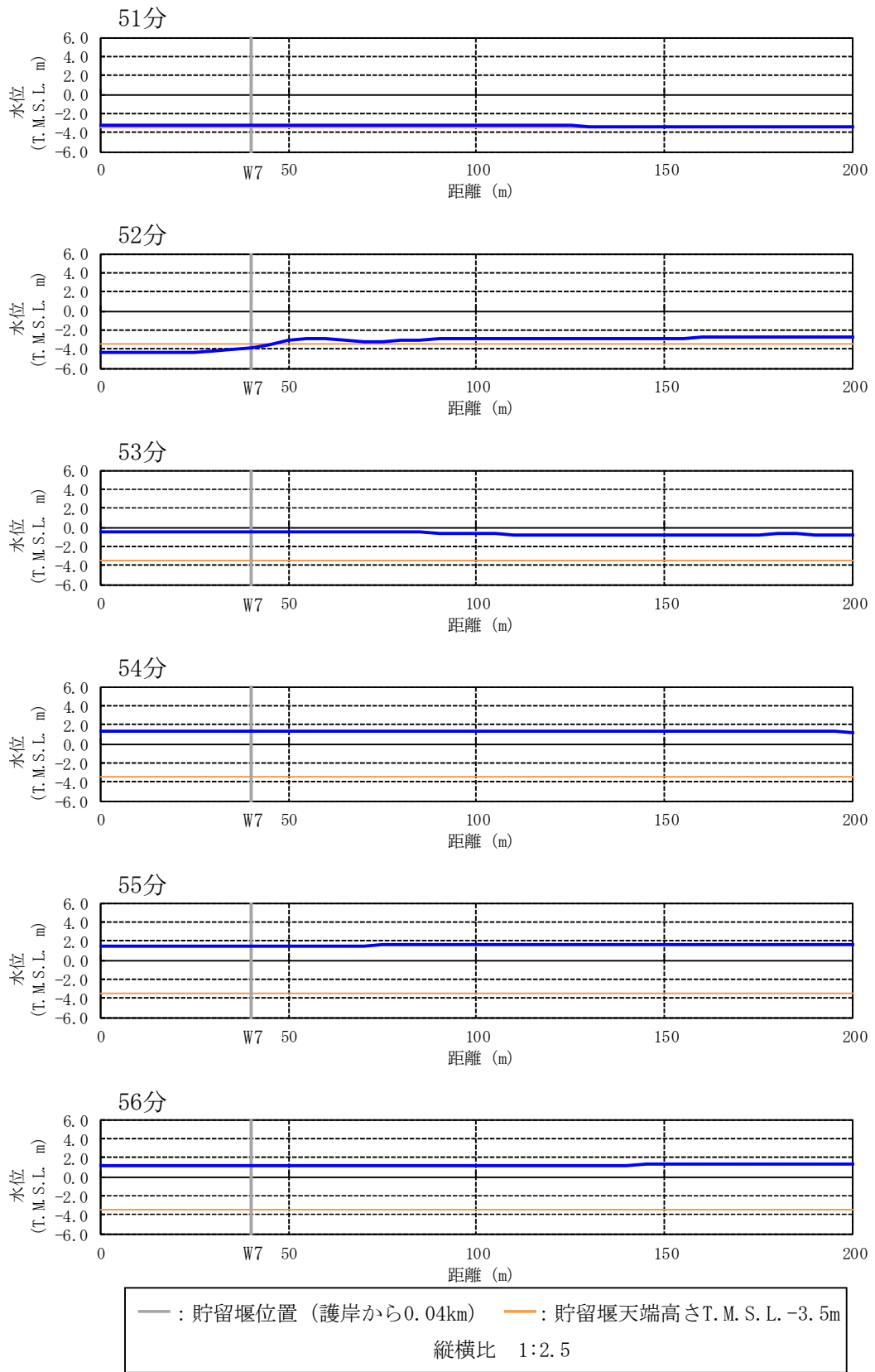


図 4.7 参 1-42 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分, 0-200m を拡大]

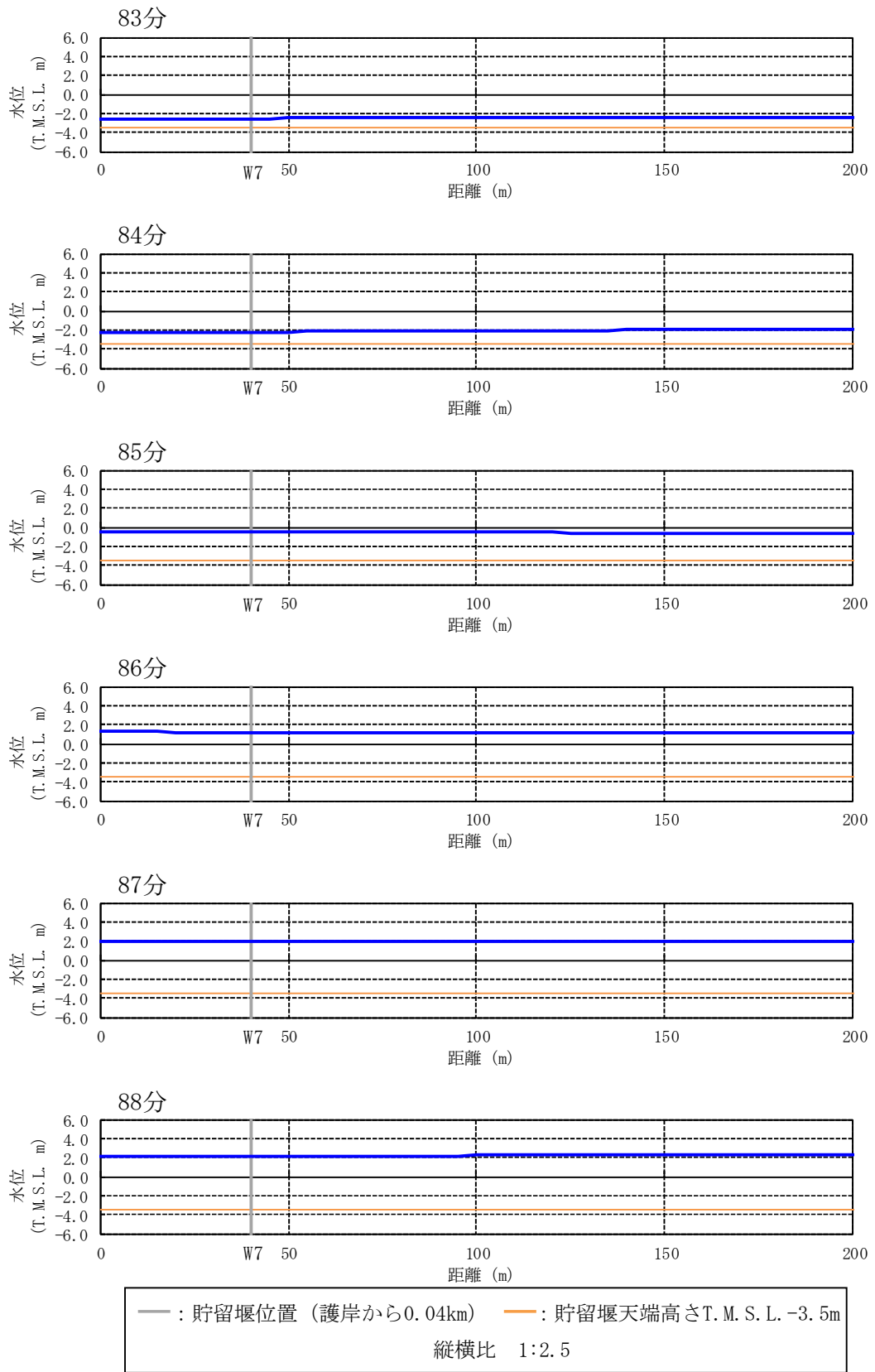


図 4.7 参 1-43 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [83-88 分, 0-200m を拡大]

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 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 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。

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。

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。

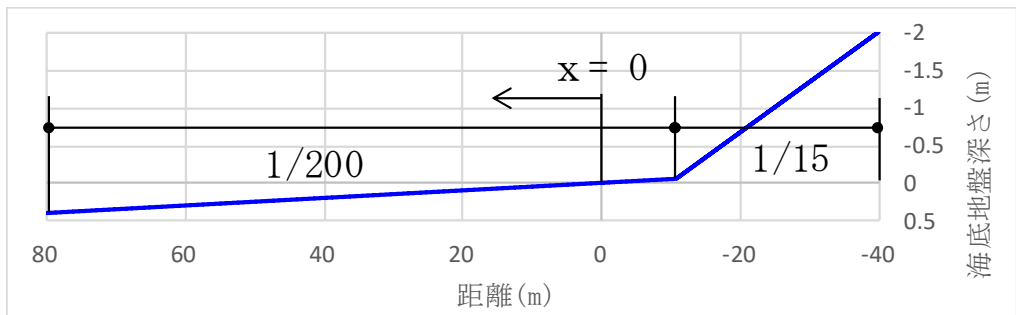


図 4.7 参 2-3-3 1次元再現解析用地形モデル

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。

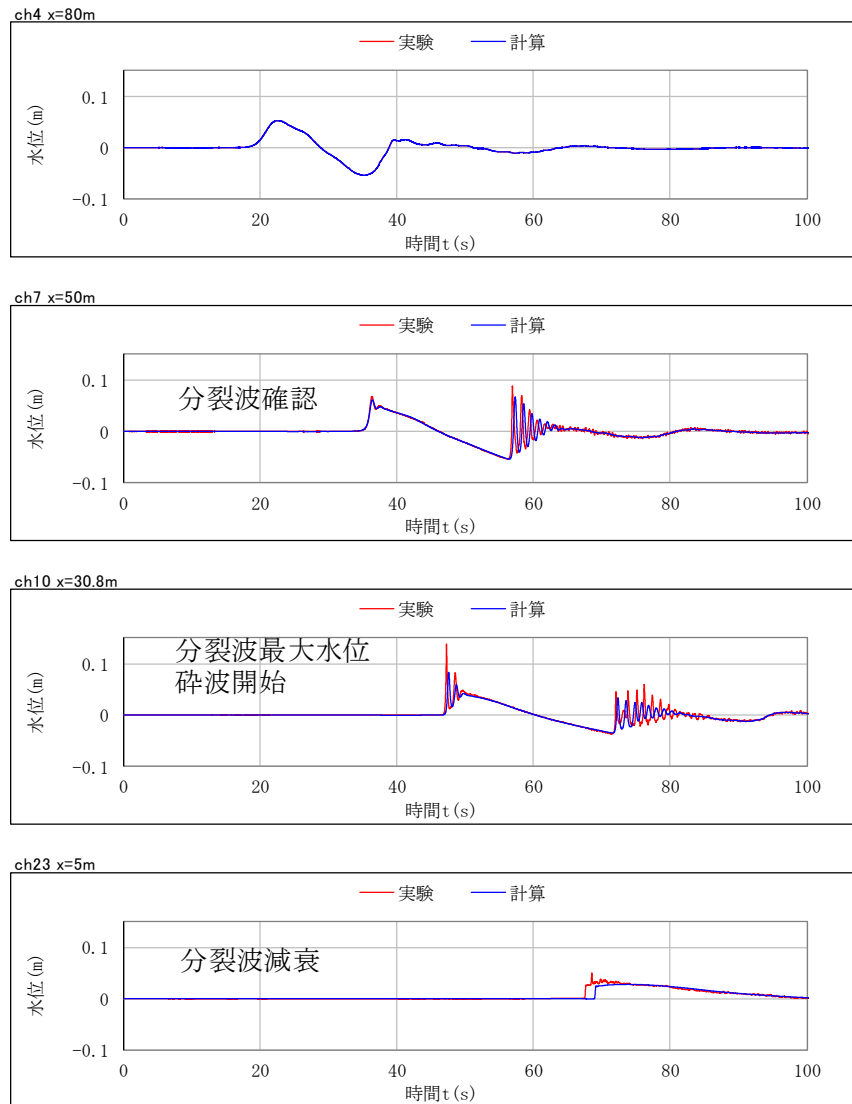


図 4.7 参 2-3-4 1次元解析結果と実験の比較

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。

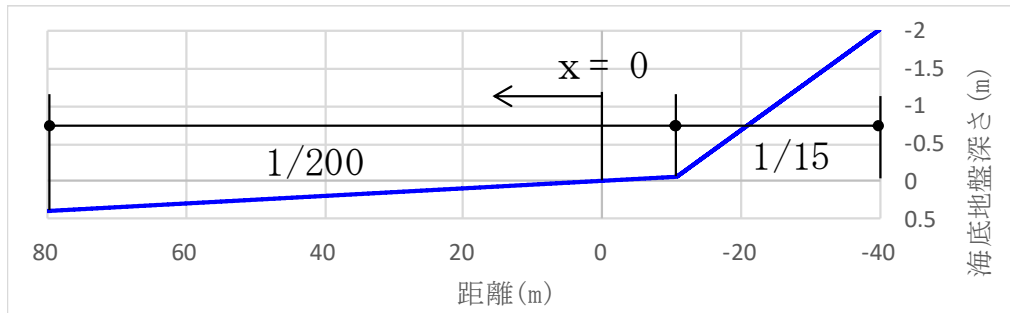


図 4.7 参 2-3-5 断面 2 次元再現解析用地形モデル

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。

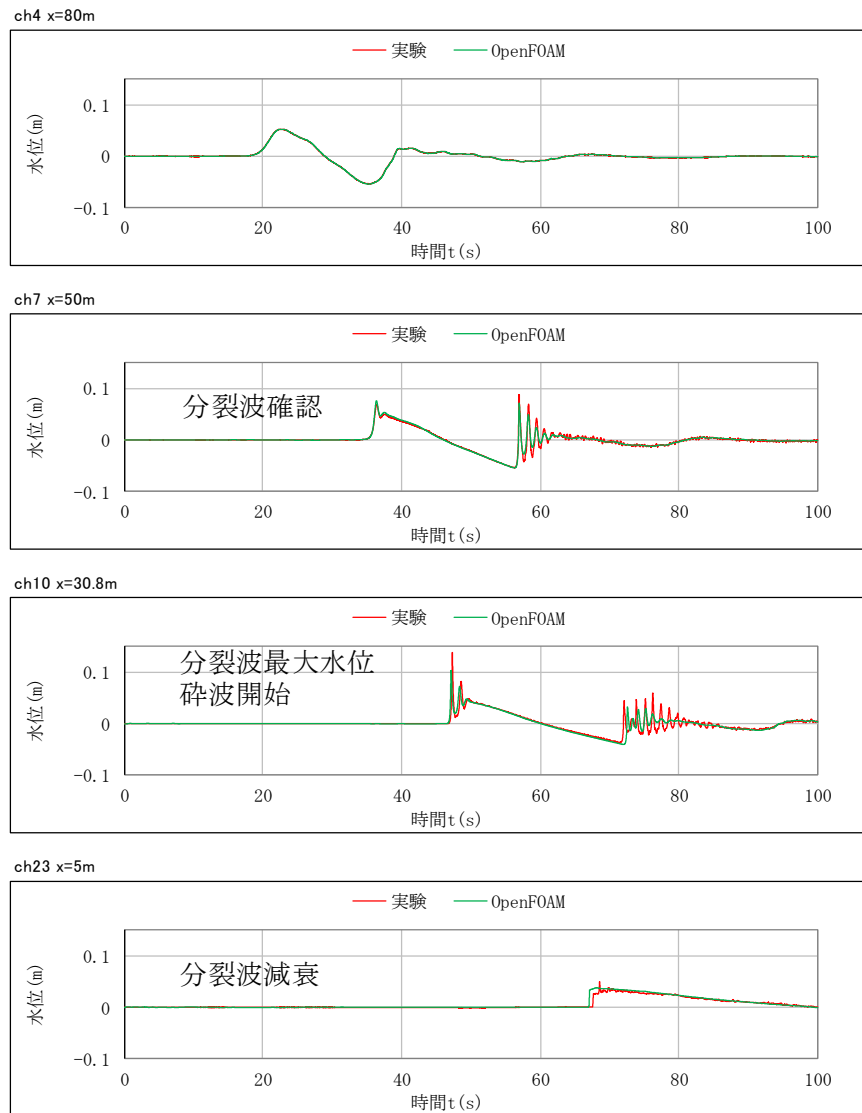


図 4.7 参 2-3-6 断面 2 次元解析結果と実験の比較

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

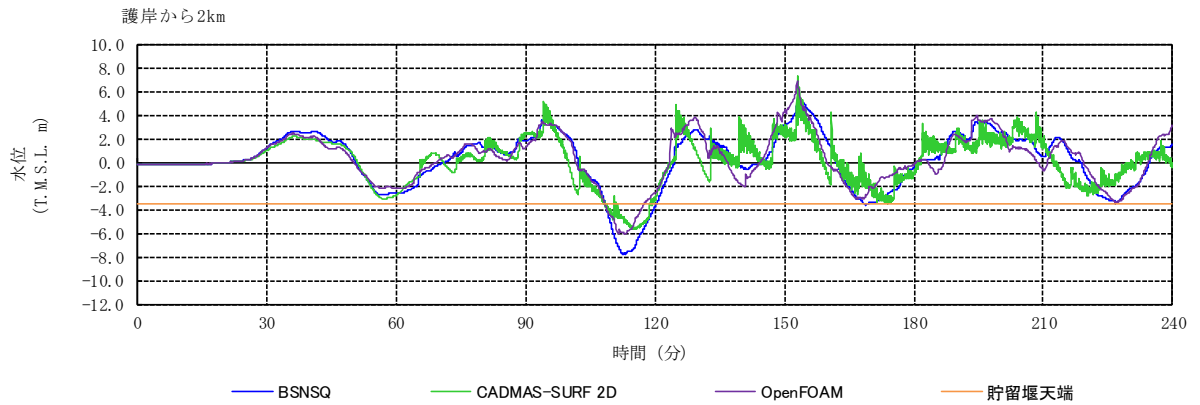
柏崎刈羽原子力発電所の海底地形で1次元モデルおよび断面2次元モデルによる津波水位解析を実施する。各解析コードの解析条件を表4.7参2-4-1、解析結果の比較を図4.7参2-4-1に示す。なお、地形モデルは全て添付資料1図4.7添1-3.5-1にて示した断面地形モデルの基準津波策定位置から護岸までの範囲を用いる。また、当該サイトの基準津波の特徴として、押波と引波が複数回繰り返す傾向があり、引波により露出した海水貯留堰に対する押波の形状の評価についての適用性も検討する必要があるため、水位低下が大きい基準津波2を対象とする。

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。

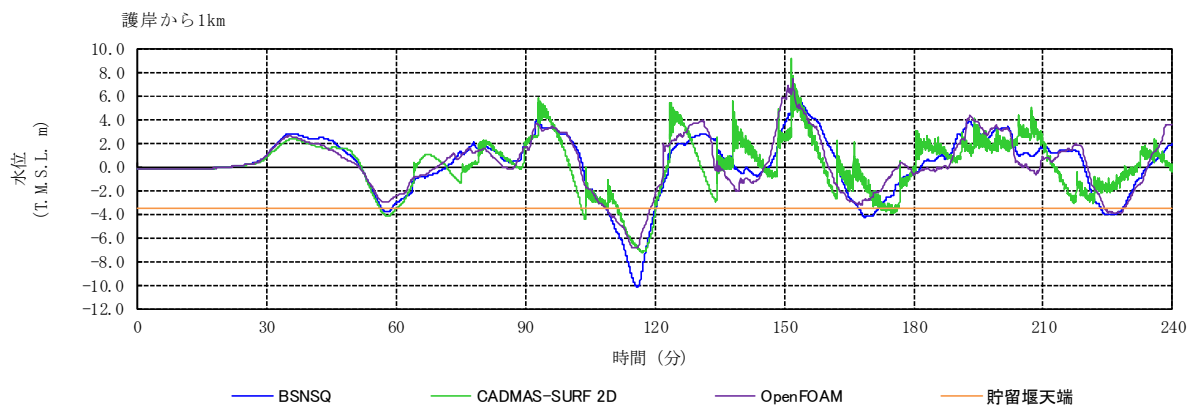
表 4.7 参 2-4-1 解析条件の比較

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

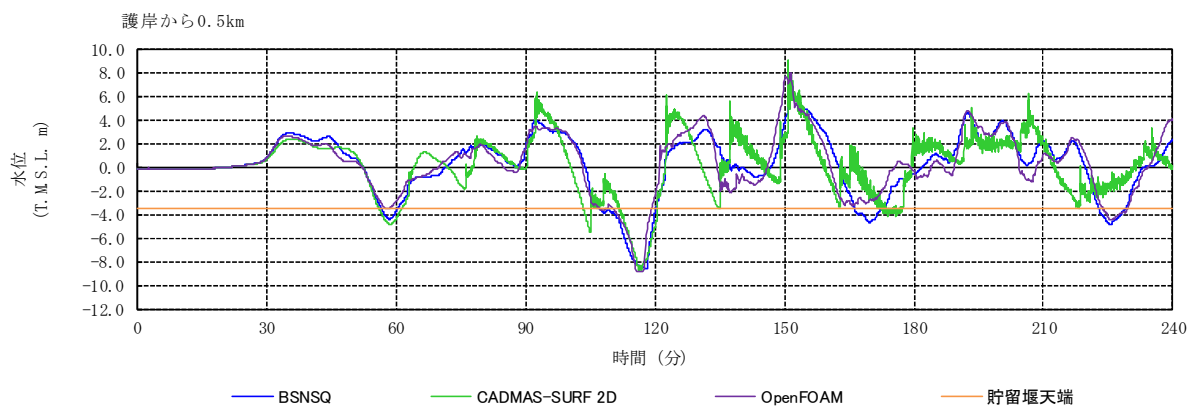
注記* : 5 条まとめ資料と同様に潮位のばらつきを考慮



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。

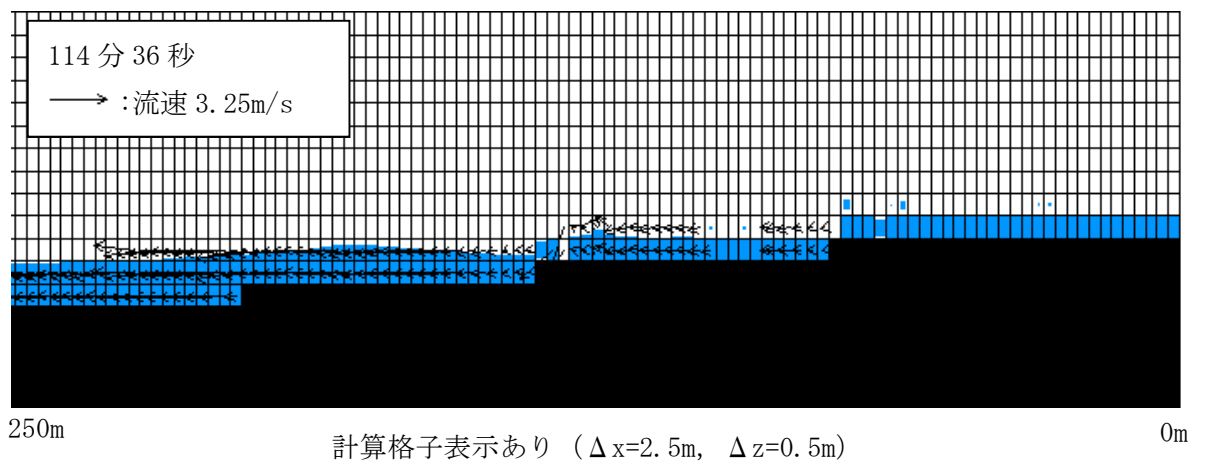
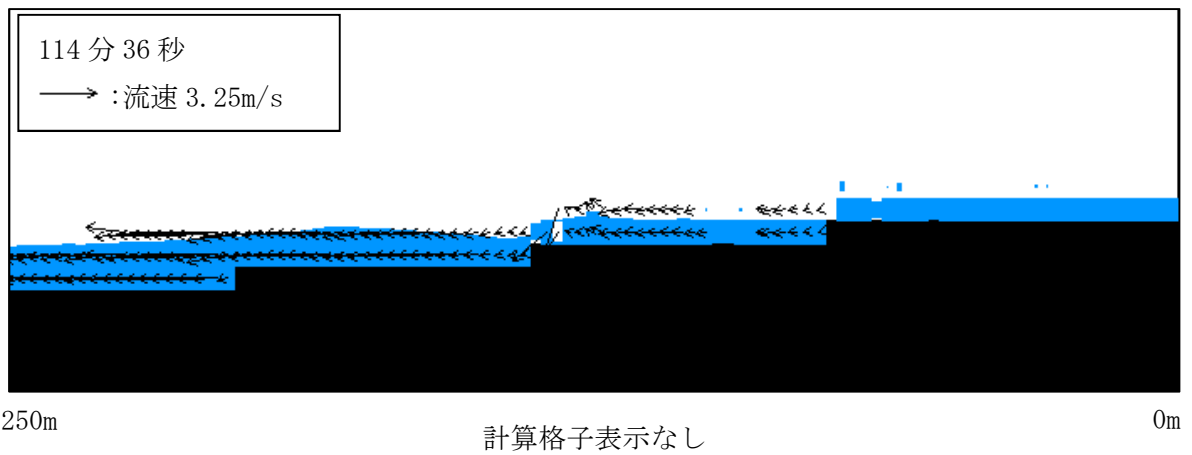


図 4.7 参 2-4-2 CADMAS-SURF 2Dによる解析結果の空間分布
 (引波時の護岸付近を拡大, 縦横比 1:10)

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。

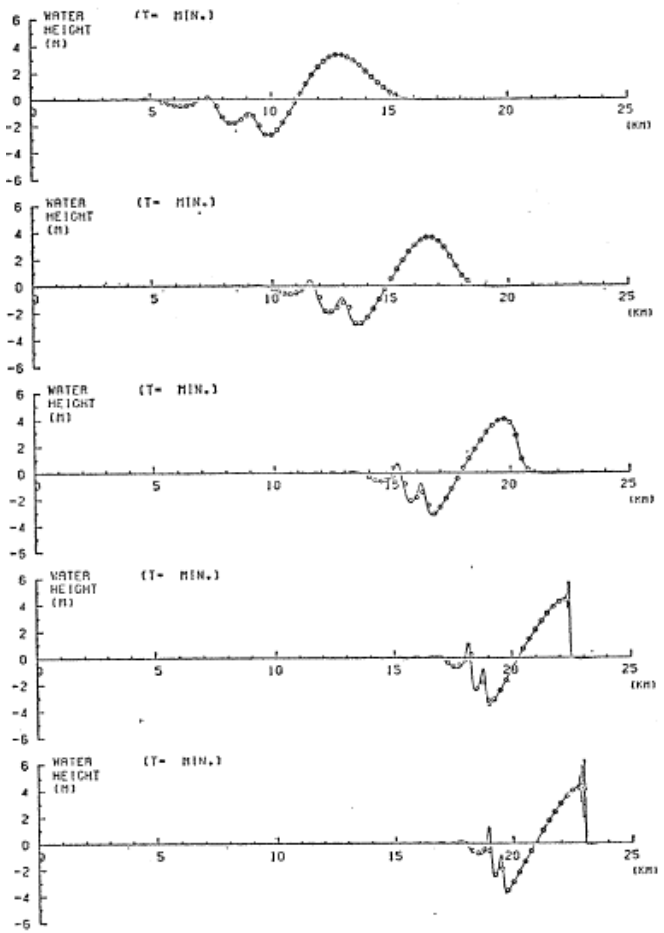
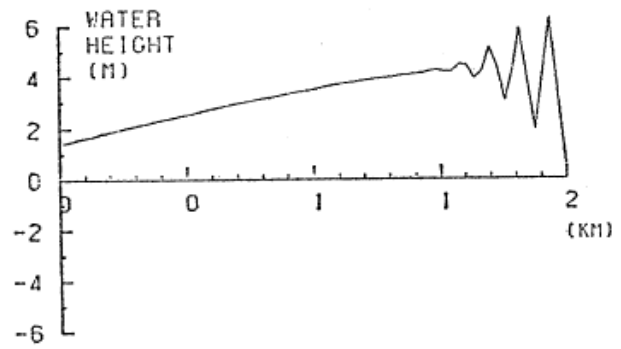
加えて、1次元解析は検証実績が豊富であることも踏まえ、柏崎刈羽原子力発電所においては解析コード「BSNSQ」による1次元解析の適用性が高いと判断した。なお、1次元解析によるソリトン分裂の発生の可能性について検討した実績を参考資料3に示す。

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。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。

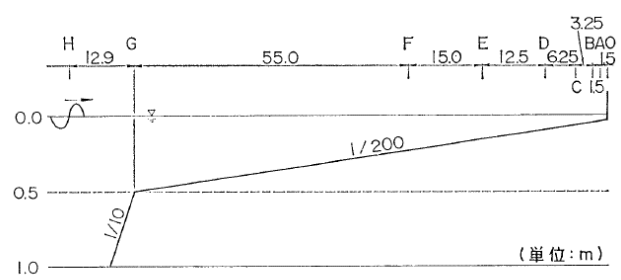


図-2 解析モデル

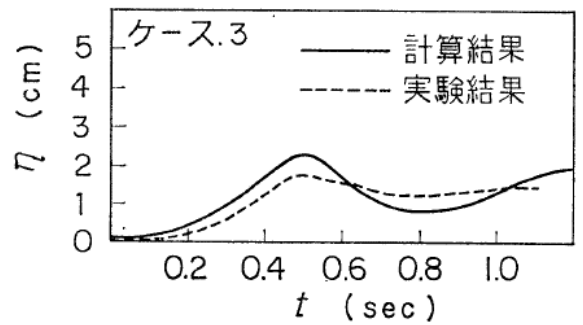
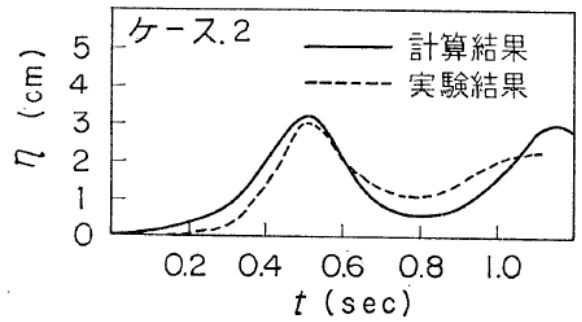
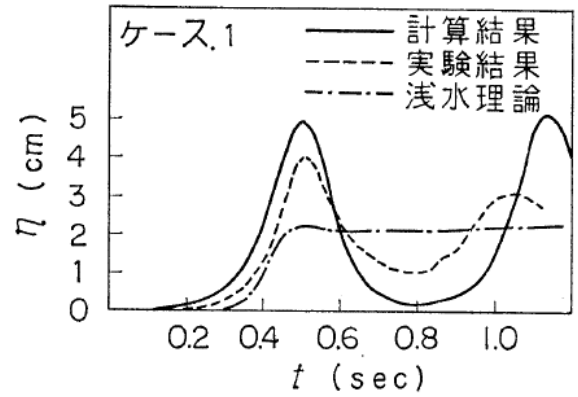


図-5 ソリトン波形の比較 (測定点C)

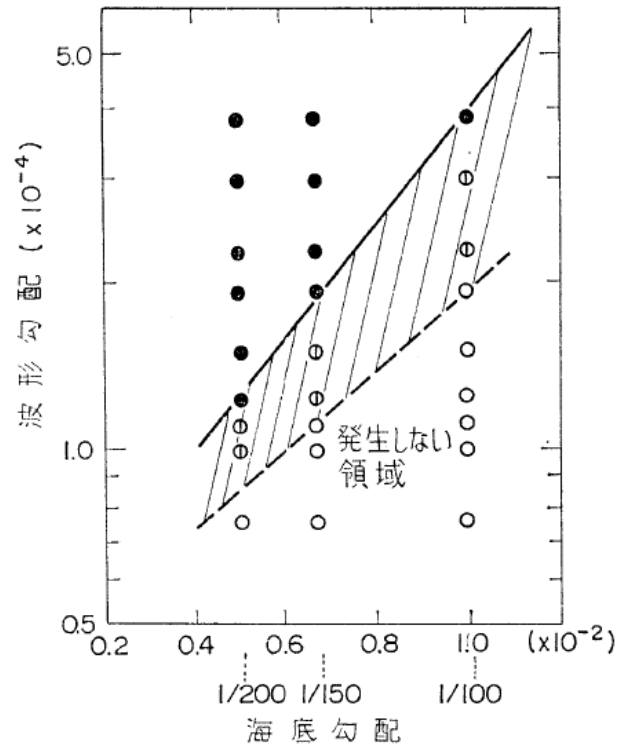


図-8 ソリトン分裂の発生条件の結果整理図

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、碎波を伴うような波の遡上を再現している。

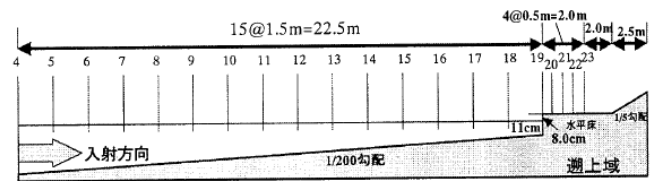
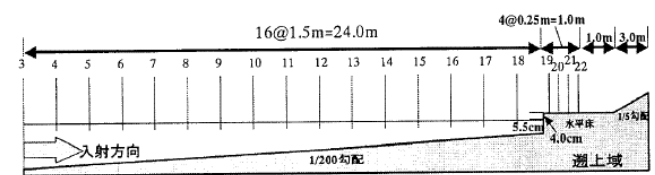
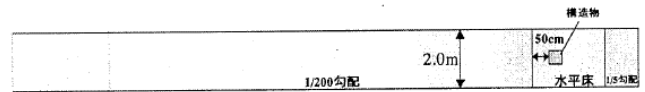


図-1 中型水路断面図と計測点



(1) 断面図



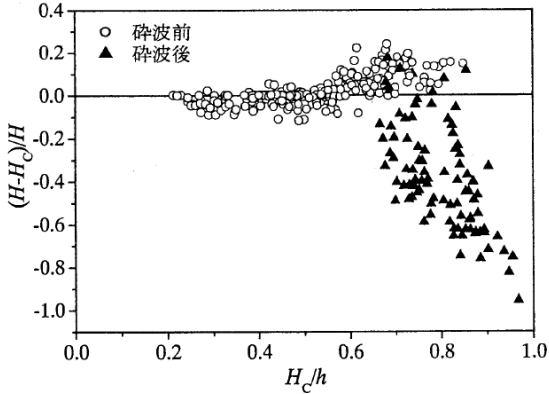
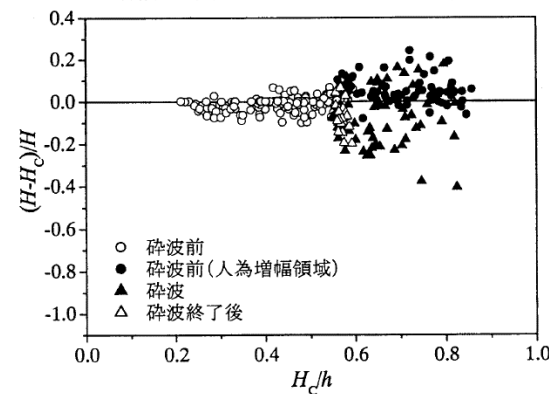
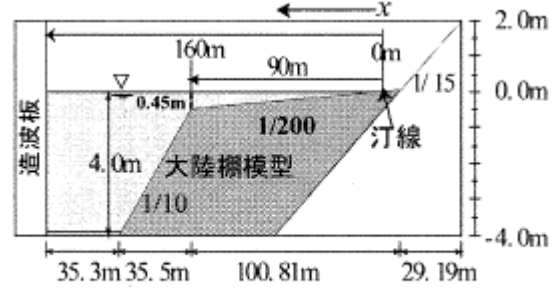
(2) 平面図

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)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>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)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>

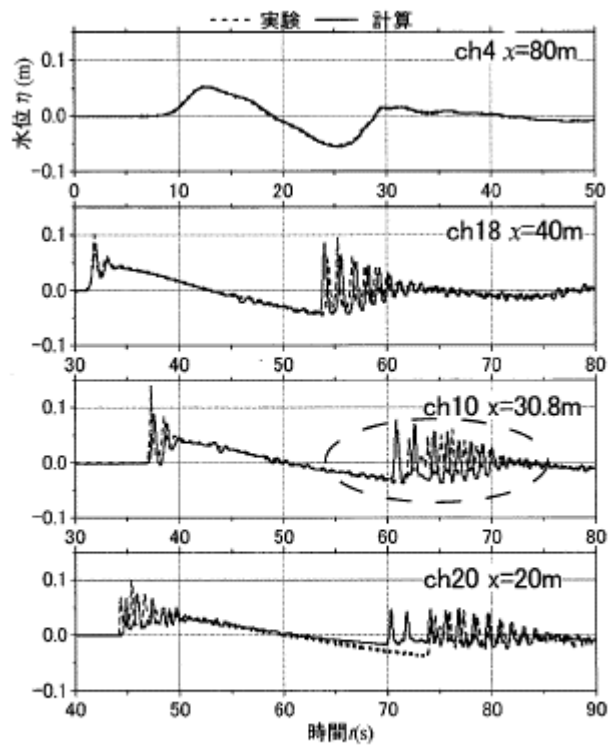


図-3 従来の数値計算モデルによる
数値計算と実験の比較 (No.024)

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。

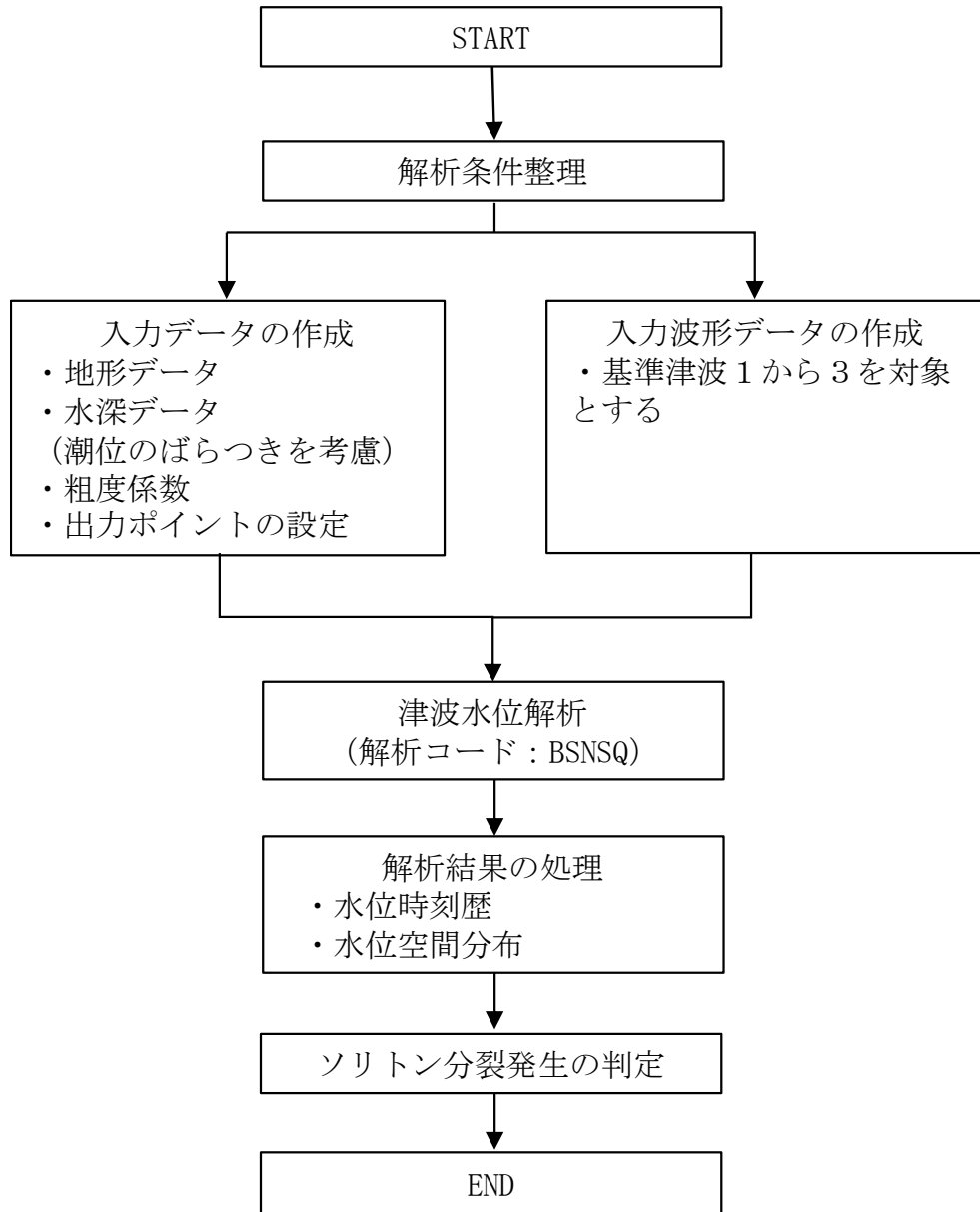


図 4.7 参 4-1 解析フローチャート

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。

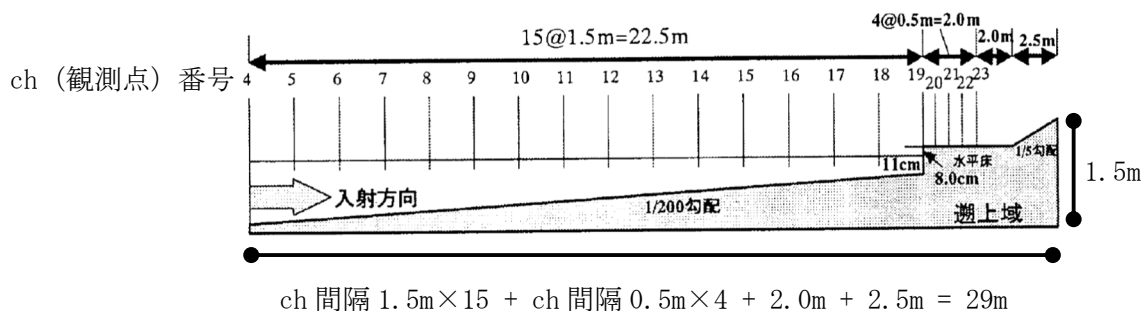


図 4.7 参 4-2 中型水路断面図と計測点 (大森ら(2000))¹⁾に加筆)

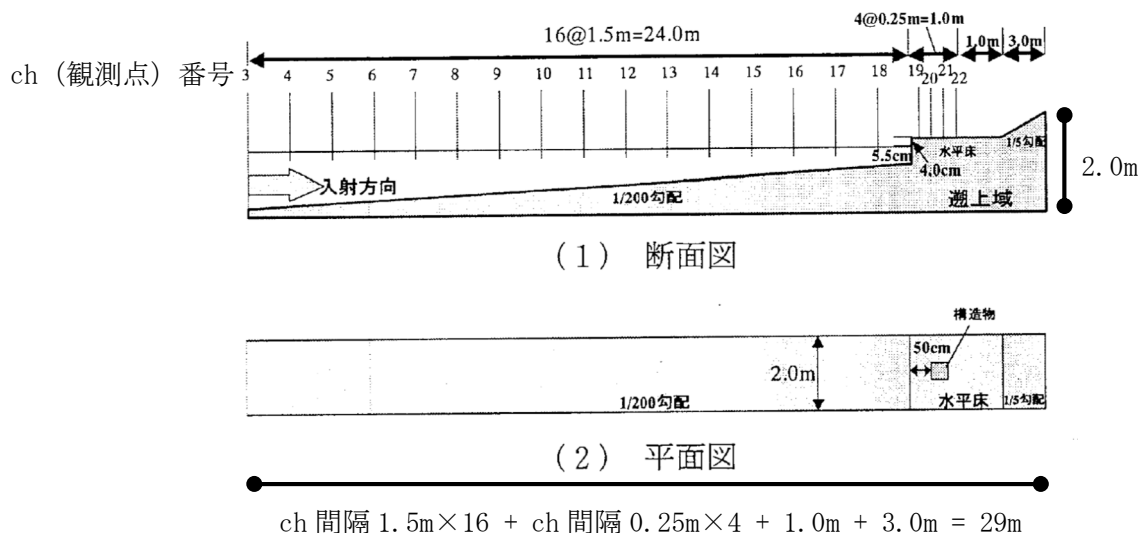


図 4.7 参 4-3 大型水路断面・平面図と計測点 (大森ら(2000))¹⁾に加筆)

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

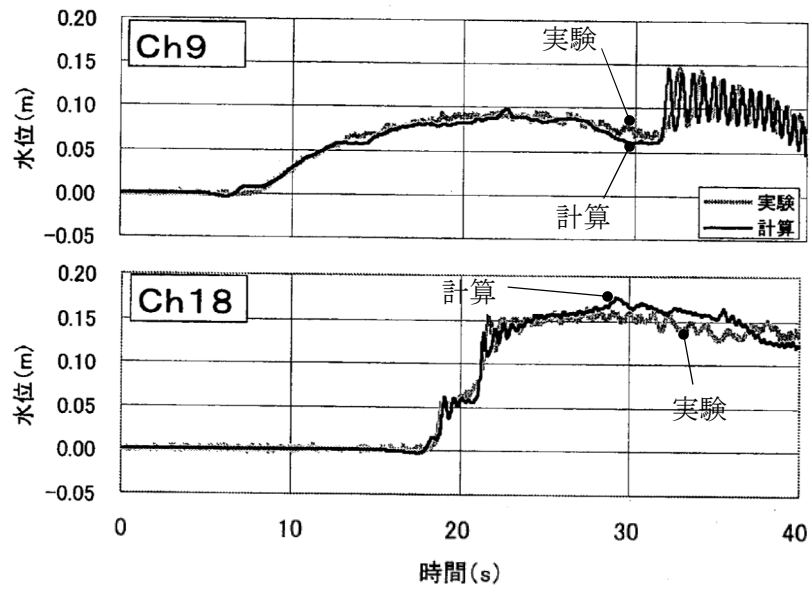


図 4.7 参 4-4 水時刻歴波形 (ケース 1-B) (大森ら(2000)¹⁾に加筆)

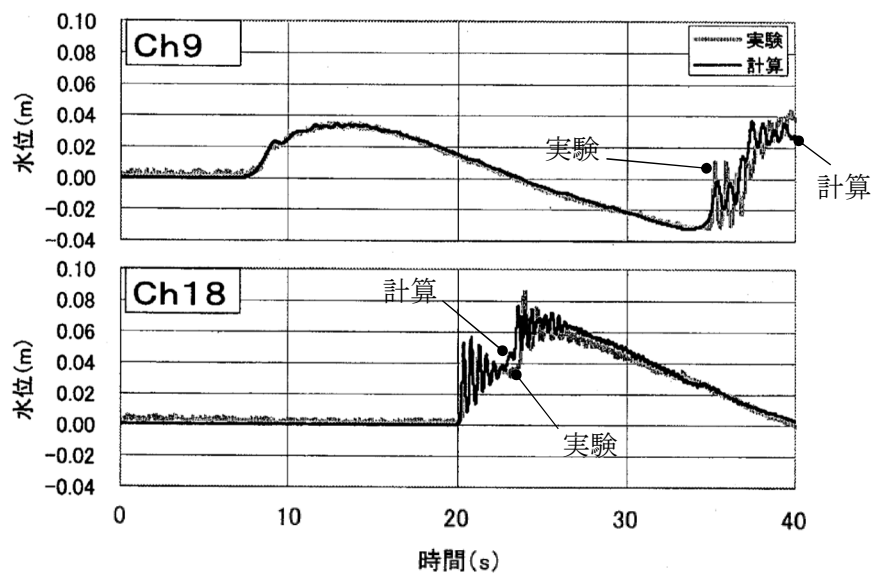


図 4.7 参 4-5 水位時刻歴波形 (ケース 2-B) (大森ら(2000)¹⁾に加筆)

(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

退避時気相部開放運用の実効性について

一部の車両に対して適用する退避時気相部開放運用について、「運用の前提条件」、「車両の水没に要する時間」及び「基準津波の特性」を整理することで運用の実効性を示す。

1. 運用の内容

1.1 運用の概要

大湊側護岸部に駐停車する車両については、津波警報発令時は車両による退避を基本とするが、地震の影響等により退避が困難と判断した場合は、気相部開放措置（窓を全開にする。扉を開放する。タンク蓋を開放する。）を施すならば車両を残置しての退避も可とする。

1.2 適用可能な対象車両

- ・ 中型トラック
- ・ ユニック
- ・ バキューム車

2. 運用の前提条件

車両の漂流物化防止の手段として本運用を適用する場合は、気相部開放措置を実行可能な作業者を常に車両の付近に配置する体制とする（ただし、車両操作等との兼務は可とする。）ことを前提とする。

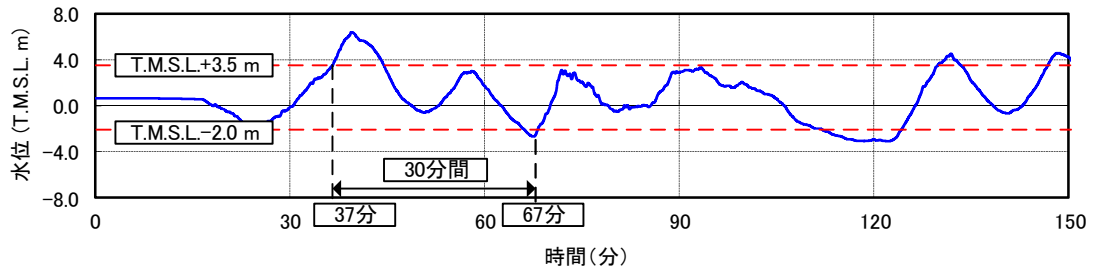
3. 車両の水没に要する時間

車両の水没時間については、日本自動車連盟（JAF）が実施している水没車からの脱出に関する試験映像から推定できる。当該試験は、乗用車の窓を閉め切った状態で入水させ、ある程度の時間が経過した後に窓を割り脱出を試みるという試験であるが、試験映像から窓を閉め切った状態でも概ね6分程度経過した時点で車内に大量の水が流れ込んでおり、窓を割った瞬間にさらに大量の水が車内に流入し、7分程度経過後には水没することが見て取れる。

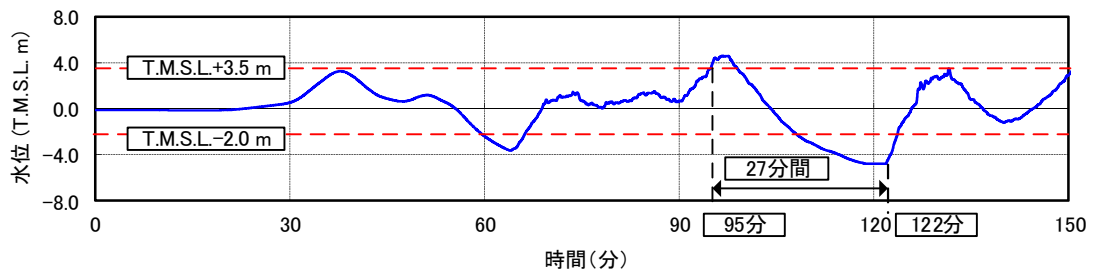
柏崎刈羽原子力発電所において、気相部開放運用による漂流物化防止を適用する車両は、工事用車両であり乗用車より水没しやすい形状であること、気相部開放運用により浸水初期から窓等が開放されている状況であることを考慮すると、さらに水没に要する時間は短いものとなる。

4. 基準津波の特性

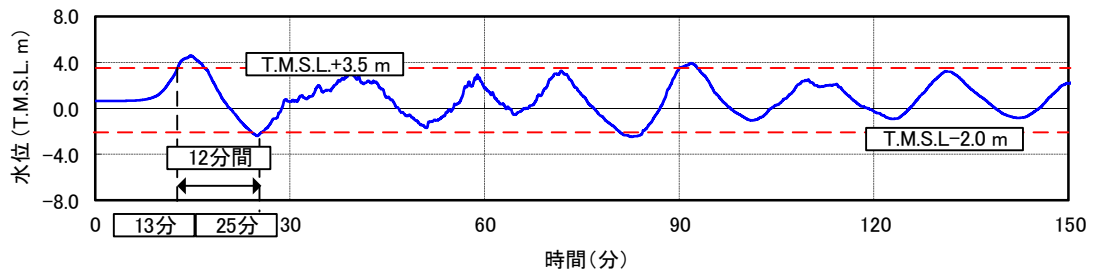
大湊側護岸部に駐停車する車両が津波時に海水貯留堰に衝突するためには、押波で車両が漂流を開始し、その後の引き波で海洋に流出し、その後の押波で衝突するというプロセスを踏む必要がある。基準津波の各波形を確認すると、大湊側護岸部の浸水深さが 50cm 以上（津波高さが T.M.S.L.+3.5m 以上）となってから、T.M.S.L.-2.0m*以下まで水位が下がった後に押波に切り替わるまでの周期は最短でも 12 分程度要する。（図 1 参照）



基準津波 1



基準津波 2



基準津波 3

図 1 基準津波の周期（揚陸栈橋における時刻歴波形）

5. 退避時気相部開放措置の有効性について

以上を考慮すると、車両の水没に要する時間と基準津波の特性から、退避時気相部開放措置を施すことにより、車両は衝突までの間に沈降することとなり、漂流物化の防止を図ることが可能である。

注記*： 車両の喫水を 1.5m とした場合に貯留堰に衝突する可能性がある水位

車両の密度評価の詳細について

1.1 概要

評価対象として抽出した車両の密度評価は、基本的に気相部と固相部についての体積を求めて車両重量を除することで、保守性を確保できる密度となるようにした。また、一部の車種については、退避時気相部開放運用を実施しない場合と実施した場合とについて密度を算定することで、退避時気相部開放運用の有効性を確認している。

評価の流れは以下に示すとおりであり、「2. 個別詳細評価」に車種ごとの密度評価詳細について、車両の例を用いて示す。

(1) 気相部体積の算出

運転席、荷室、タイヤ、燃料タンク、エアタンク及びその他タンクについては、ある程度の密閉性があり、車両が水没した状態であってもしばらくの間気相部を維持すると考えられることから、気相部としてその体積を考慮する。

体積の算定方法としては、仕様書（カタログデータ）等に容量の記載があるものについては当該容量を体積として設定する。上記データがないものについては、図面測定を実施し、体積を算出する。

(2) 固相部体積の算出

車両重量が既知であるため、部材の密度が算出できれば部材の体積が算出できる。ここで、部材の密度については、鉄以外の構成要素が比較的多いアルミウイング付トラックの場合でも鉄の重量構成が約 68%であること¹⁾を踏まえ、鉄の密度の 65% ($7.85 \times 65\% = 5.10$ [t/m³]) として設定した。

なお、「2. 個別詳細評価」においては、より保守的な評価として、部材密度を鉄の 50%の密度として算出した結果も参考評価として併せて示す。

(3) 車両密度の算出

退避時気相部開放運用を実施しない場合は、車両重量を上記(1)と(2)を合計した体積で除することで車両密度を算出する。

退避時気相部開放運用を実施する場合は、車両重量を上記(1)と(2)を合計した体積から開放する気相部の体積を減じた体積で除することで車両密度を算出する。

¹⁾ 山本ほか (2010) ; トラックの軽量化と材料技術の動向, 軽金属論文集 第 60 巻 第 11 号, P. 578-284

2. 個別詳細評価

2.1 小型建設用車両

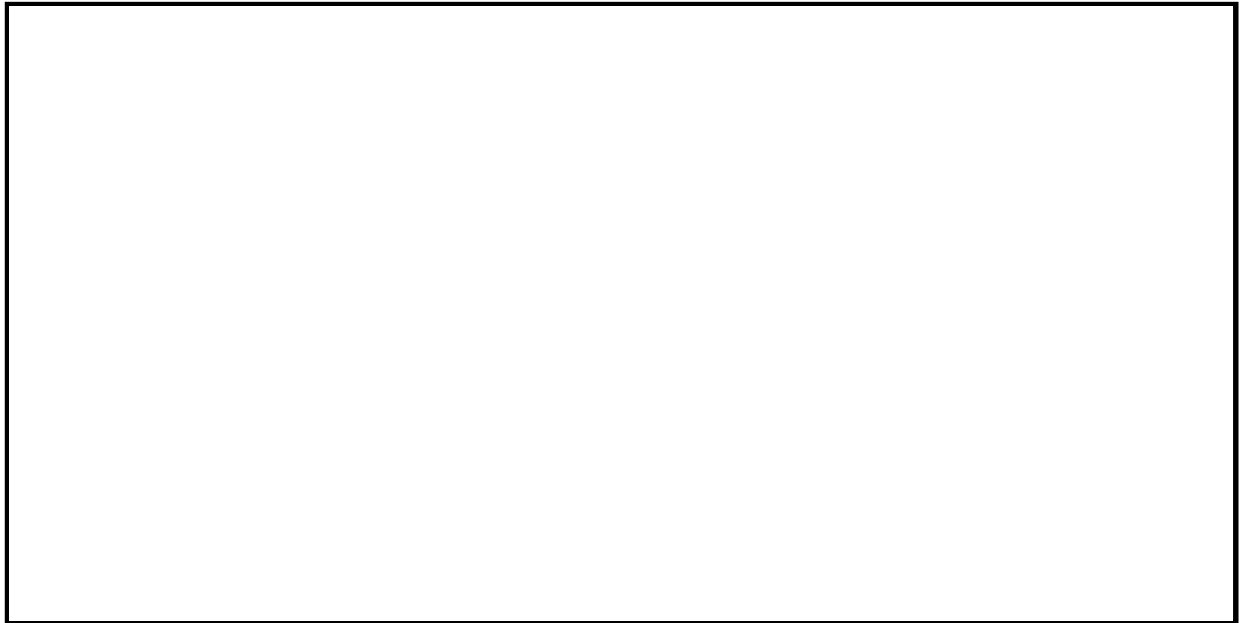


図-添3-1 スキッドローダーの構造例

図-添3-2 高所作業車の構造例

密度算定方法	③車両重量[t]	④部材密度[t/m ³]	⑤体積[m ³]	⑥除外体積[m ³]	車両密度[t/m ³]
気相部開放無	車検証等	7.85×0.65	①+②+③÷④	なし	③÷⑤

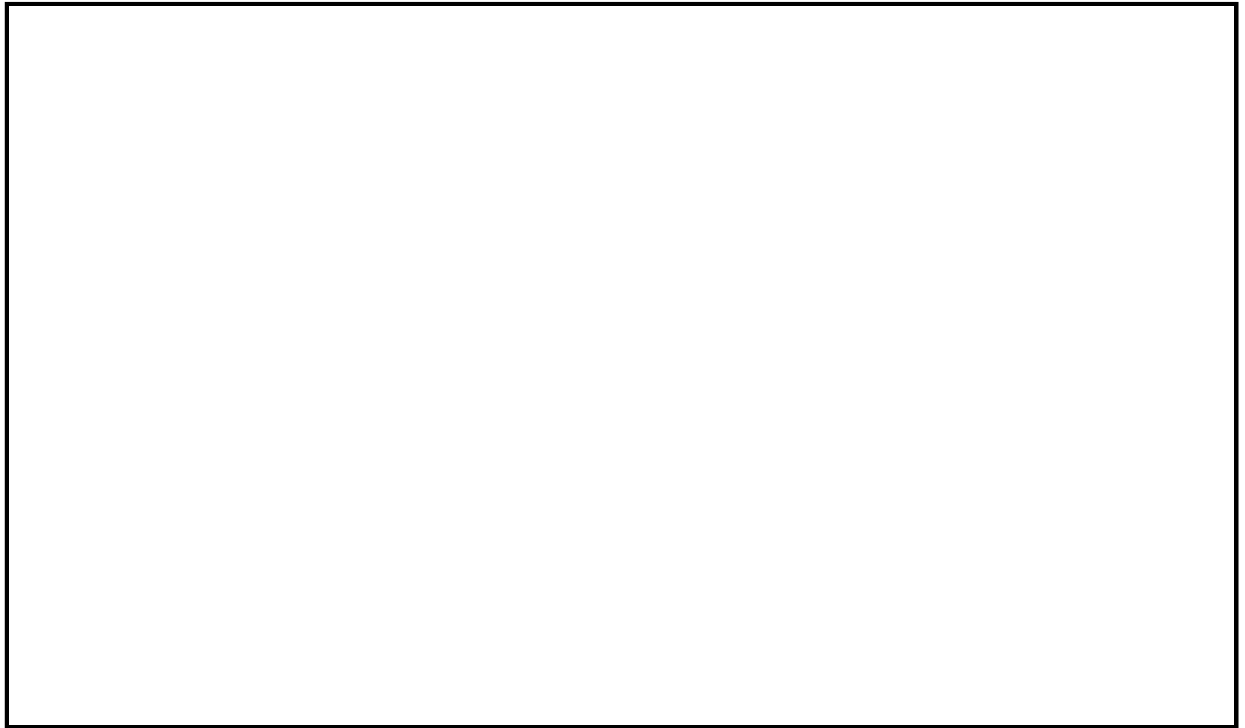
分類	図中番号	部位	体積算定方法
気相部	①	タイヤ	仕様書等より
	②	燃料タンク	仕様書等より
固相部	—	ボディ, キャビン, パワートレイン, 架装等	(車両重量) ÷ (鉄の密度×0.65)

<密度算定の例 (スキッドローダー) >

密度算定方法	体積[m ³]					車両密度 [t/m ³]
	①	②	③÷④	⑤	⑥	
気相部開放無	0.098	0.020	1.07 ÷ (7.85 × 0.65)	0.33	—	3.26
【参考評価】 気相部開放無	0.098	0.020	1.07 ÷ (7.85 ÷ 2)	0.39	—	2.73

図-添3-3 小型建設用車両 (スキッドローダー) の密度算定例

2.2 軽自動車



図一添 3-4 軽自動車の構造例

密度算定方法	④車両重量[t]	⑤部材密度[t/m ³]	⑥体積[m ³]	⑦除外体積[m ³]	車両密度[t/m ³]
気相部開放無	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④÷⑤	なし	④÷⑥
気相部開放有	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④÷⑤	①	④÷(⑥-⑦)

分類	図中番号	部位	体積算定方法
気相部	①	運転席+荷室(室内空間:ハッチング範囲)	図面測定値から計算
	②	タイヤ	仕様書等より
	③	燃料タンク	仕様書等より
固相部	—	ボディ, パワートレイン等	(車両重量) ÷ (鉄の密度×0.65)

<密度算定の例(軽自動車)>

密度算定方法	体積[m ³]						車両密度 [t/m ³]
	①	②	③	④÷⑤	⑥	⑦	
気相部開放無	3.07	0.09	0.027	0.83÷(7.85×0.65)	3.35	—	0.25
【参考評価】 気相部開放無	3.07	0.09	0.027	0.83÷(7.85÷2)	3.40	—	0.24

図一添 3-5 軽自動車の密度算定例

2.3 乗用車

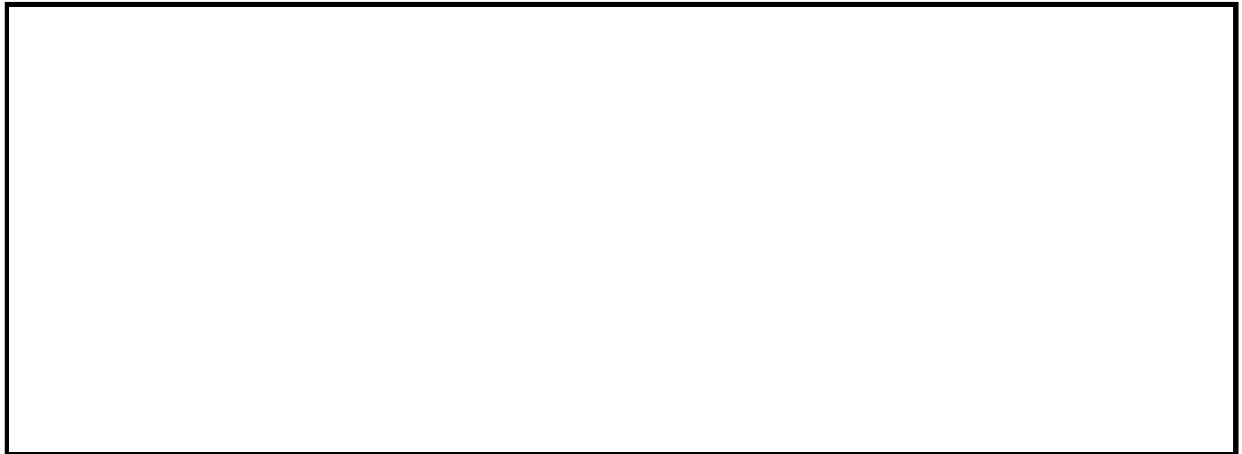


図-添 3-6 乗用車の構造例

密度算定方法	④車両重量[t]	⑤部材密度[t/m ³]	⑥体積[m ³]	⑦除外体積[m ³]	車両密度[t/m ³]
気相部開放無	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④÷⑤	なし	④÷⑥
気相部開放有	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④÷⑤	①	④÷(⑥-⑦)

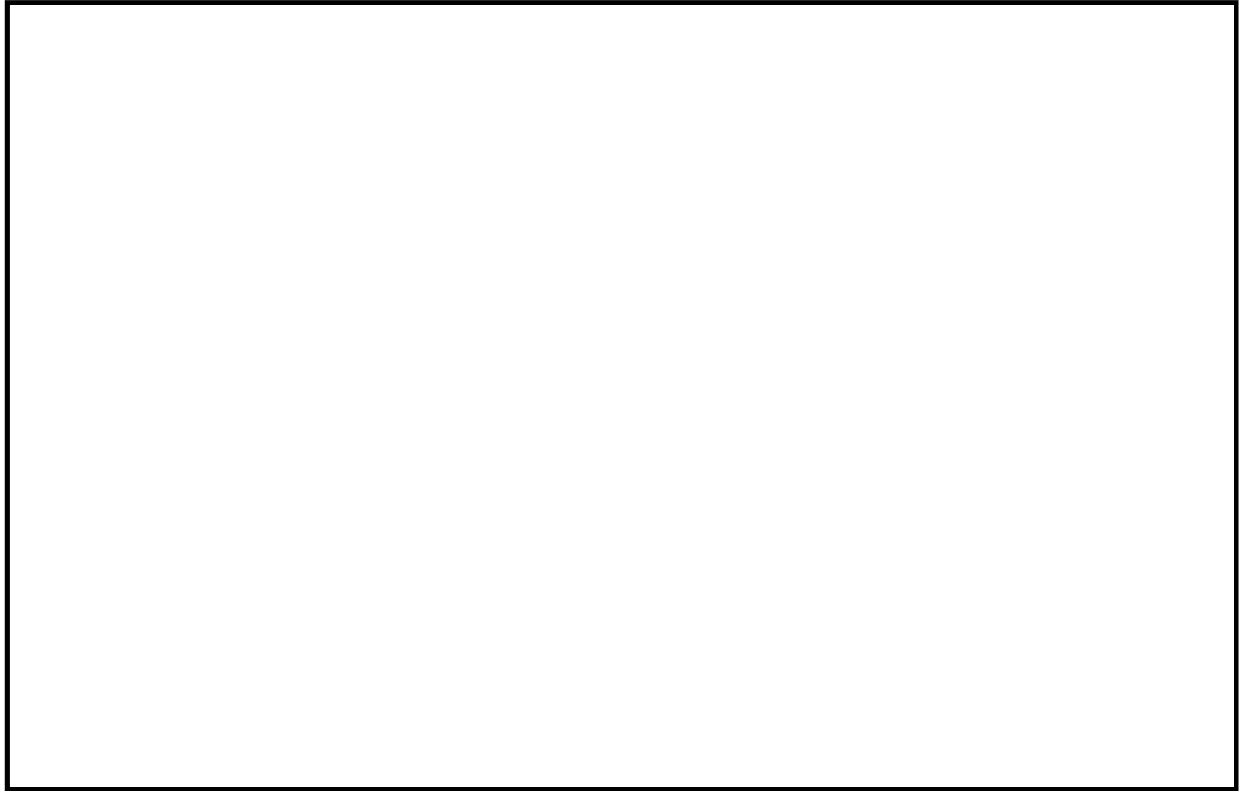
分類	図中番号	部位	体積算定方法
気相部	①	運転席+荷室(室内空間:ハッチング範囲)	図面測定値から計算
	②	タイヤ	仕様書等より
	③	燃料タンク	仕様書等より
固相部	—	ボディ, パワートレイン等	(車両重量) ÷ (鉄の密度×0.65)

<密度算定の例(乗用車)>

密度算定方法	体積[m ³]						車両密度 [t/m ³]
	①	②	③	④÷⑤	⑥	⑦	
気相部開放無	6.58	0.20	0.07	2.00÷(7.85×0.65)	7.24	—	0.28
【参考評価】 気相部開放無	6.58	0.20	0.07	2.00÷(7.85÷2)	7.36	—	0.27

図-添 3-7 乗用車の密度算定例

2.4 中型トラック



図一添3-8 4tトラックの構造例

密度算定方法	⑤車両重量[t]	⑥部材密度[t/m ³]	⑦体積[m ³]	⑧除外体積[m ³]	車両密度[t/m ³]
気相部開放無	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④+⑤÷⑥	なし	⑤÷⑦
気相部開放有	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④+⑤÷⑥	①	⑤÷(⑦-⑧)

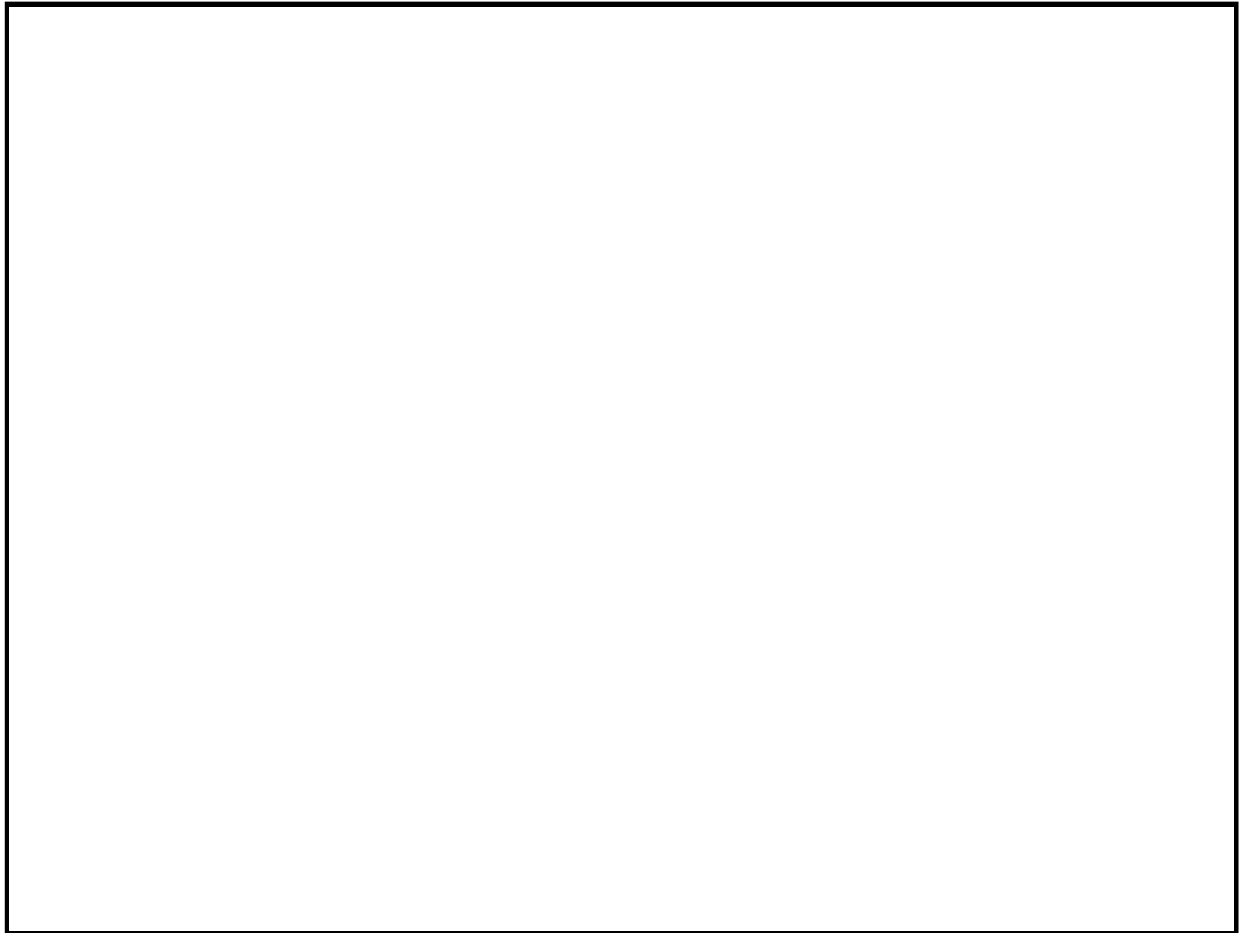
分類	図中番号	部位	体積算定方法
気相部	①	キャビン（室内空間：ハッチング範囲）	図面測定値から計算
	②	タイヤ	仕様書等より
	③	燃料タンク	仕様書等より
	④	エアタンク	仕様書等より
固相部	—	シャシ，パワートレイン，キャビン，架装等	(車両重量) ÷ (鉄の密度×0.65)

<密度算定の例（4tトラックの例）>

密度算定方法	体積[m ³]							車両密度 [t/m ³]
	①	②	③	④	⑤÷⑥	⑦	⑧	
気相部開放無	3.43	0.55	0.20	0.04	4.02 ÷ (7.85 × 0.65)	5.01	—	0.80
気相部開放有	3.43	0.55	0.20	0.04	4.02 ÷ (7.85 × 0.65)	5.01	3.43	2.55
【参考評価】 気相部開放有	3.43	0.55	0.20	0.04	4.02 ÷ (7.85 ÷ 2)	5.25	3.43	2.20

図一添3-9 中型トラック（4tトラック）の密度算定例

2.5 ユニック



図一添 3-10 4t ユニックの構造例

密度算定方法	⑤車両重量[t]	⑥部材密度[t/m ³]	⑦体積[m ³]	⑧除外体積[m ³]	車両密度[t/m ³]
気相部開放無	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④+⑤÷⑥	なし	⑤÷⑦
気相部開放有	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④+⑤÷⑥	①	⑤÷(⑦-⑧)

分類	図中番号	部位	体積算定方法
気相部	①	キャビン (室内空間：ハッチング範囲)	図面測定値から計算
	②	タイヤ	仕様書等より
	③	燃料タンク	仕様書等より
	④	エアタンク	仕様書等より
固相部	—	シャシ, パワートレイン, キャビン, 架装等	(車両重量) ÷ (鉄の密度×0.65)

<密度算定の例 (4t ユニック) >

密度算定方法	体積[m ³]							車両密度 [t/m ³]
	①	②	③	④	⑤÷⑥	⑦	⑧	
気相部開放無	3.43	0.67	0.10	0.04	5.11 ÷ (7.85×0.65)	5.25	—	0.97
気相部開放有	3.43	0.67	0.10	0.04	5.11 ÷ (7.85×0.65)	5.25	3.43	2.81
【参考評価】 気相部開放有	3.43	0.67	0.10	0.04	5.11 ÷ (7.85÷2)	5.55	3.43	2.41

図一添 3-11 ユニック (4t ユニック) の密度算定例

2.6 大型トラック

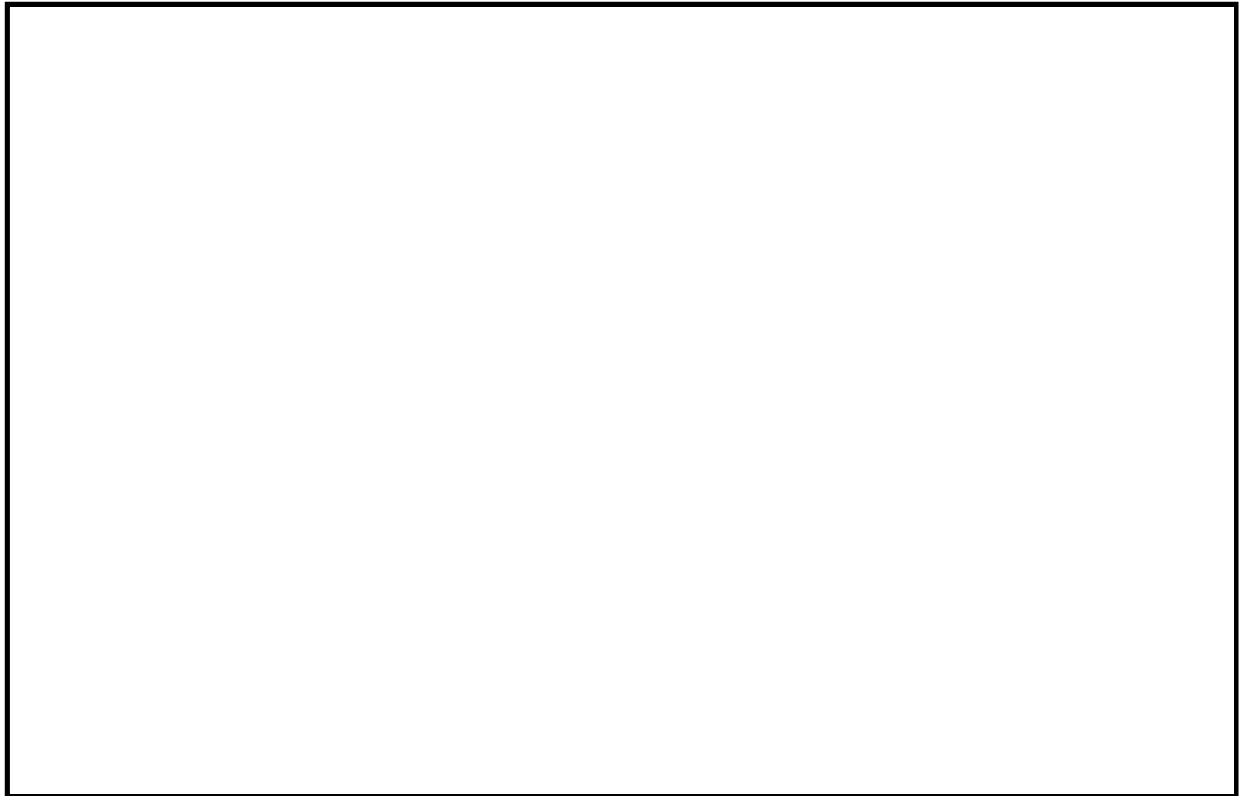


図-添3-12 15tトラックの構造例

密度算定方法	⑤車両重量[t]	⑥部材密度[t/m ³]	⑦体積[m ³]	⑧除外体積[m ³]	車両密度[t/m ³]
気相部開放無	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④+⑤÷⑥	なし	⑤÷⑦
気相部開放有	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④+⑤÷⑥	①	⑤÷(⑦-⑧)

分類	図中番号	部位	体積算定方法
気相部	①	キャビン (室内空間：ハッチング範囲)	図面測定値から計算
	②	タイヤ	仕様書等より
	③	燃料タンク	仕様書等より
	④	エアタンク	仕様書等より
固相部	—	シャシ, パワートレイン, キャビン, 架装等	(車両重量) ÷ (鉄の密度×0.65)

<密度算定の例 (15tトラックの例) >

密度算定方法	体積[m ³]							車両密度 [t/m ³]
	①	②	③	④	⑤÷⑥	⑦	⑧	
気相部開放無	3.42	1.18	0.40	0.20	9.70 ÷ (7.85 × 0.65)	7.11	—	1.36
【参考評価】 気相部開放無	3.42	1.18	0.40	0.20	9.70 ÷ (7.85 ÷ 2)	7.68	—	1.26

図-添3-13 大型トラック (15tトラック) の密度算定例

2.7 バキューム車



図一添 3-14 バキューム車の構造例

密度算定方法	⑦車両重量[t]	⑧部材密度[t/m ³]	⑨体積[m ³]	⑩除外体積[m ³]	車両密度[t/m ³]
気相部開放無	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④+⑤+⑥+⑦÷⑧	なし	⑦÷⑨
気相部開放有	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④+⑤+⑥+⑦÷⑧	①+⑤	⑦÷(⑨-⑩)

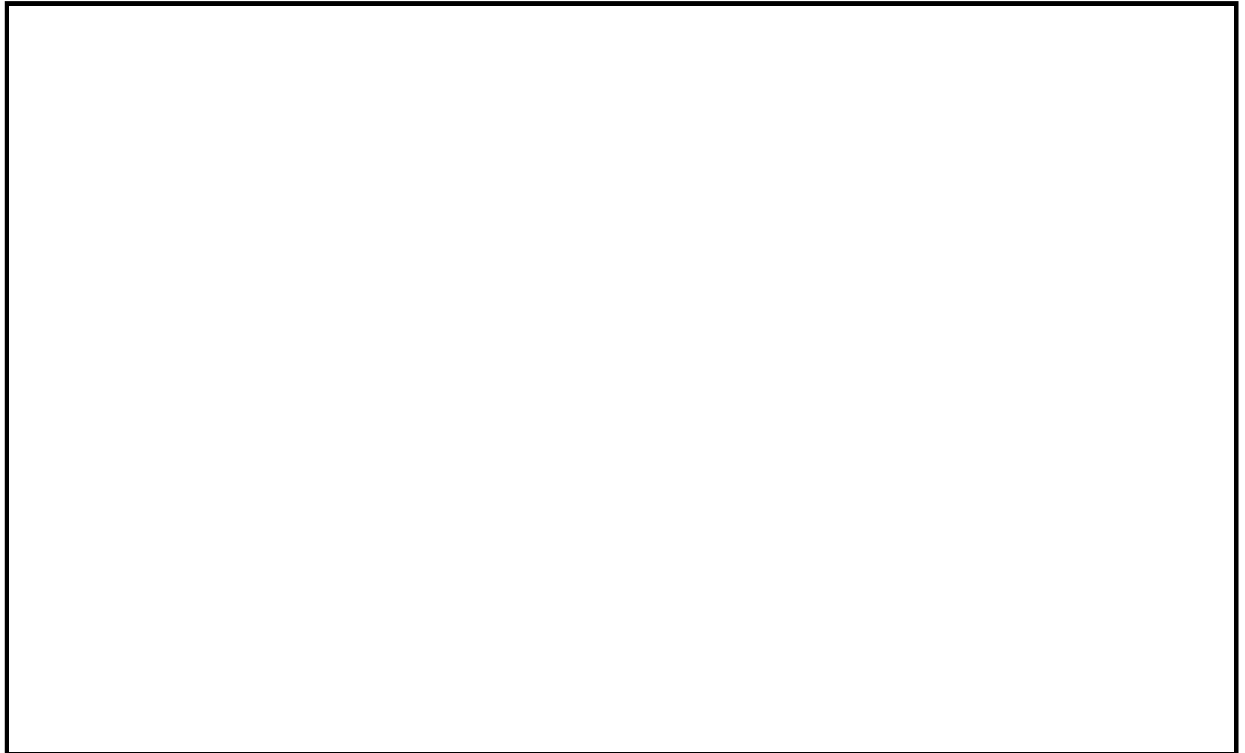
分類	図中番号	部位	体積算定方法
気相部	①	キャビン (室内空間：ハッチング範囲)	図面測定値から計算
	②	タイヤ	仕様書等より
	③	燃料タンク	仕様書等より
	④	エアタンク	仕様書等より
	⑤	バキュームタンク (メインタンク)	仕様書等より
	⑥	バキュームタンク (補助タンク)	図面測定値から計算
固相部	—	シャシ, パワートレイン, キャビン, 架装等	(車両重量) ÷ (鉄の密度×0.65)

<密度算定の例 (6t バキューム車の例) >

密度算定方法	体積[m ³]									車両密度 [t/m ³]
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦÷⑧	⑨	⑩	
気相部開放無	3.43	0.64	0.10	0.04	4.00	2.50	6.18 ÷ (7.85 × 0.65)	11.92	—	0.51
気相部開放有	3.43	0.64	0.10	0.04	4.00	2.50	6.18 ÷ (7.85 × 0.65)	11.92	7.43	1.37
【参考評価】 気相部開放有	3.43	0.64	0.10	0.04	4.00	2.50	6.18 ÷ (7.85 ÷ 2)	12.29	7.43	1.27

図一添 3-15 バキューム車の密度算定例

2.8 大型建設用車両



図一添 3-16 4tトラック式高所作業車の構造例

密度算定方法	⑥車両重量[t]	⑦部材密度[t/m ³]	⑧体積[m ³]	⑨除外体積[m ³]	車両密度[t/m ³]
気相部開放無	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④+⑤+⑥÷⑦	なし	⑥÷⑧
気相部開放有	車検証等	7.85×0.65	①+②+③+④+⑤+⑥÷⑦	①	⑥÷(⑧-⑨)

分類	図中番号	部位	体積算定方法
気相部	①	キャビン（室内空間：ハッチング範囲）	図面測定値から計算
	②	タイヤ	仕様書等より
	③	燃料タンク	仕様書等より
	④	エアタンク	仕様書等より
	⑤	作動油タンク	仕様書等より
固相部	—	シャシ，パワートレイン，キャビン，架装等	(車両重量) ÷ (鉄の密度×0.65)

<密度算定の例（4tトラック式高所作業車の例）>

密度算定方法	体積[m ³]								車両密度 [t/m ³]
	①	②	③	④	⑤	⑥÷⑦	⑧	⑨	
気相部開放無	3.43	0.55	0.20	0.04	0.11	7.32 ÷ (7.85 × 0.65)	5.77	—	1.26
【参考評価】 気相部開放無	3.43	0.55	0.20	0.04	0.11	7.32 ÷ (7.85 ÷ 2)	6.20	—	1.18

図一添 3-17 大型建設用車両（4tトラック式高所作業車）の密度算定例

漂流物衝突荷重の算定過程

- (1) 船舶（発電所付近で航行不能となった船舶の道路橋示方書（2002）による評価）

$$\begin{aligned}
 P &= 0.1WU \\
 &= 0.1 \times 15[\text{t}] \times 9.80665[\text{m/s}^2] \times 6.0[\text{m/s}] \\
 &= 88.2[\text{kN}] \cong 89[\text{kN}]
 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 P &: \text{衝突力} [\text{kN}] \\
 W &: \text{流送物の重量} (=15 \text{ t}) \\
 U &: \text{表面流速} (=6.0 \text{ m/s})
 \end{aligned}$$

- (2) 車両（軽自動車の FEMA（2012）による評価）

$$\begin{aligned}
 F_i &= 1.3u_{\max}\sqrt{km_d(1+c)} \\
 &= 1.3 \times 6.0[\text{m/s}] \times \sqrt{2.04 \times 10^6[\text{N/m}] \times 1000 \times (1+1.0)} \\
 &= 498.2[\text{kN}] \cong 499[\text{kN}]
 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 F_i &: \text{衝突力} [\text{kN}] \\
 u_{\max} &: \text{漂流物を運ぶ流体の最大流速} (=6.0 \text{ m/s}) \\
 k &: \text{漂流物の有効軸剛性} [\text{N/m}] \text{（保守的に高畠ら（2015）により求められる } k_3 \text{（} 2.04 \times 10^6 [\text{N/m}] \text{）を用いる。）} \\
 m_d &: \text{漂流物の質量} (=1000 \text{ kg}) \\
 c &: \text{付加質量係数} (=1.0)
 \end{aligned}$$

- (3) 植生（流木の道路橋示方書（2002）による評価）

$$\begin{aligned}
 P &= 0.1WU \\
 &= 0.1 \times 0.140[\text{t}] \times 9.80665[\text{m/s}^2] \times 6.0[\text{m/s}] \\
 &= 0.8[\text{kN}] \cong 1[\text{kN}]
 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 P &: \text{衝突力} [\text{kN}] \\
 W &: \text{流送物の重量} (=0.14 \text{ t}) \\
 U &: \text{表面流速} (=6.0 \text{ m/s})
 \end{aligned}$$

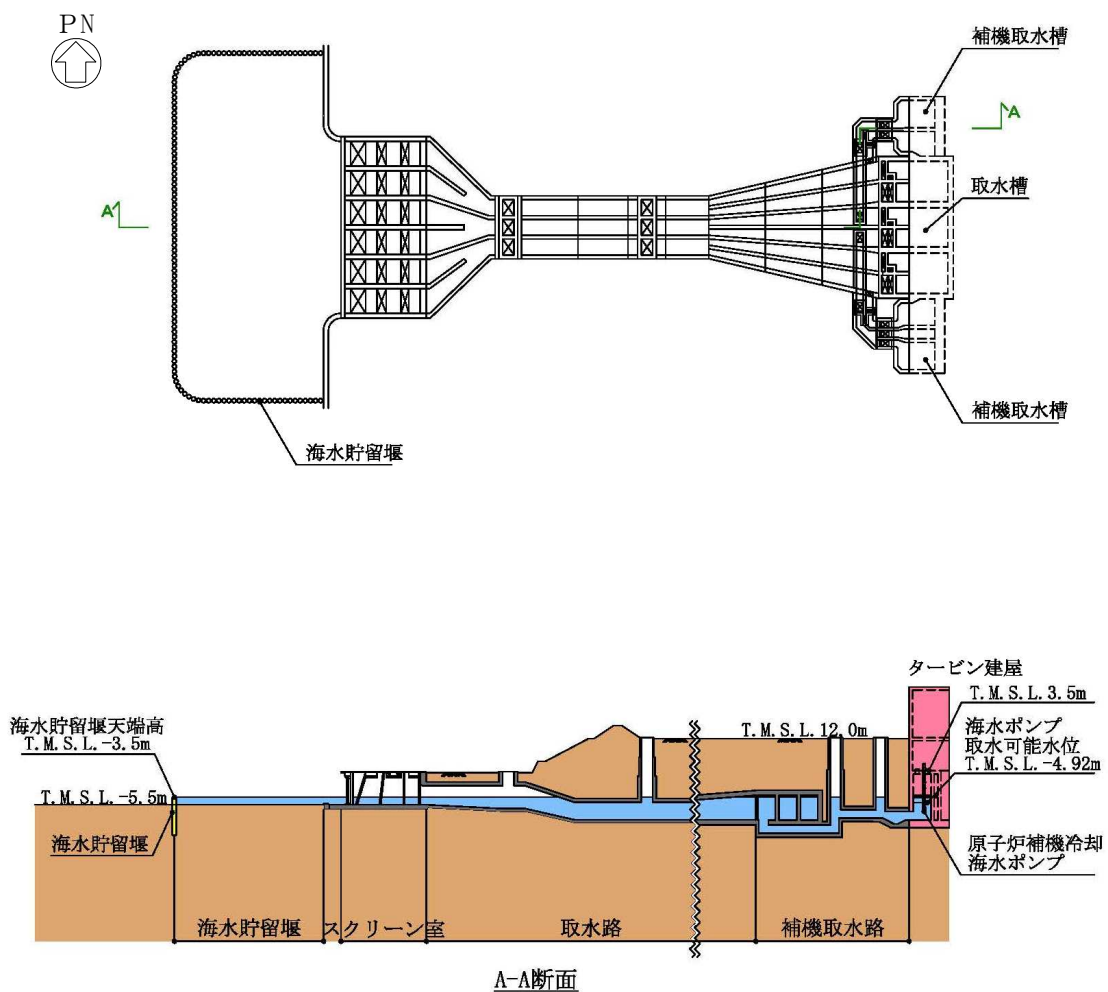
5.3 スロッシングによる海水貯留堰貯水量に対する影響評価について

5.3 スロッシングによる海水貯留堰貯水量に対する影響評価について

(1) 概要

7号機海水貯留堰内の貯水に対して、スロッシングによる溢水量が海水貯留堰貯水量へ与える影響を評価する。具体的な評価方法は、津波引波時の余震によるスロッシングによって発生する海水貯留堰からの溢水量を算定し、海水貯留堰の有効容量（約8000m³、原子炉補機冷却海水ポンプの運転継続可能時間約44分）から溢水量を減じた場合における原子炉補機冷却海水ポンプの運転継続可能時間が引波の継続時間（海水貯留堰外側の海水位が海水貯留堰天端を下回る時間約16分）に対して十分に余裕があることを確認する。また、スクリーン室奥における水位時刻歴を確認し、原子炉補機冷却海水ポンプの取水可能限界水位を下回っていないことを確認する。

海水貯留堰の平面図及び断面図を図5.3-1に、海水貯留堰鳥瞰図を図5.3-2に示す。また、補機取水槽内の水位時刻歴を図5.3-3に示す。



注：東京湾平均海面（以下、「T.M.S.L.」という。）

図5.3-1 海水貯留堰平面図及び断面図

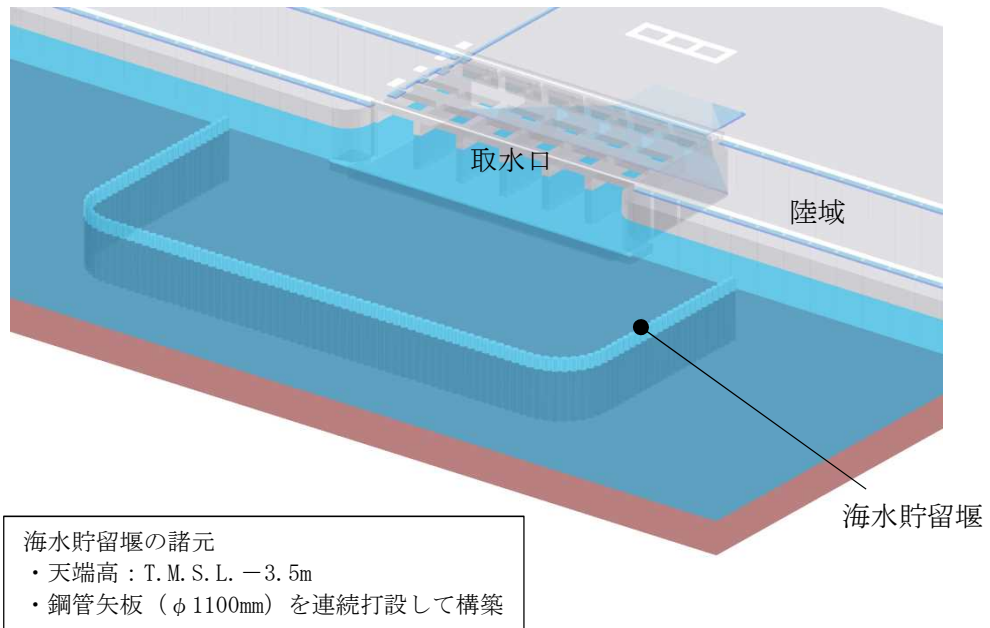


図 5.3-2 海水貯留堰鳥瞰図

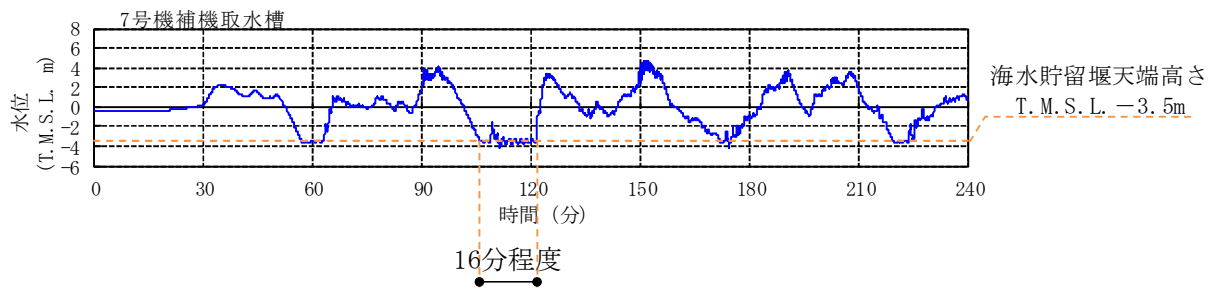


図 5.3-3 補機取水槽内の水位時刻歴

(2) 評価方針

スロッシングによる海水貯留堰貯水量に対する影響評価は、図 5.3-4 の評価フローのとおり実施する。

初めに、スロッシング解析に用いる海底面の加速度時刻歴を選定する。そして選定した海底面の加速度時刻歴を用いて OpenFOAM によるスロッシング解析を行い、スロッシングによる海水貯留堰貯水量に対する影響を評価する。検討項目は以下の 2 通りである。

a. 検討項目 1 (貯水量が確保されることを確認)

本震後の引波によって海水貯留堰外側の海水位が海水貯留堰天端を下回る時間(約 16 分)に余震が重畳することを想定し、スロッシング解析により海水貯留堰からの溢水量を算出する。ここでは、海水貯留堰の有効容量 (8000m³, 原子炉補機冷却海水ポンプの運転継続可能時間 44 分) から溢水量を減じた貯水量に対する原子炉補機冷却海水ポンプの運転継続可能な時間が、引波継続時間 (約 16 分) に対して十分に余裕があることを確認する。

なお、スロッシング解析の溢水量の算定においては、スロッシングによる溢水量を保守的に算出するため、スロッシング解析時間は引波により海水貯留堰外側の海水位が海水貯留堰天端を下回る継続時間 (約 16 分) よりも長い 20 分間 (1200 秒間) とする。

b. 検討項目 2 (取水可能限界水位を下回らないことを確認)

スクリーン室奥でのスロッシングによる水位変動の時刻歴波形を算出し、余震継続時間内における海水貯留堰内水位が原子炉補機冷却海水ポンプの設計取水可能水位 (T. M. S. L. -4.92m) を下回っていないことを確認する。

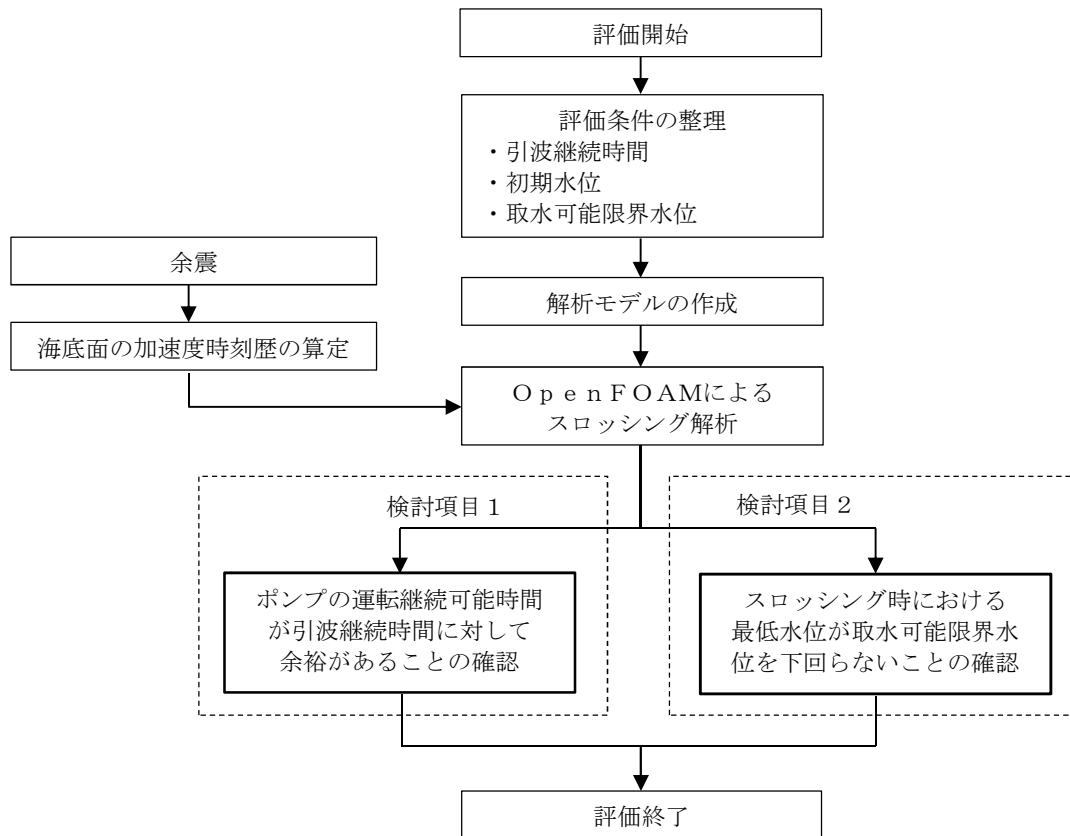


図 5.3-4 評価フロー

(3) 入力地震動の策定

a. 地震動の引き上げ手法

入力地震動は、V-2-1-6「地震応答解析の基本方針」のうち「2.3 屋外重要土木構造物」に示す入力地震動の設定方針を踏まえて設定する。

地震応答解析に用いる入力地震動は、解放基盤表面（T.M.S.L. -155m）で定義される余震（弾性設計用地震動S d - 1）を1次元波動論により地震応答解析モデルの底面位置（T.M.S.L. -80m）で評価したものをを用いる。なお、津波と組み合わせる余震の算定方針や余震としてS d - 1を設定することについては、V-3-別添 3-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」及びKK7 補足-028-08「浸水防護施設の耐震性に関する説明書の補足説明資料」1.1「地震と津波の組合せで考慮する荷重について」に示す。

入力地震動算定の概念図を図 5.3-5 に、入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを図 5.3-6 及び図 5.3-7 に示す。入力地震動の設定における地盤モデルは、原子炉建屋の耐震性評価に用いた地盤モデルと同様のものをを用いる。

入力地震動の算定には、解析コード「S L O K ver2.0」を使用する。解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

地震応答解析モデル底面位置（T.M.S.L. -80m）から評価位置（海底面 T.M.S.L. -5.5m）までの海底面の加速度時刻歴については、1次元地震応答解析（F L I P）により行うものとする。

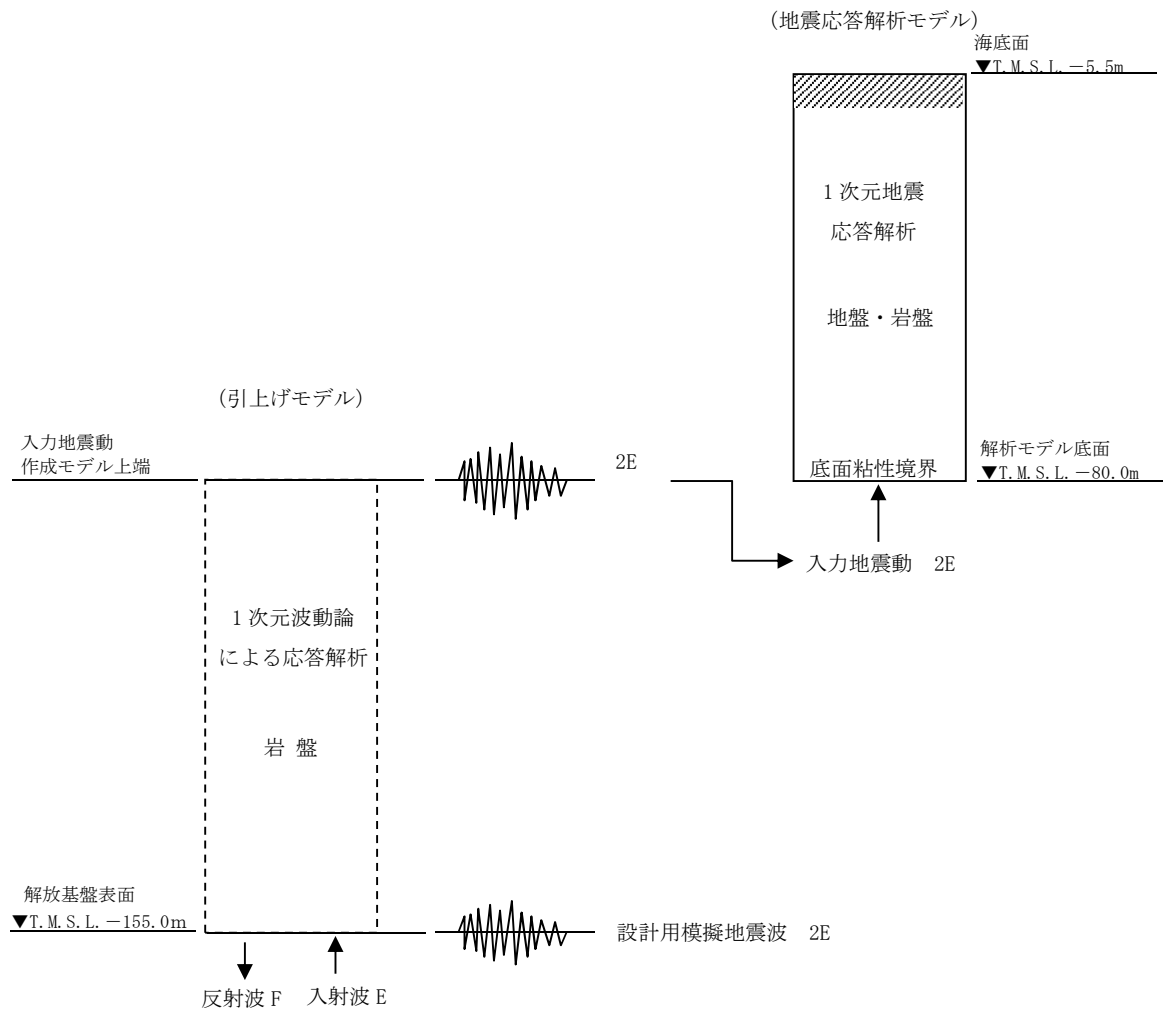
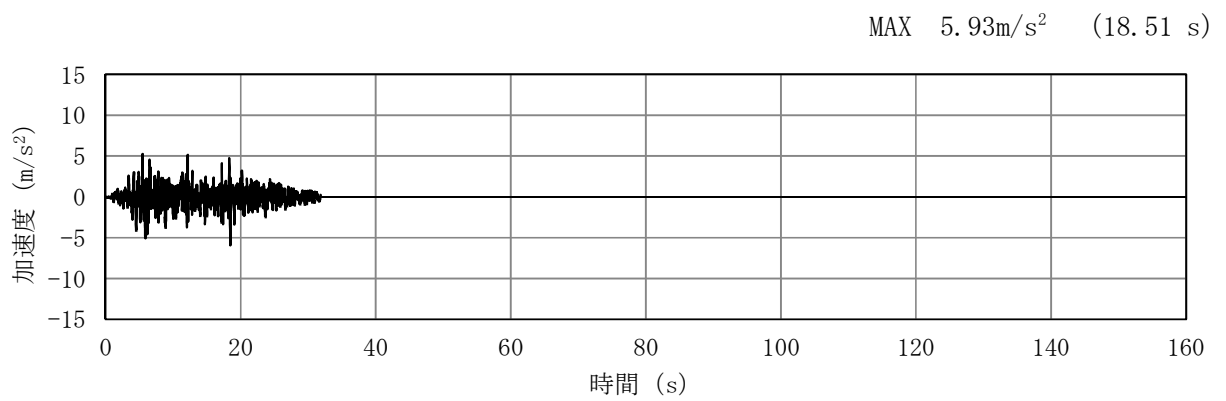
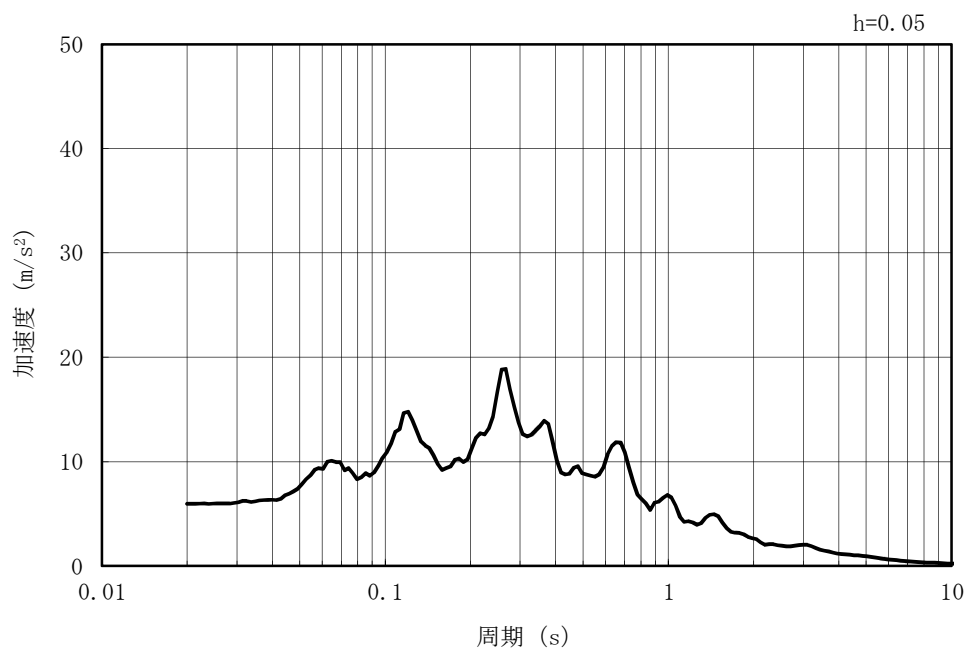


図 5.3-5 入力地震動算定の概念図

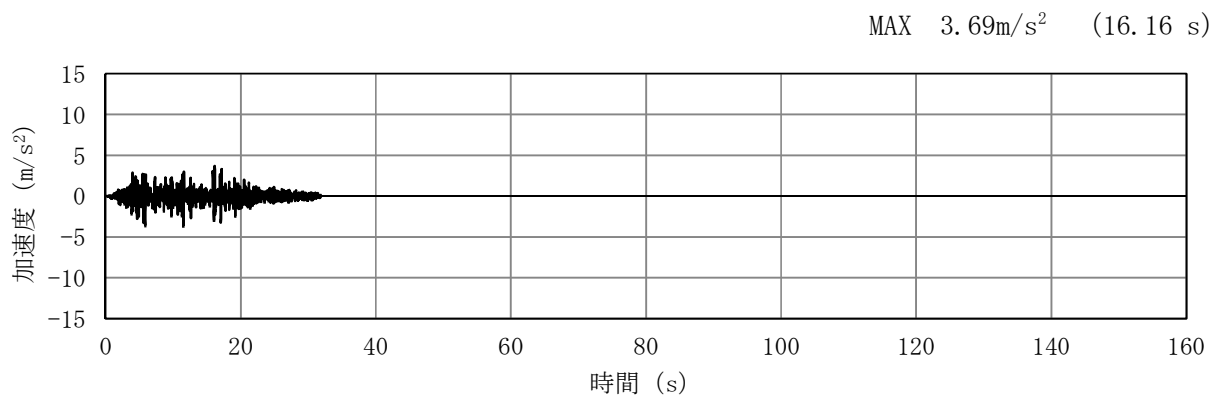


(a) 加速度時刻歴波形

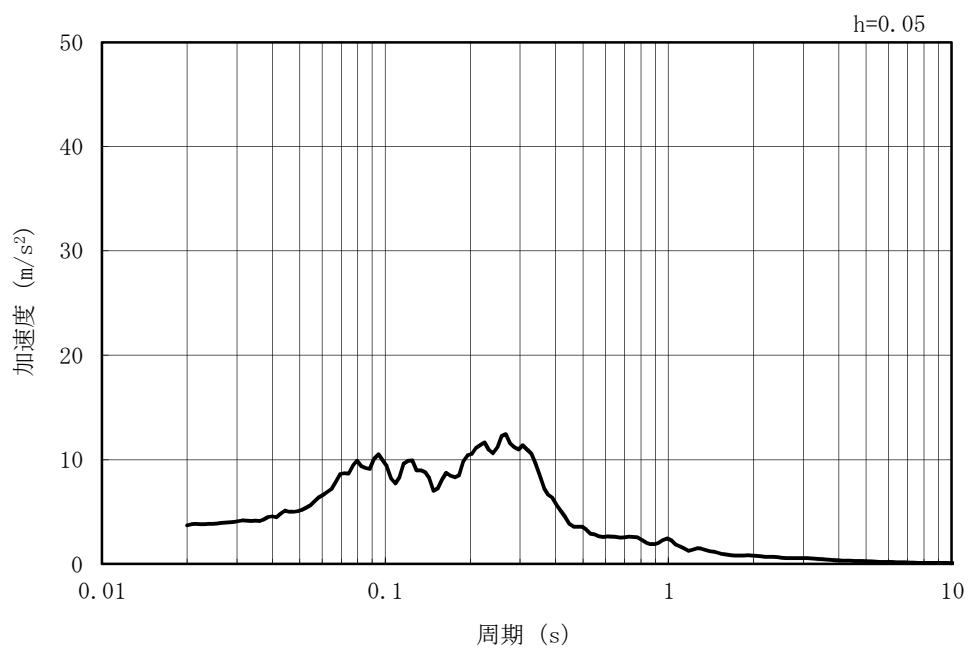


(b) 加速度応答スペクトル

図 5.3-6 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : S d -1)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 5.3-7 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : S d -1)

b. 評価対象断面位置

スロッシング解析は、海水貯留堰からの溢水量を評価することが目的なので、海水貯留堰設置位置の地層構成に着目し、評価対象断面位置を選定した。

海水貯留堰は、取水口前面の海中に設置する鋼管矢板を連結した構造物であり、取水護岸に接続している。鋼管矢板の根入れは8mであり、西山層もしくは古安田層中の粘性土に直接設置される。評価対象断面位置を図5.3-8に、地質断面図を図5.3-9及び図5.3-10に示す。また、それぞれの図に地層構成抽出箇所を併せて示す。

海水貯留堰設置位置では、南北方向では南に向かって岩盤上面標高が低くなり、東西方向では、東に向かって岩盤上面標高が深くなっている。岩盤上面標高が深い方が余震時における海水貯留堰への応答が大きいと考えられるため、評価対象断面としてB-B断面(断面②)を、海水貯留堰の応答の影響度合いを確認するため、評価対象断面としてA-A断面(断面①)をそれぞれ選定した。地層構成に着目した抽出箇所に基づく地震応答解析モデル図を図5.3-11に示す。

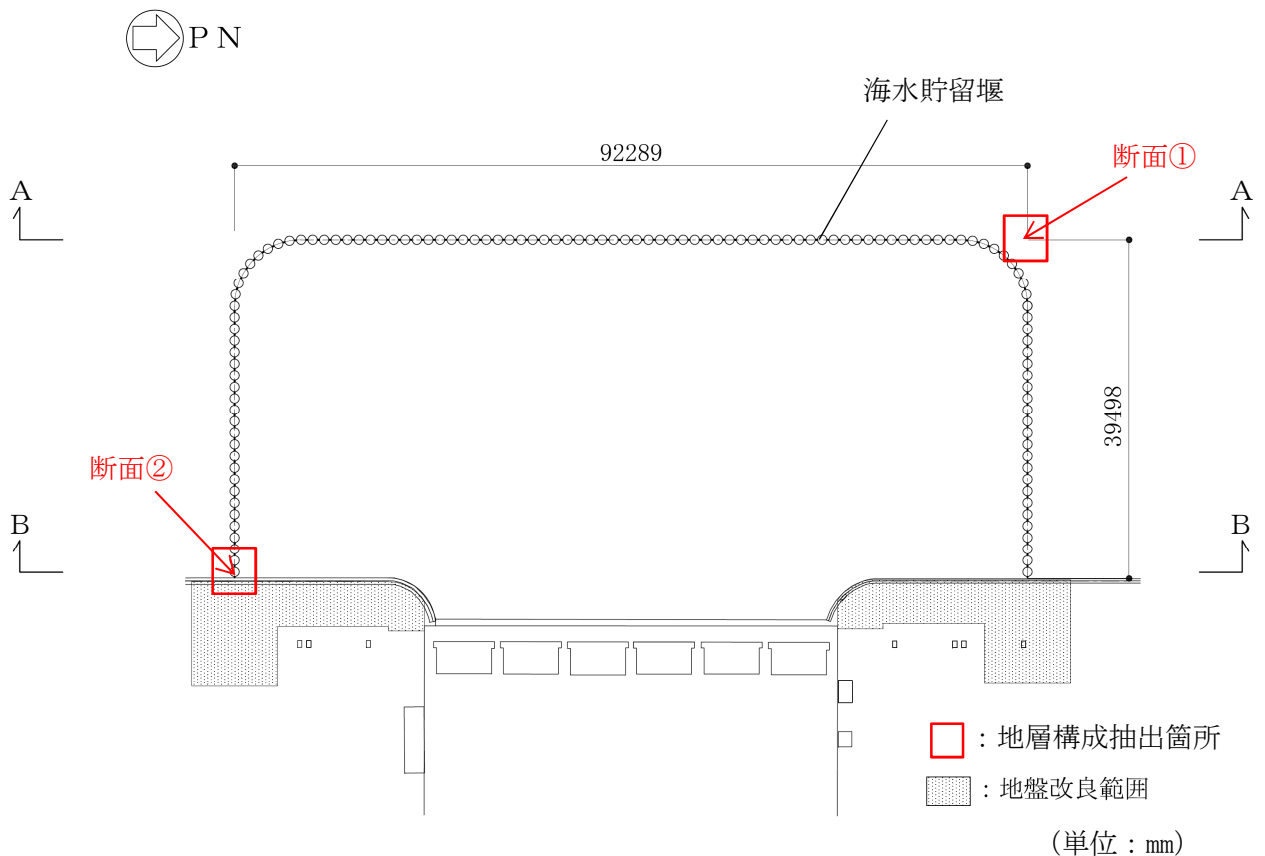


図 5.3-8 評価対象断面位置図

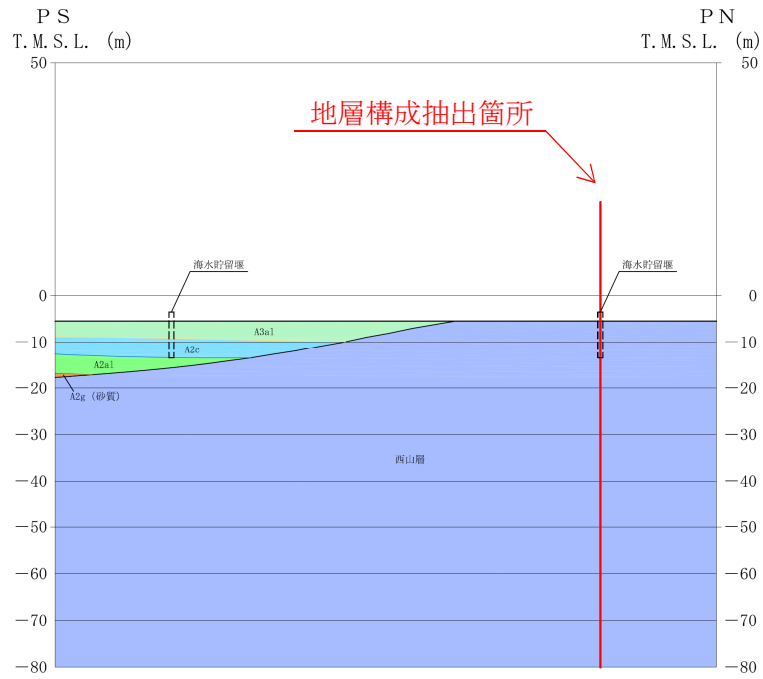


图 5.3-9 地質断面图 (A-A断面图)

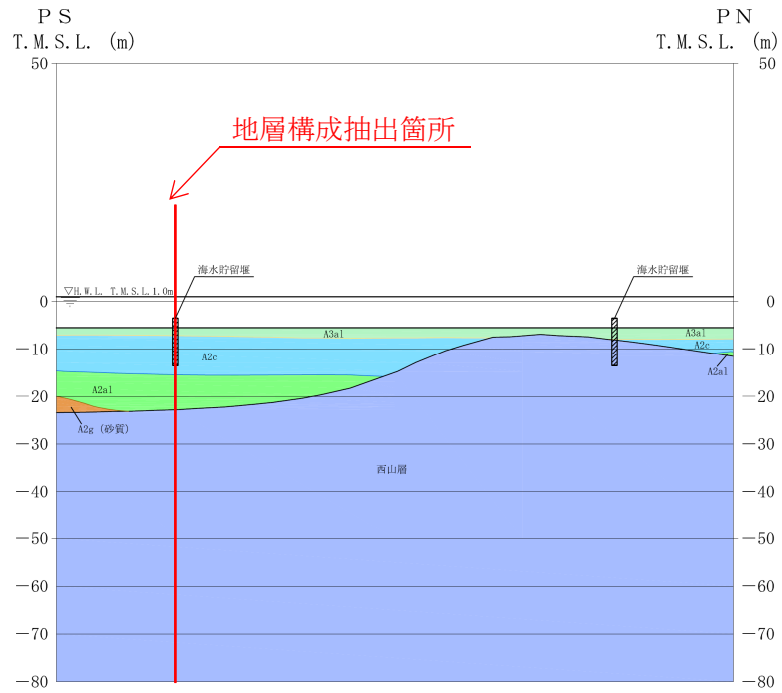
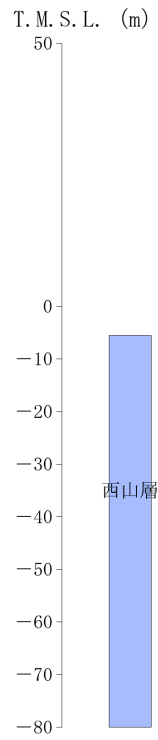
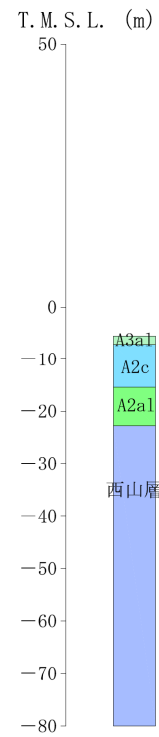


图 5.3-10 地質断面图 (B-B断面图)



(a) 断面①



(b) 断面②

図 5.3-11 地震応答解析モデル図 (地層構成抽出箇所)

c. 地盤物性値

地盤の物性値は、V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を用いる。地盤の解析用物性値一覧を表 5.3-1 及び表 5.3-2 に示す。

表 5.3-1 地盤の解析用物性値一覧（非液状化検討対象層）

物性値		地層区分	古安田層		
			A3a1 層	A2c 層	A2a1 層
物理特性	密度	ρ (g/cm ³)	1.81	1.80	1.88
	間隙率	n	0.52	0.52	0.48
変形特性	動せん断弾性係数	G_{ma} (kN/m ²)	9.57×10^4	1.39×10^5	1.61×10^5
	基準平均有効拘束圧	σ_{ma}' (kN/m ²)	94.0	140.0	170.0
	ポアソン比	ν	0.33	0.33	0.33
	減衰定数の上限値	h_{max}	0.162	0.110	0.147
強度特性	粘着力	c' (kN/m ²)	29.2	113.0	82.8
	内部摩擦角	ϕ' (°)	34.2	27.9	28.7

表 5.3-2 地盤の解析用物性値一覧（西山層）

物性値		地層区分	西山層	
			T. M. S. L. -33.0m 以浅	T. M. S. L. -33.0m ~ -90.0m
物理特性	密度	ρ (g/cm ³)	1.73	1.69
	間隙率	n	0.56	0.56
変形特性	動せん断弾性係数	G_{ma} (kN/m ²)	4.16×10^5	4.75×10^5
	基準平均有効拘束圧	σ_{ma}' (kN/m ²)	98.0	98.0
	ポアソン比	ν	0.33	0.33
	減衰定数の上限値	h_{max}	0.257	0.257
強度特性	粘着力	c' (kN/m ²)	1370-5.04Z*	1370-5.04Z*
	内部摩擦角	ϕ' (°)	0.0	0.0

注記* : Zは、標高 (m) を示す。

d. 海底面の加速度時刻歴の選定

(a) 海底面の加速度時刻歴の選定の概要

スロッシング解析に用いる海底面の加速度時刻歴は、地盤の物性のばらつきを考慮したものとする。また、「容器構造設計指針・同解説（日本建築学会）」では、スロッシング波高は速度応答スペクトルに比例するとされている。このため、海底面（T.M.S.L. -5.5m）における速度応答スペクトルを比較して、海底面の加速度時刻歴の選定を行う。

(b) 海底面の加速度時刻歴の選定に用いる地盤物性

海底面の加速度時刻歴の選定で考慮する地盤物性は表 5.3-3 に示す 3 ケースとする。

なお、海水貯留堰への応答の影響が大きいと考えられる表層部（古安田層）について、地盤物性のばらつきを考慮する。

表 5.3-3 地震動の選定において考慮する地盤物性検討ケース

	①	②	③
解析ケース	基本ケース	地盤物性のばらつきを考慮（+1 σ ）した解析ケース	地盤物性のばらつきを考慮（-1 σ ）した解析ケース
地盤剛性の設定	地盤剛性（平均値）	地盤剛性（+1 σ ）	地盤剛性（-1 σ ）

(c) 水面の1次固有周期の算出

海水貯留堰の長さの異なる4つの断面について、加振方向を考慮して水面の1次固有周期を算出する。算出には「容器構造設計指針・同解説（日本建築学会）¹⁾」に示されている以下の式を用いる。検討に用いた4断面の位置を図5.3-12、1次固有周期算定結果を表5.3-4に示す。算定の結果、海水貯留堰の固有周期はA-A、B-B、C-C、D-Dの各断面について約41秒、29秒、18秒、3秒である。

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\omega^2 = \sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \frac{g}{l} \cdot \tanh\left(\sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \frac{h}{l}\right)$$

ここに T : 1次固有周期(s)

ω : 1次固有円振動数(1/s)

g : 重力加速度(m/s²)

l : 水槽の幅の半分(m) (貝代10cm考慮)

h : 水深(m)

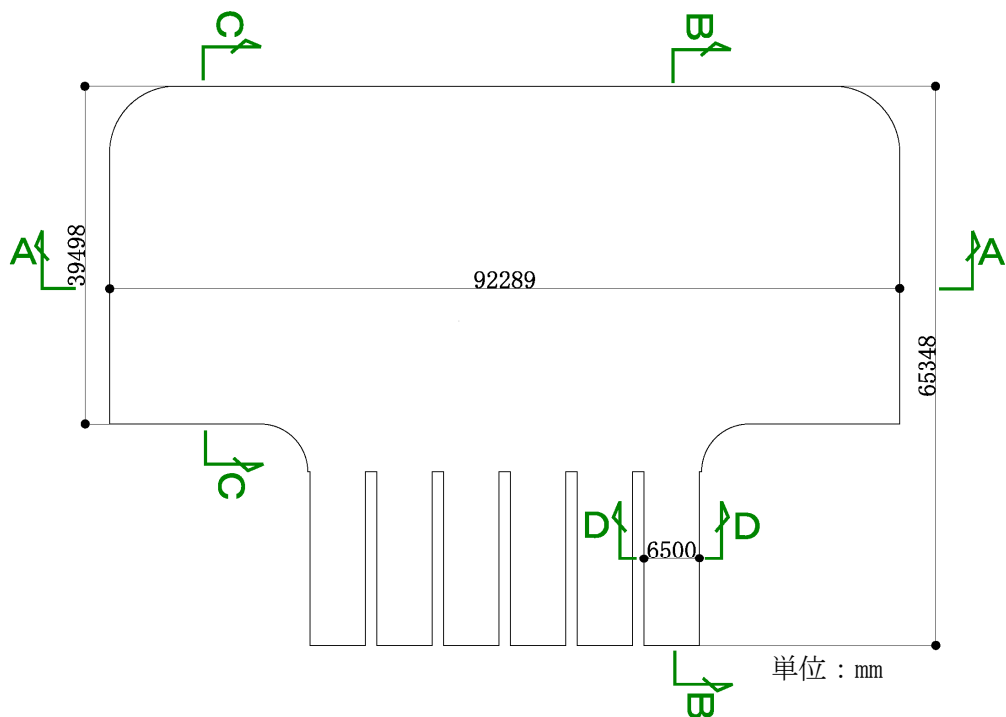


図5.3-12 水槽形状の考え方

表 5.3-4 1次固有周期算定結果

項目	記号	単位	A-A 断面	B-B 断面	C-C 断面	D-D 断面	備考
水槽の幅	2 l	m	92.089	65.148	39.298	6.300	貝代 10cm 考慮
	l	m	46.045	32.574	19.649	3.150	
貯留堰天端標高		T.M.S.L.m	-3.5	-3.5	-3.5	-3.5	
底面標高		T.M.S.L.m	-5.5	-5.5	-5.5	-5.5	
水深	h	m	2.0	2.0	2.0	2.0	
重力加速度	g	m/s ²	9.80665	9.80665	9.80665	9.80665	
固有円振動数	ω	rad/s	0.152	0.215	0.355	1.938	
固有周期	T	s	41.35	29.27	17.71	3.24	

(d) 海底面の速度応答スペクトル

スロッシング解析モデル下端に入力する海底面の加速度時刻歴を選定するため、別途実施した1次元地震応答解析で得られた海底面 (T. M. S. L. -5.5m) における速度応答スペクトルを比較したものを図 5.3-13 に示す。なお、このときの減衰定数 h は「JEA4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針 (日本電気協会)²⁾」に示される液体の揺動の設計用減衰定数に従い、0.5%とした。速度応答スペクトルは、全てのケースにおいて周期 0.61 秒から 0.63 秒で最大となり、断面②の③地盤物性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース (以下、「断面②- 1σ ケース」という。) で最大となる。また、海水貯留堰の固有周期帯である約 41 秒, 29 秒, 18 秒, 3 秒に着目すると、いずれの周期帯でも断面②- 1σ ケースが最大ケースであることから、スロッシング解析に用いる海底面の加速度時刻歴は断面②- 1σ ケースによるものとした。

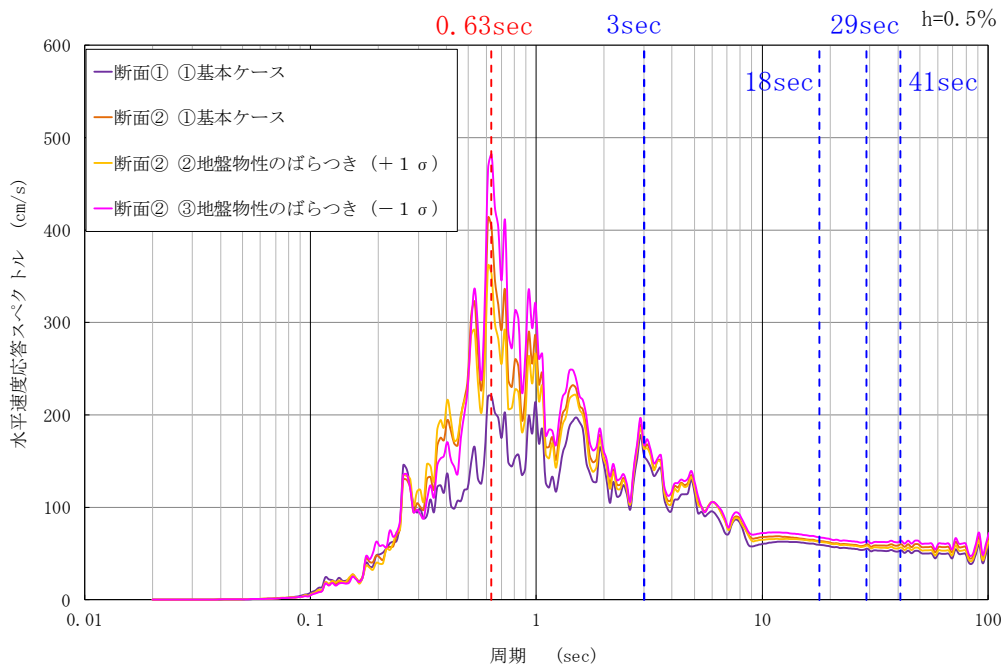


図 5.3-13 速度応答スペクトル (水平方向)

(4) 3次元スロッシング解析による7号機海水貯留堰の溢水量の算定

a. 初期水位

スロッシング解析の初期水位は、海水貯留堰天端高である T.M.S.L. -3.5m と、引波の継続時間中に原子炉補機冷却海水ポンプによる取水が継続された場合の水位 (T.M.S.L. -4.13m) の2ケースを考慮する。原子炉補機冷却海水ポンプによる取水時間は、引波の継続時間の16分間とする。

本解析では、余震後においても貯水量が確保されること、及び余震時に取水可能限界水位を下回らないことを検討する。ここでは検討項目1、検討項目2とする。検討項目1については、海水貯留堰内水位が高い場合に溢水量が大きくなるため、初期水位を T.M.S.L. -3.5m として検討する。一方、検討項目2については、海水貯留堰内水位が低い場合に厳しい条件となるため、初期水位を T.M.S.L. -4.13m として検討する。

なお、16分間原子炉補機冷却海水ポンプによる取水が行われた場合の水位は以下の計算によって求めた。解析に用いる初期水位を表5.3-5に示す。

$$\begin{aligned} 16 \text{ 分間の水位低下量} &= (\text{原子炉補機冷却海水ポンプ取水量} \times 16 \text{ 分}) / \text{有効貯水面積} \\ &= (180\text{m}^3/\text{分} \times 16 \text{ 分}) / 4599\text{m}^2 \\ &= 0.626\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 16 \text{ 分間原子炉補機冷却海水ポンプによる取水が行われた場合の水位} \\ &= \text{海水貯留堰天端高} - 16 \text{ 分間の水位低下量} \\ &= \text{T.M.S.L.} - 3.5\text{m} - 0.626\text{m} \\ &= \text{T.M.S.L.} - 4.126\text{m} \rightarrow \underline{\text{T.M.S.L.} - 4.13\text{m}} \end{aligned}$$

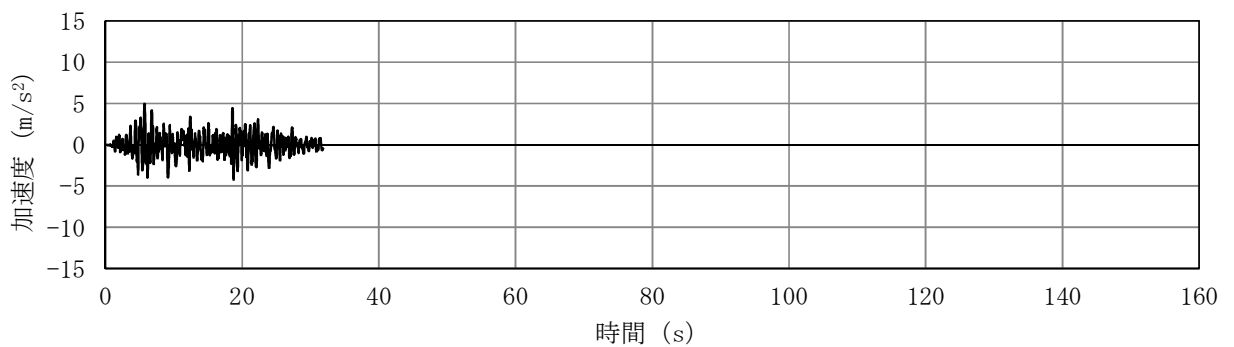
表 5.3-5 初期水位の設定

対象検討項目	初期水位	備考
検討項目1：貯水量が確保されることを確認	T.M.S.L. -3.5m	海水貯留堰天端標高
検討項目2：取水可能限界水位を下回らないことを確認	T.M.S.L. -4.13m	16分間原子炉補機冷却海水ポンプによる取水が行われた場合の水位

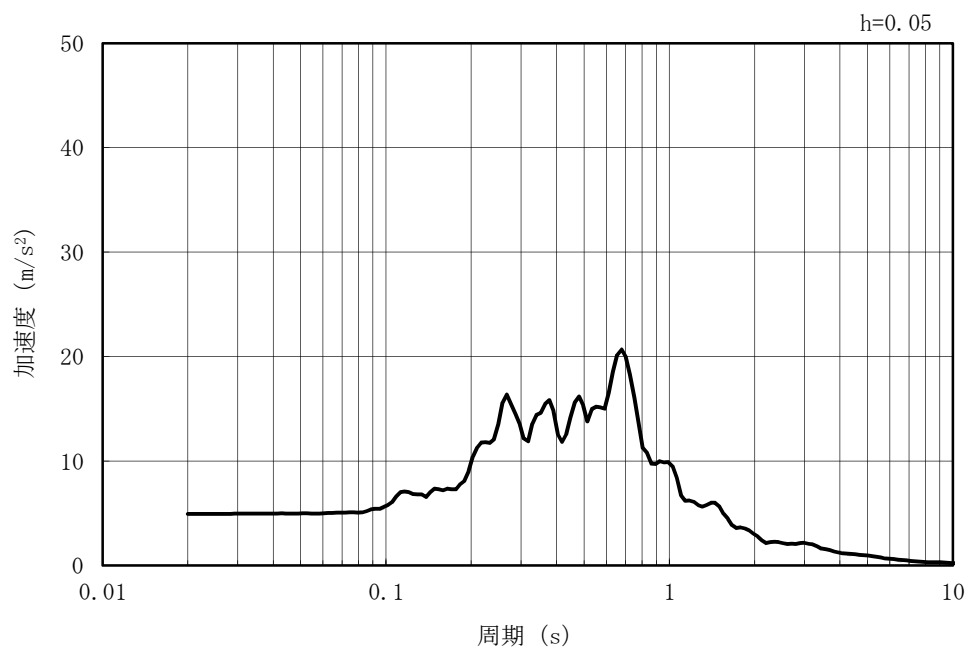
b. 海底面の加速度時刻歴

スロッシング解析モデル下端（海底面）の加速度時刻歴は「(3) 入力地震動の策定」で示したとおり、断面②-1σケースを選定する。加速度時刻歴及び加速度応答スペクトル（水平方向及び鉛直方向）を図 5.3-14 及び図 5.3-15 に示す。余震として用いる S d-1 の水平成分は方向を持たないため、検討項目 1 では護岸直角方向（東西方向）に加振した場合と護岸平行方向（南北方向）に加振した場合の 2 ケースに対してスロッシング解析を実施する。検討項目 2 では検討項目 1 の結果を踏まえて、より最低水位が低くなる護岸直角方向のスロッシング解析を実施する。

MAX 4.94m/s² (5.72s)



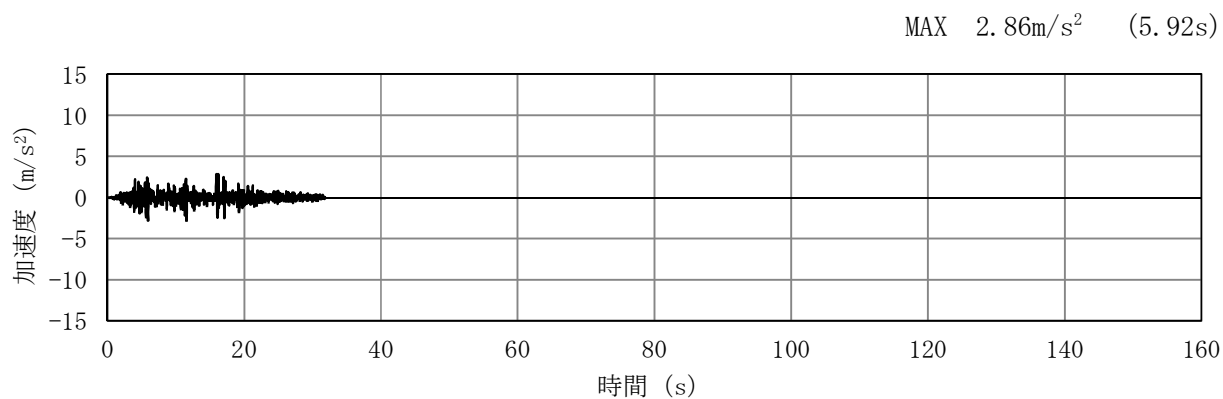
(a) 加速度時刻歴波形



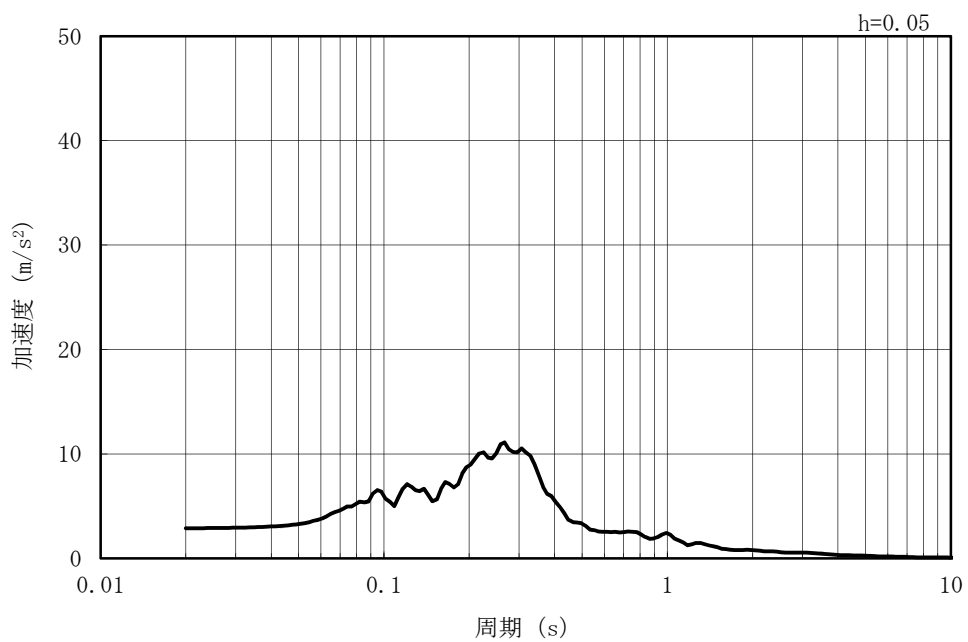
(b) 加速度応答スペクトル

図 5.3-14 海底面の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル

(水平方向：S d-1 ③地盤物性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 5.3-15 海底面の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
 (鉛直方向：S d-1 ③地盤物性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース)

c. 解析条件

海水貯留堰のスロッシングの影響を評価するため、オープンソースの有限体積法 (Finite Volume Method) に基づいた解析コード OpenFOAM を用いた 3 次元解析を実施する。

本検討では、VOF 法による 2 相流解析ソルバー `interFoam` を用いる。計算メッシュ全体に加速度時刻歴を入力することにより、計算領域内部の気相 (空気) 及び液相 (海水) の挙動を解析する。

解析条件を表 5.3-6 に示す。また、スロッシング解析モデルと水位時刻歴波形の抽出位置 (①～⑨) を図 5.3-16 に示す。スロッシング現象は入力地震動の卓越周期と海水貯留堰の内容水の固有周期が一致することによって共振が発生し、内容水が激しく揺れる現象である。「(c) 水面の 1 次固有周期の算出」で示した固有周期の算定式から、水槽の幅が小さいほど固有周期が短くなり入力地震動の卓越周期 0.63 秒に近くなるため、解析モデルは海水貯留堰からスクリーン室までのモデル化とした。

ただし、取水路全体 (取水口～海水ポンプ室) をモデル化した場合に、海水貯留堰で発生するスロッシングの影響によって、原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位が取水限界水位を下回る可能性も考慮し、別途取水路全体をモデル化した管路解析モデルを用いて管路内水位変動解析を実施し、原子炉補機冷却海水ポンプ位置の応答水位を確認することにより、モデル化範囲の妥当性を確認する。(参考資料 2) 「管路内水位応答解析による原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位の算定」に示す。

表 5.3-6 解析条件

モデル化範囲	<ul style="list-style-type: none"> ● 海水貯留堰からスクリーン室まで
境界条件	<ul style="list-style-type: none"> ● 上部は開放とし、他は壁による境界（ノンスリップ）を設定。
溢水量	<ul style="list-style-type: none"> ● スロッシングにより海水貯留堰外側に溢れ出た海水の体積を溢水量として計上する。
初期水位	<ul style="list-style-type: none"> ● 検討項目 1 : T. M. S. L. -3.5m ● 検討項目 2 : T. M. S. L. -4.13m
入力地震波	<ul style="list-style-type: none"> ● 「(3) 入力地震動の策定」で示した、余震による海底面の加速度時刻歴波形を入力地震波とする。
計算時間	<ul style="list-style-type: none"> ● 20 分間 (1200 秒間) (検討項目 1) ● 3 分間 (180 秒間) (検討項目 2)
解析コード	<ul style="list-style-type: none"> ● OpenFOAM 3.0.1 ● オープンソースの流体解析ソフトウェアであり、実験結果等との比較を行い、スロッシング現象を精度よく計算できることが確認されている。
海水の物性値	<ul style="list-style-type: none"> ● 動粘性係数 $1.05 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ ● 密度 $1024 [\text{kg}/\text{m}^3]$ <p>鈴木ら (1980)³⁾に基づき設定。</p>
水位抽出位置	<ul style="list-style-type: none"> ● 海水貯留堰天端を超える様子を参考として確認するために、海水貯留堰北端、東端及び西端を代表点として①～③の 3 点（各壁の中央）を水位抽出位置とする。（検討項目 1） ● スクリーン室奥での水位変動を確認するために、スクリーン室奥の④～⑨の 6 点を水位抽出位置とする。（検討項目 2）
その他	<ul style="list-style-type: none"> ● スクリーンなどの機器については、溢水量を保守的に考慮するためにモデル化しない。 ● 格子サイズは $25\text{cm} \times 25\text{cm} \times 25\text{cm}$ を基本とする。 ● 海水貯留堰鋼管矢板はモデル簡略化のため海水貯留堰内側の壁面形状を直線（隅角部は曲線）としてモデル化する。

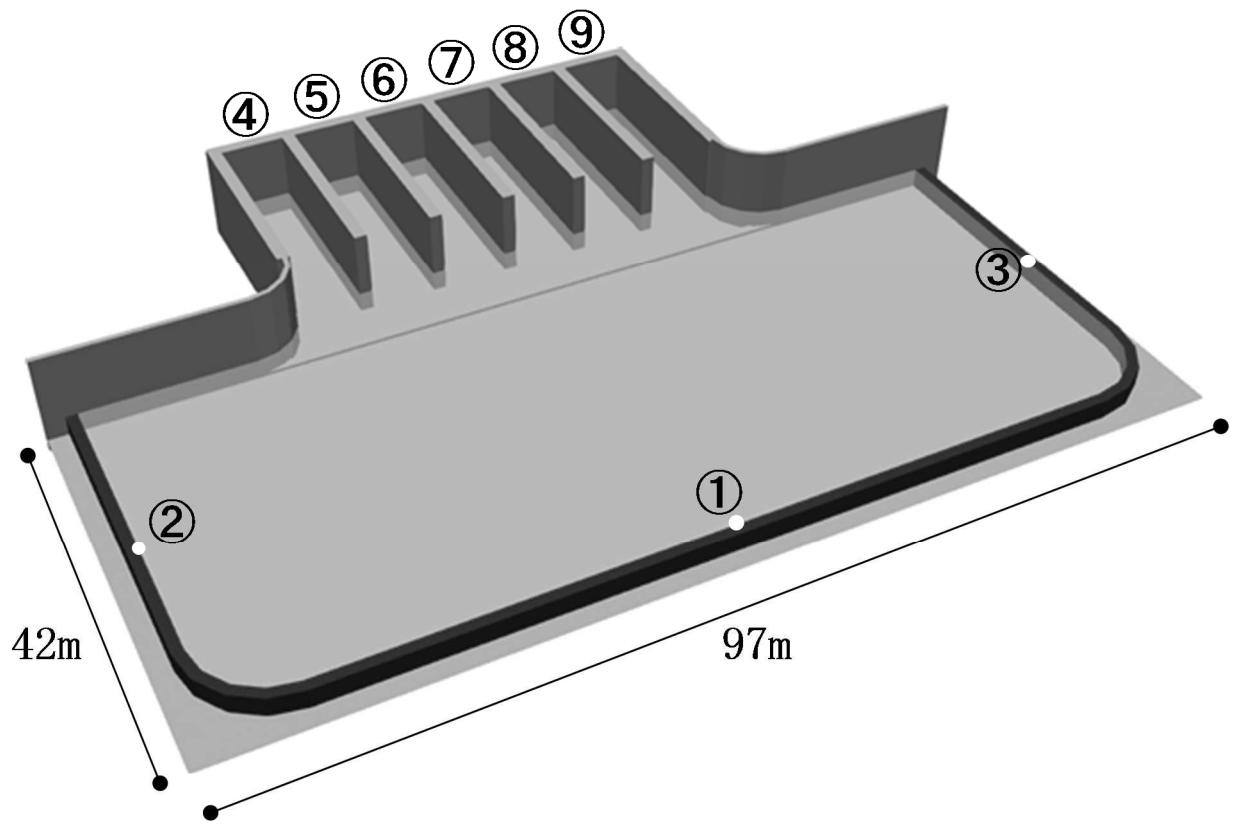


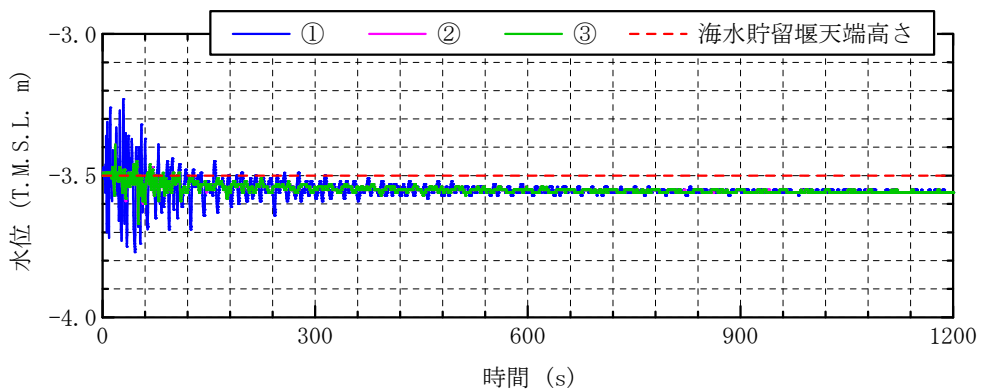
図 5.3-16 スロッシング解析モデル(OpenFOAM) (①～⑨は水位抽出位置)

d. 解析結果

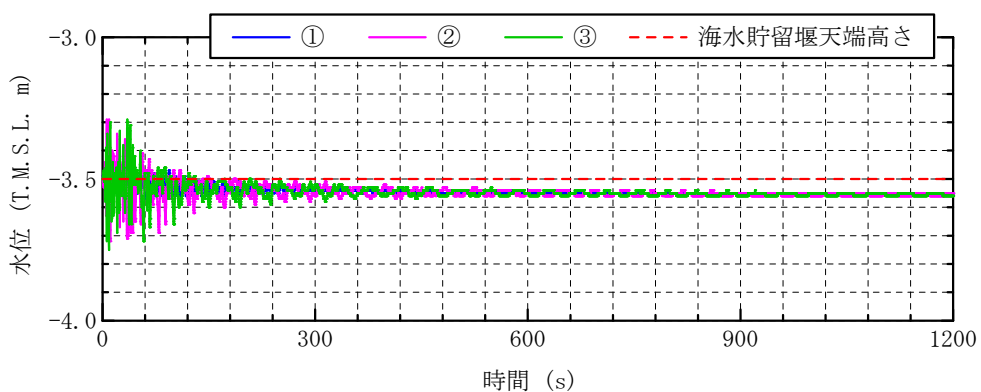
(a) 検討項目 1

海水貯留堰の水位抽出位置 (①~③) におけるスロッシング時の水位時刻歴を図 5.3-17, 溢水量の時間変化を図 5.3-18, スロッシングによる 20 分間の溢水量を表 5.3-7 に示す。溢水量はいずれの加振方向についても単調に増加しており, 20 分間の溢水量は護岸直角方向では 351m^3 , 護岸平行方向では 338m^3 である。また, 水位抽出位置で最高水位となる時間の水位分布を図 5.3-19 に示す。なお, 水平加振方向: 護岸直角では水位抽出位置①で最高水位 T. M. S. L. -3.23m , 水平加振方向: 護岸平行では水位抽出位置③で最高水位 T. M. S. L. -3.29m である。

また, 水平 2 方向同時加振によるスロッシングの影響評価については, (参考資料 3) 「水平 2 方向同時加振による影響評価」に示す。

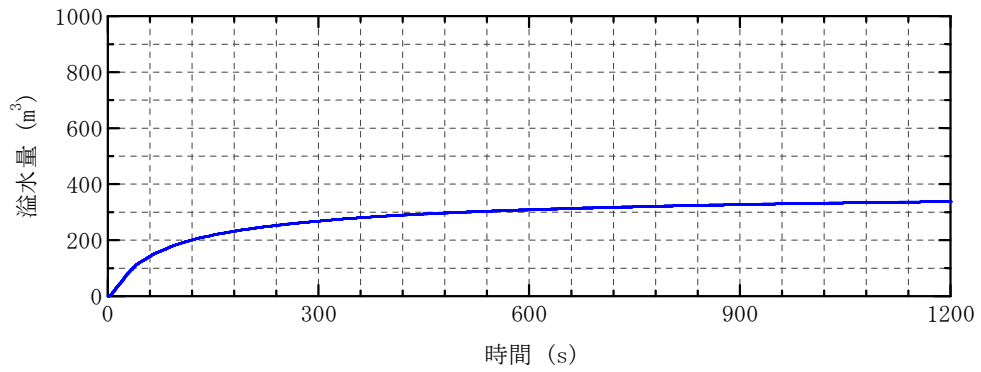


(a) 水平加振方向: 護岸直角

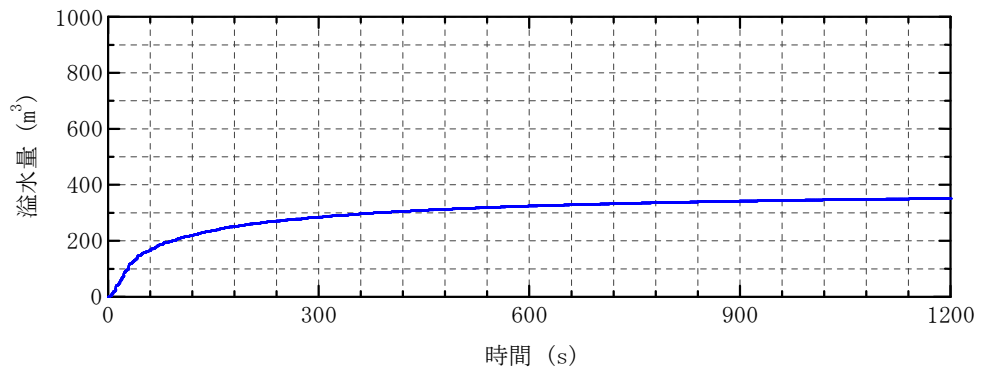


(b) 水平加振方向: 護岸平行

図 5.3-17 海水貯留堰位置におけるスロッシング時の水位時刻歴



(a) 水平加振方向：護岸直角

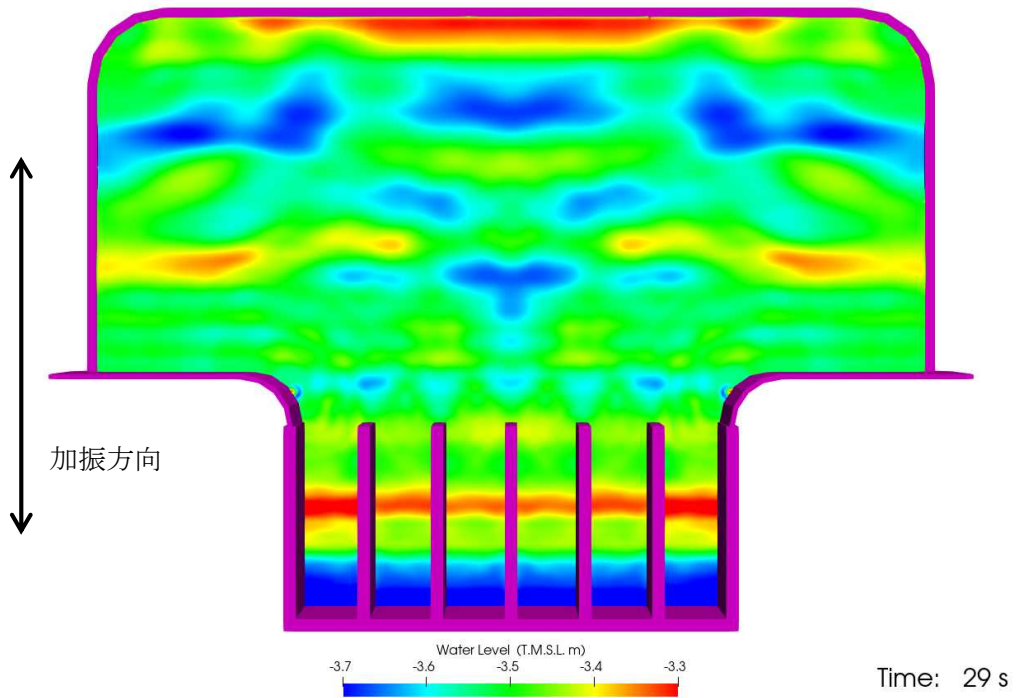


(b) 水平加振方向：護岸平行

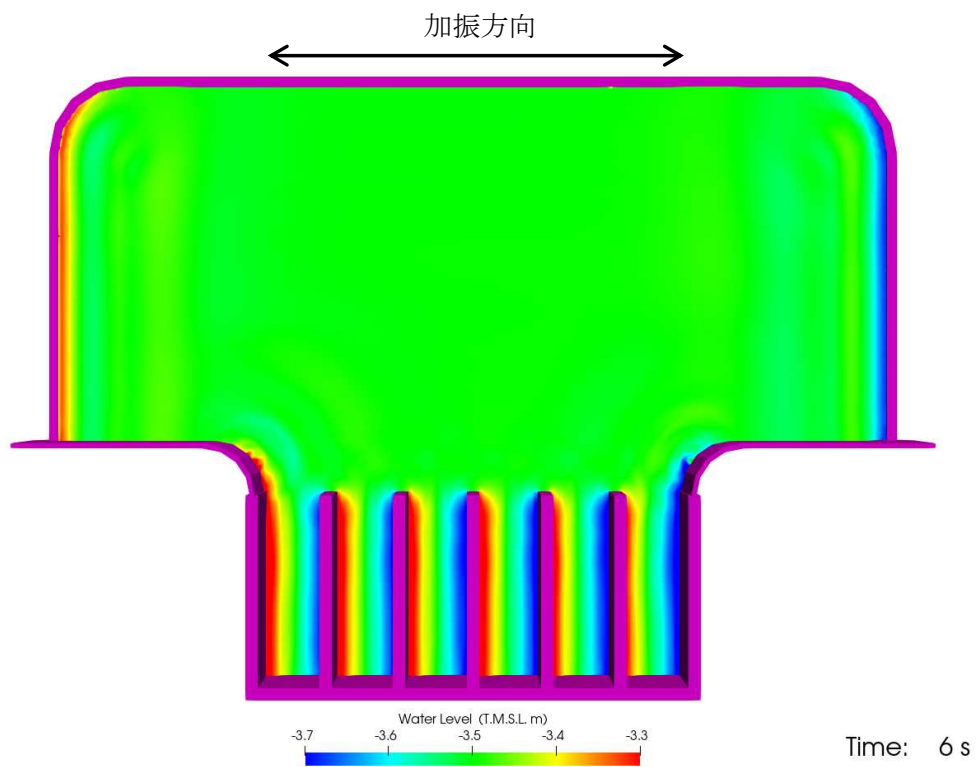
図 5.3-18 スロッシングによる溢水量の時間変化

表 5.3-7 スロッシングによる 20 分間の溢水量

加振方向	溢水量
(a) 護岸直角方向に加振	351m ³
(b) 護岸平行方向に加振	338m ³



(a) 水平加振方向：護岸直角（29 秒時）

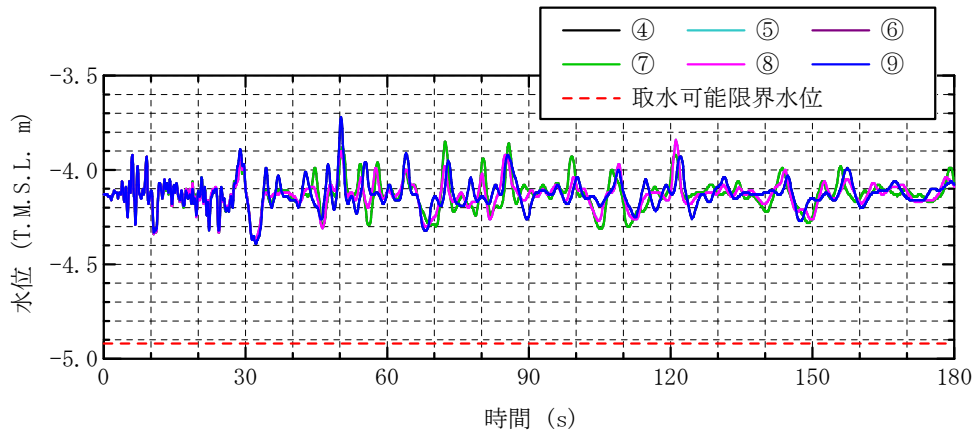


(b) 水平加振方向：護岸平行（6 秒時）

図 5.3-19 スロッシング時の水位分布

(b) 検討項目 2

スクリーン室奥の水位抽出位置（④～⑨）におけるスロッシング時の水位時刻歴を図 5.3-20、スロッシング時の最低水位を表 5.3-8 に示す。なおスロッシング解析時間は、検討項目 1 の結果を踏まえて水位の振れ幅が大きい 180 秒間とした。なお、検討項目 2 では初期水位を低く設定しているためスロッシングによる溢水は生じていない。



水平加振方向：護岸直角

図 5.3-20 スクリーン室奥における水位時刻歴波形

表 5.3-8 スロッシング時の最低水位

評価位置	最低水位 (T. M. S. L. m)
④	-4.39
⑤	-4.37
⑥	-4.38
⑦	-4.38
⑧	-4.37
⑨	-4.39

e. 評価結果

(a) 検討項目 1

スロッシングによる 20 分間の溢水量は 351m^3 であり、スロッシングによる溢水を考慮した原子炉補機冷却海水ポンプの運転継続可能時間は約 42 分となる。よって、スロッシングによる溢水を考慮しても、海水貯留堰外側の海水位が海水貯留堰天端を下回る時間の約 16 分に対して十分な貯水量が確保されていることを確認した。

スロッシングによる 20 分間の溢水量 = 351m^3

溢水を考慮した原子炉補機冷却海水ポンプの運転継続可能時間

$$\begin{aligned} &= (\text{有効容量} - \text{溢水量}) \div \text{原子炉補機冷却海水ポンプ取水量} \\ &= (8000\text{m}^3 - 351\text{m}^3) \div 180\text{m}^3/\text{分} \\ &= 42.49 \text{ 分} \rightarrow \underline{42 \text{ 分}} > 16 \text{ 分} \end{aligned}$$

(b) 検討項目 2

スクリーン室奥でのスロッシング時の最低水位は約 T. M. S. L. -4.4m である。よって、スロッシングによる溢水及び水面の揺動を考慮した場合においても、海水貯留堰内水位が原子炉補機冷却海水ポンプの取水可能限界水位 (T. M. S. L. -4.92m) を下回らないことを確認した。

スロッシング時の最低水位 = T. M. S. L. -4.39m

$$\rightarrow \underline{\text{T. M. S. L. -4.4m}} > \text{T. M. S. L. -4.92m}$$

(5) 参考文献

- 1) 「容器構造設計指針・同解説」日本建築学会，2010年
- 2) 「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」日本電気協会 電気技術基準調査委員会，1987年
- 3) 鈴木博・長嶋昭：高圧力下における海水の粘性係数，日本機械学会論文集（B編）46巻408号，pp. 1574-1582，1980

漂流物の堆積による海水貯留堰貯水量への影響について

(1) 概要

本参考資料では、海水貯留堰内に漂流物が堆積する可能性を考慮し、その堆積物により減少する海水貯留堰の貯水量について評価を行った。本評価においては、余震時のスロッシングにより発生する溢水量も加味し、堆積物及びスロッシングによる貯水量の減少分を考慮したとしても、原子炉補機冷却海水ポンプの運転可能時間が引き波の継続時間（海水貯留堰外側の海水位が海水貯留堰天端を下回る時間約 16 分）に対して十分に余裕があることを確認した。

(2) 漂流物の堆積が海水貯留堰の貯水量（有効容量）に与える影響

a. 堆積する漂流物の設定、堆積量の算出

7号機取水口（海水貯留堰位置）への到達の可能性のある施設・設備等については「補足 4.2 漂流物による影響確認について」において、抽出、評価を行っている。具体的には、表 4.2-14 において海水貯留堰への波及的影響の可能性有無が「×（あり）」となる施設・設備等が7号機取水口に到達し得る漂流物となるが、整理すると表 5.3-参 1-1 に示すとおりとなる。

これらの施設・設備等が海水貯留堰内部へ選択的に集中し、堆積するとは考えにくいですが、保守的に表 5.3-参 1-1 の施設・設備等が海水貯留堰内に全て堆積すると仮定し、漂流物の堆積による有効容量の減少分（堆積量）を算出した。

なお、堆積量の算出パターンは図 5.3-参 1-1 に示すとおりになっており、パターン①及びパターン②については、海水貯留堰内部に堆積した際に有効貯水量から差し引かれる体積部に該当する部分を減少分と想定し、表 4.2-11 の整理で「寸法・容量」を建築面積で整理している施設・設備については、パターン③として示すとおり、建物が破損等により面積が減少することが想定されるが、ここでは保守的にその面積分の海水貯留堰有効容量（施設・設備等の面積×海水貯留堰有効高さ[7号機 1.42m]）が減少分となると仮定して堆積量を算出した。

また、表 5.3-参 1-1 に施設・設備等のうち、「資機材」に分類される「単管パイプ、足場板等」及び「その他一般構築物」に分類される「監視カメラ、拡声器、標識等」の比較的体積の小さい施設・設備等については、基本的に海水貯留堰の下部の有効貯水量の算出対象外の範囲に（T. M. S. L. -5.5m～-4.92m）に堆積すると考えられ、有効貯水量に与える影響は軽微であるため、堆積量の算出対象から除外した。加えて、船舶については、海上を航行、停泊しているものを考慮するため、有効貯水量に与える影響は軽微であるため、堆積量の算出対象から除外した。図 5.3-参 1-2 に7号機海水貯留堰断面図を示す。

表 5.3-参 1-1 海水貯留堰内部に堆積する可能性のある施設・設備等

種類	設備名称	個数	寸法			堆積量算出 パターン	堆積量 (m ³)
			縦(m)	横(m)	高さ h(m)		
船舶	港湾設備保守点検作業船		—*1				
	海洋環境監視調査作業船		—*1				
	温排水水温調査作業船		—*1				
	発電所近傍で航行不能となった船舶		—*1				
防波堤	捨石		—*2				
建屋	6/7号機取水電源室	1	S ₃ (m ²)=建築面積約 182m ²			③	258.44
	5号機取水電源室	1	S ₃ (m ²)=建築面積約 84m ²			③	119.28
	5号機放水口サンプリング建屋	1	S ₃ (m ²)=建築面積約 53m ²			③	75.26
	大湊側少量危険物保管庫	1	S ₃ (m ²)=建築面積約 59m ²			③	83.78
	K6/7スクリーン点検用テントハウス	1	S ₃ (m ²)=建築面積約 250m ²			③	355.00
資機材	仮設ハウス①	2	5.44	2.30	2.60	①	35.53
	仮設ハウス②	1	3.60	1.84	2.60	①	9.41
	仮設ハウス③	1	5.44	2.30	2.60	①	17.77
	仮設ハウス④	5	4.63	2.46	2.14	①	80.87
	工具収納棚	1	1.00	1.80	1.70	②	2.02
	洗浄機①	2	1.05	0.60	0.80	②	0.28
	洗浄機②	2	1.05	0.60	0.80	②	0.28
	単管パイプ, 足場板等		—*3				
その他一般 構築物	監視カメラ, 拡声器, 標識等		—*3				
					合計堆積量 (m ³)	1037.91*4	

注記*1: 海上を航行, 停泊するものであるため, 堆積量の算出対象外とした。

注記*2: 漂流形態が滑動であり貯留堰内に堆積しないため, 堆積量の算出対象外とした。

注記*3: 有効貯水量の算出対象外の範囲に堆積すると考えられたため, 堆積量の算出対象外とした。

注記*4: 各項目の堆積量の値を表記上切り上げているため, 表の合計値と異なっている。

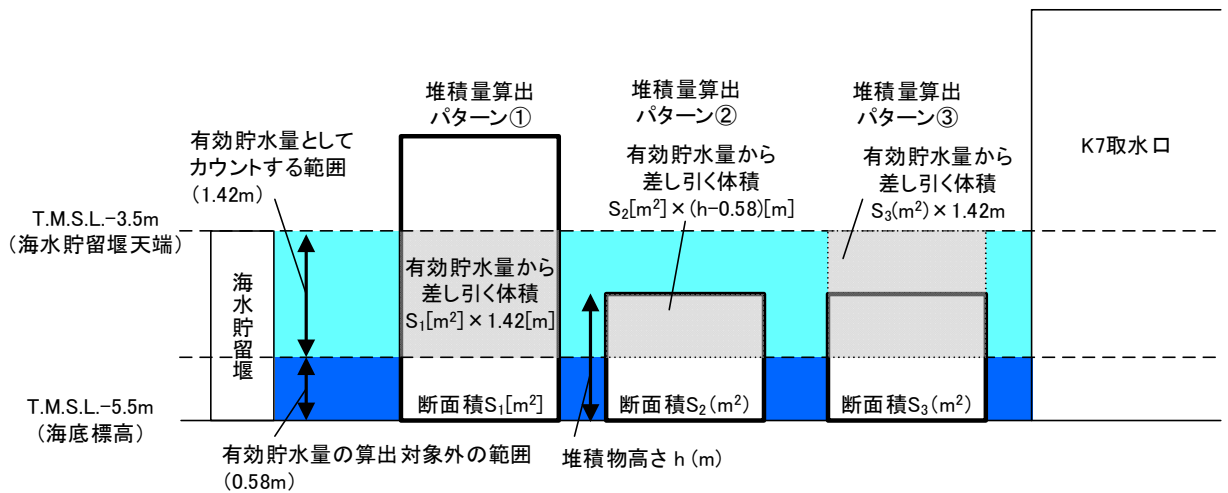


図 5.3-参 1-1 堆積量算出パターン

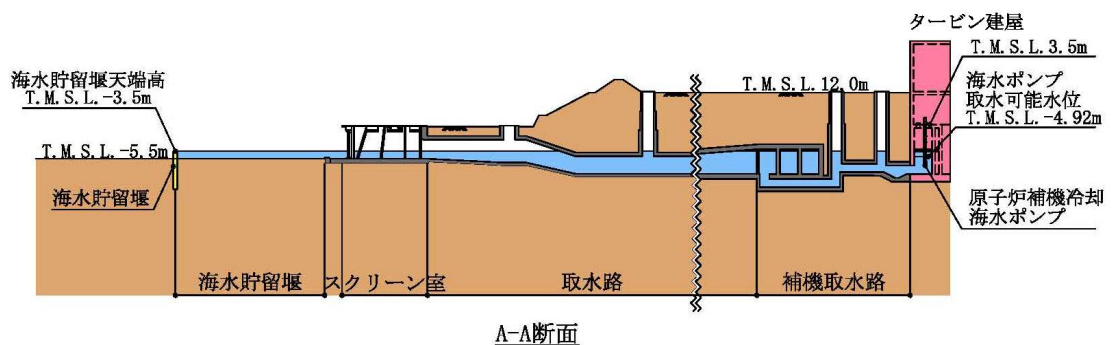
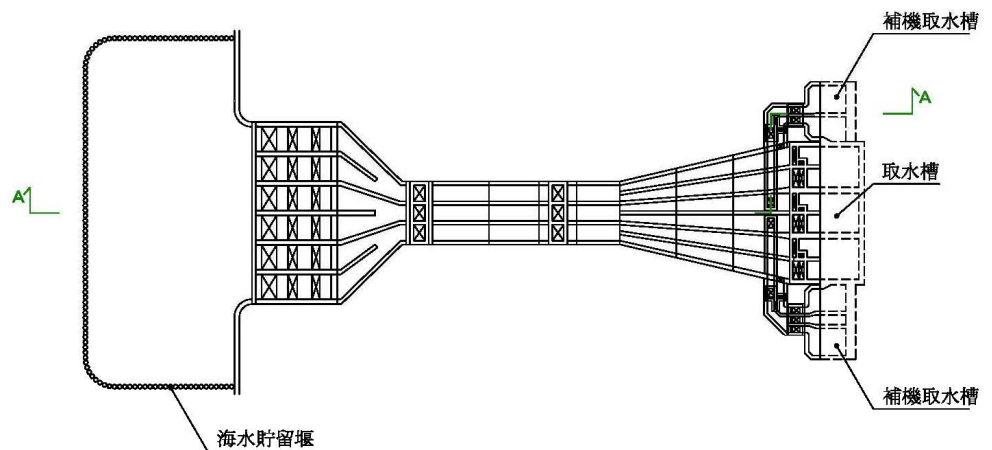


図 5.3-参 1-2 7号機海水貯留堰断面図

- b. 漂流物の堆積量が海水貯留堰貯水量（有効容量）に与える影響の評価結果
- a. で設定した漂流物の堆積量とスロッシングによる溢水量を考慮した場合の原子炉補機冷却海水ポンプの運転可能時間について評価を行った。堆積量及び溢水量を考慮した場合

でも原子炉補機冷却海水ポンプの運転継続可能時間は約 36 分となる。よって、漂流物の堆積及びスロッシングによる溢水を考慮しても、海水貯留堰外側の海水位が海水貯留堰天端を下回る時間の約 16 分に対して十分な貯留量が確保されていることを確認した。

$$\begin{aligned} \text{海水貯留堰貯水量 (有効容量)} &= 8000\text{m}^3 \\ \text{スロッシングによる溢水量} &= 351\text{m}^3 \\ \text{漂流物の堆積量} &= 1037.91\text{m}^3 \rightarrow 1038\text{m}^3 \end{aligned}$$

堆積及び溢水を考慮した原子炉補機冷却海水ポンプの運転継続可能時間

$$\begin{aligned} &= (\text{有効容量} - \text{堆積量} - \text{溢水量}) \div \text{原子炉補機冷却海水ポンプ取水量} \\ &= (8000\text{m}^3 - 1038\text{m}^3 - 351\text{m}^3) \div 180\text{m}^3/\text{分} \\ &= 36.73 \text{分} \rightarrow 36 \text{分} > 16 \text{分} \\ (\text{容量換算での比較}) &: (6611\text{m}^3) > (2880\text{m}^3) \end{aligned}$$

管路内水位応答解析による原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位の算定

1. 概要

海水貯留堰で発生するスロッシングによる水面揺動が、取水路内を伝搬して原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位に与える影響を確認することを目的として、取水路全体の管路解析モデルを用いた管路内水位応答解析を実施した。評価にあたっては、海水貯留堰で発生するスロッシングの影響によって、原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位がスロッシング継続時に設計取水可能水位（T.M.S.L. -4.92m）を下回っていないことを確認する。

また、本解析によって計算される原子炉補機冷却海水ポンプ位置の最低水位が、本編で実施したスロッシング解析結果から推定する同位置の最低水位（海水貯留堰の最低水位と同じとみなす）を下回らないことを確認することによって、海水貯留堰からスクリーン室までの範囲をモデル化したスロッシング解析モデルによる評価に保守性があることを示す。

2. 基礎方程式

管路内水位応答解析では、非定常の開水路及び管路流れの連続式・運動方程式を用いた。

【開水路】

・運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left(\frac{n^2 |v|v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta x} f \frac{|v|v}{2g} \right) = 0$$

・連続式

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

【管路】

・運動方程式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gA \left(\frac{n^2 |v|v}{R^{4/3}} + \frac{1}{\Delta x} f \frac{|v|v}{2g} \right) = 0$$

・連続式

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

ここに、 t : 時間 Q : 流量 v : 流速 x : 管底に沿った座標

A : 流水断面積

H : 圧力水頭+位置水頭 (管路の場合), 位置水頭 (開水路の場合)

z : 管底高 g : 重力加速度

n : マニングの粗度係数 R : 径深

Δx : 管路の流れ方向の長さ f : 局所損失係数

【水槽及び立坑部】

$$A_p \frac{dH_p}{dt} = Q_s$$

ここに A_p : 水槽の平面積 (水位 の関数となる)

H_p : 水槽水位

Q_s : 水槽へ流入する流量 の総和

t : 時間

3. 解析条件

耐津波設計における管路内水位応答解析では、不確かさの考慮として、表 5.3 参 2-1 に示すとおり 8 ケースのパラメータスタディを実施し、津波水位への影響を確認している。

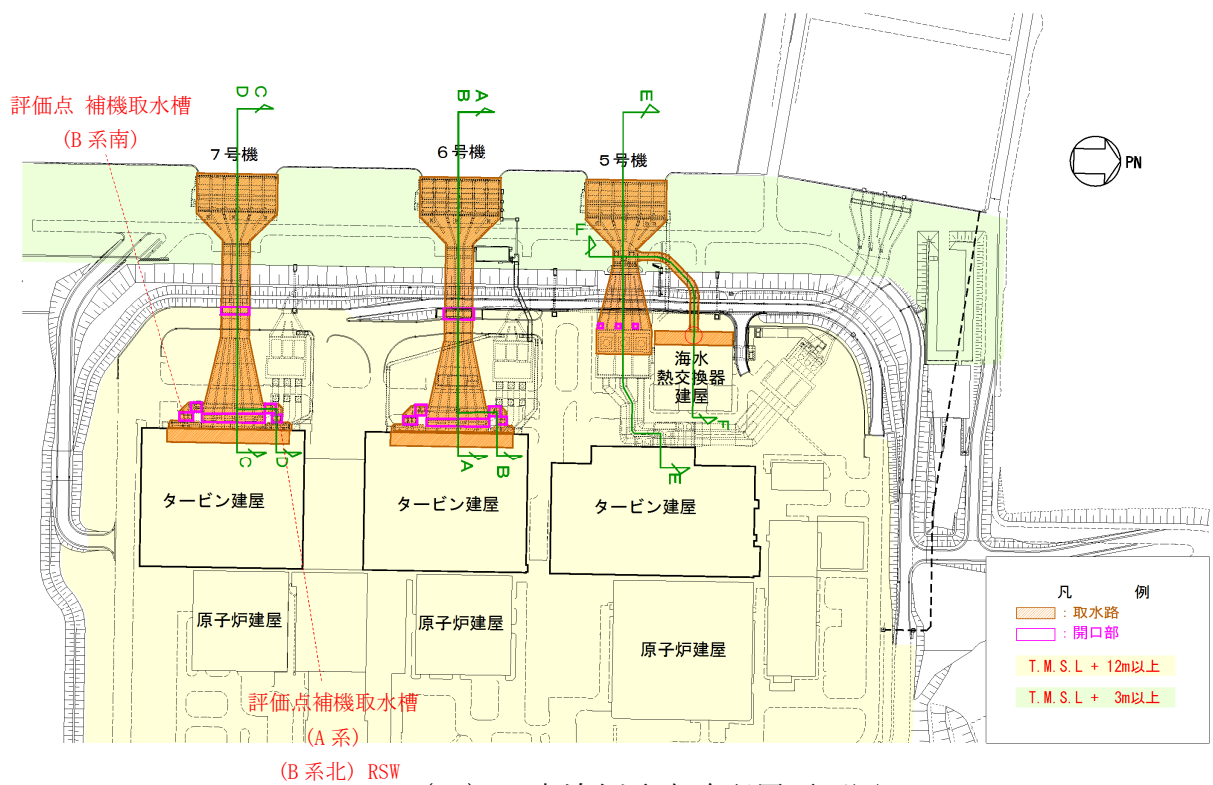
管路解析の解析条件を表 5.3 参 2-2，取水路の構造図を図 5.3 参 2-1，管路解析モデルを図 5.3 参 2-2 に示す。

表 5.3 参 2-1 計算ケース

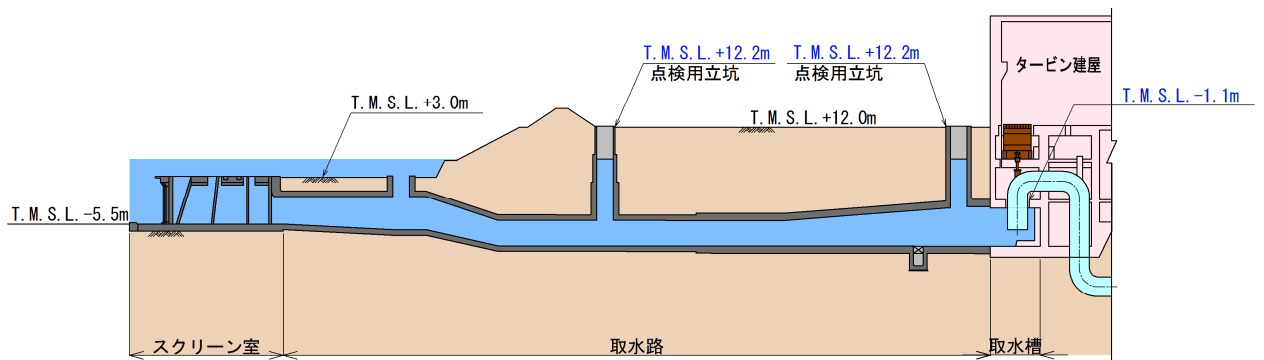
ケース	スクリーン損失の有無	貝付着の有無	原子炉補機冷却海水ポンプ稼働の有無
1	なし	あり (n=0.02)	なし (流量 0 m ³ /s)
2	なし	あり (n=0.02)	あり (流量 3 m ³ /s)
3	あり	あり (n=0.02)	なし (流量 0 m ³ /s)
4	あり	あり (n=0.02)	あり (流量 3 m ³ /s)
5	なし	なし (n=0.015)	なし (流量 0 m ³ /s)
6	なし	なし (n=0.015)	あり (流量 3 m ³ /s)
7	あり	なし (n=0.015)	なし (流量 0 m ³ /s)
8	あり	なし (n=0.015)	あり (流量 3 m ³ /s)

表 5.3 参 2-2 管路解析における解析条件

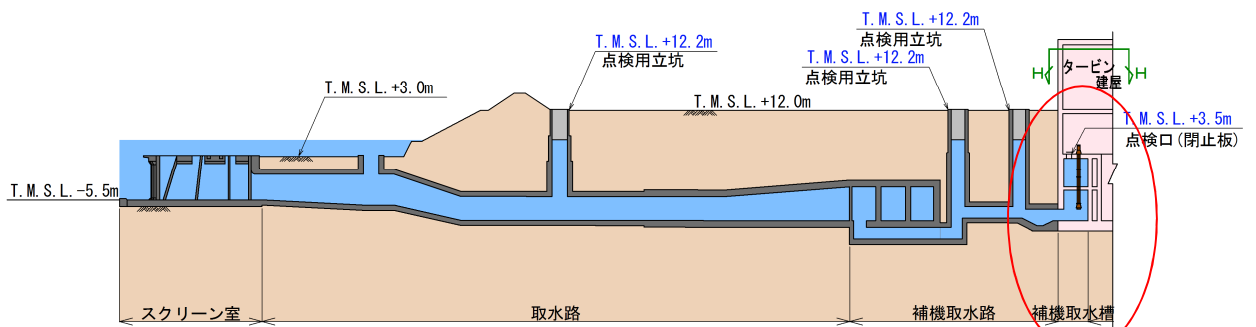
計算時間間隔 Δt	0.005 秒	
取水条件	ポンプ種類	ポンプ稼働条件
	CWP(循環水ポンプ)	0 (m ³ /h)
	RSW(原子炉補機冷却海水ポンプ)	0.5 (m ³ /s/台) × 6 台 =3 (m ³ /s)
	TSW(タービン補機冷却海水ポンプ)	0 (m ³ /h)
摩擦損失係数 (マンニングの粗度係数)	$n=0.02\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ (貝付着あり) $n=0.015\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ (貝付着なし)	
貝の付着代	貝代 10cm を考慮	
局所損失係数	電力土木技術協会(1995) : 火力・原子力発電所土木構造物の設計—増補改訂版— 千秋信一(1967) : 発電水力演習, 土木学会(1999) : 水理公式集 [平成 11 年版] による	



(1) 大湊側取水路配置平面図



(2) 7号機 C-C 断面図



(3) 7号機 D-D 断面図

図 5.3 参 2-1 取水路の構造

評価点 補機取水槽

(A系)

(B系北)

(B系南)

評価点 補機取水槽
 (A系)
 (B系北)
 (B系南)

【入力波形】スロッシング解析結果

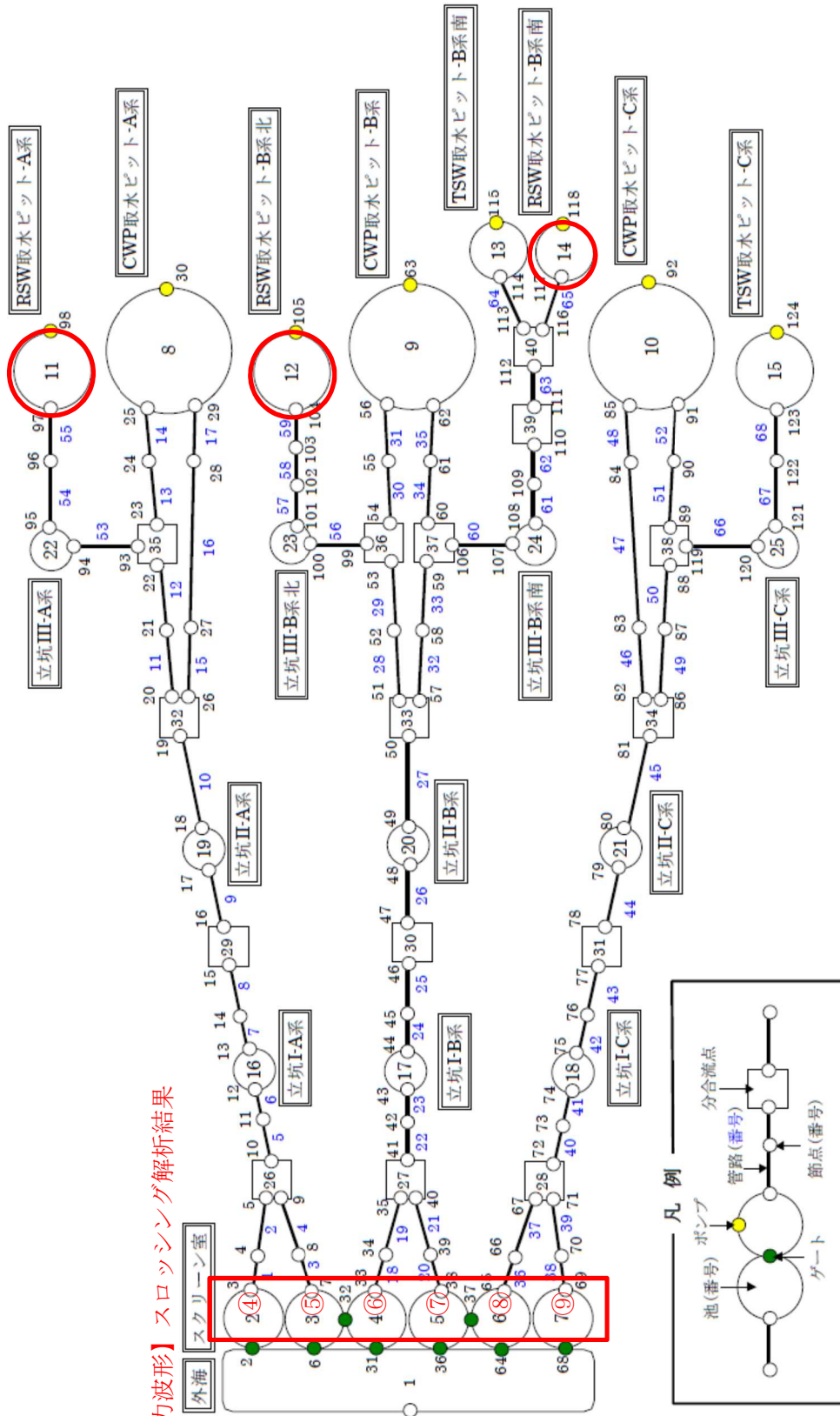
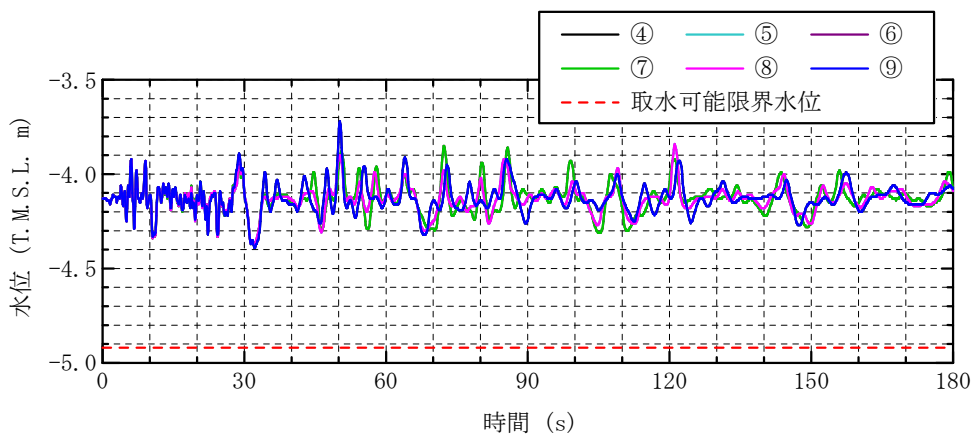


図 5.3 参 2-2 7号機取水路の管路解析モデル

4. 入力波形

管路内水位応答解析の入力波形は、図 5.3 参 2-3 に示すスロッシング解析で得られたスクリーン室位置の水位時刻歴波形を用いる。



水平加振方向：護岸直角

図 5.3 参 2-3 スクリーン室奥における水位時刻歴波形【再掲】

5. 解析結果

管路内水位応答解析で得られた原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形を図 5.3 参 2-4 から図 5.3 参 2-11, 最低水位を表 5.3 参 2-3 から表 5.3 参 2-10 に示す。なお, ここではスクリーン室位置④から⑨で最低水位が最も低いスクリーン室④及び⑨を比較対象とした。

解析の結果, 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の最低水位は, ケース 1 と 5 の RSW_B 系北位置の T. M. S. L. -4.26m であり, いずれのケースについてもスクリーン室位置の最低水位を下回っておらず, 取水可能限界水位 (T. M. S. L. -4.92m) も下回らないことを確認した。なお, スクリーン室位置と原子炉補機冷却海水ポンプ位置で波形の卓越周期が大きく異なるのは, 取水路内の損失や, 固有周期が長いと考えられる取水路内で周期の短い波が伝搬しにくいことが要因であると考えられる。

以上のことから, 海水貯留堰からスクリーン室までをモデル化したスロッシング解析の水位変動に基づいて原子炉補機冷却海水ポンプ位置の最低水位を推定する方法が, 保守性という観点から妥当であることも確認できた。

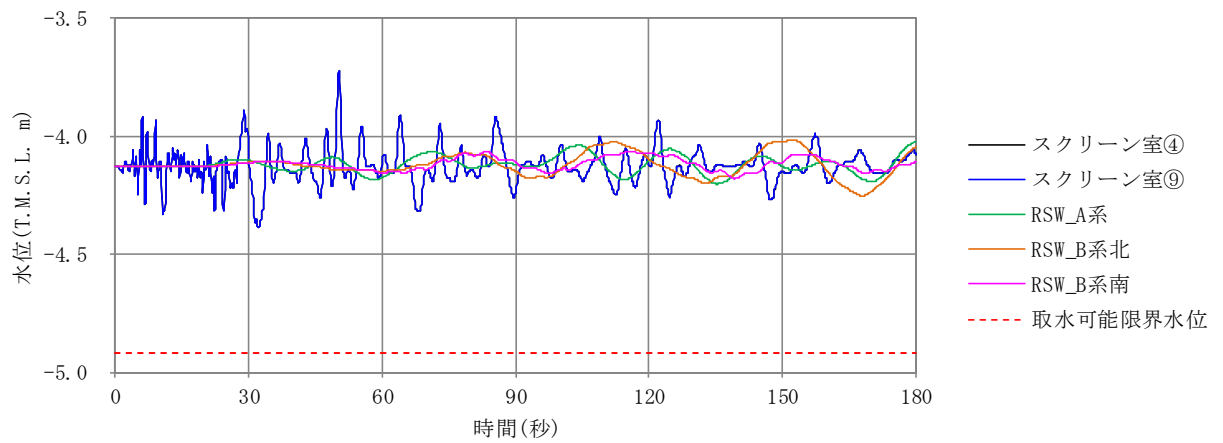


図 5.3 参 2-4 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形

(ケース 1 : スクリーン損失なし, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

表 5.3 参 2-3 最低水位

(ケース 1 : スクリーン損失なし, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

評価位置	最低水位 (T. M. S. L. m)
スクリーン室④	-4.39
スクリーン室⑨	-4.39
RSW_A 系	-4.21
RSW_B 系北	-4.26
RSW_B 系南	-4.11

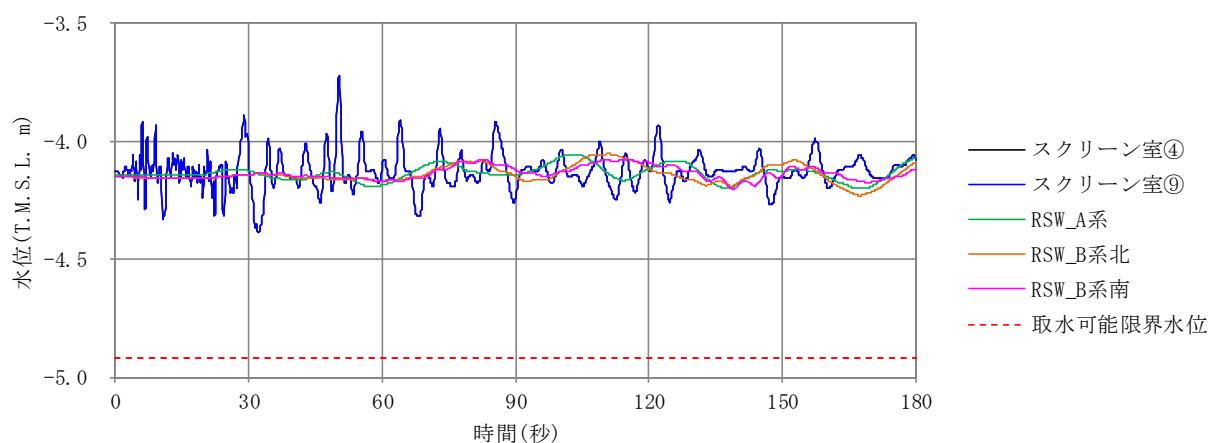


図 5.3 参 2-5 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 2: スクリーン損失なし, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

表 5.3 参 2-4 最低水位

(ケース 2: スクリーン損失なし, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

評価位置	最低水位 (T. M. S. L. m)
スクリーン室④	-4.39
スクリーン室⑨	-4.39
RSW_A 系	-4.21
RSW_B 系北	-4.24
RSW_B 系南	-4.21

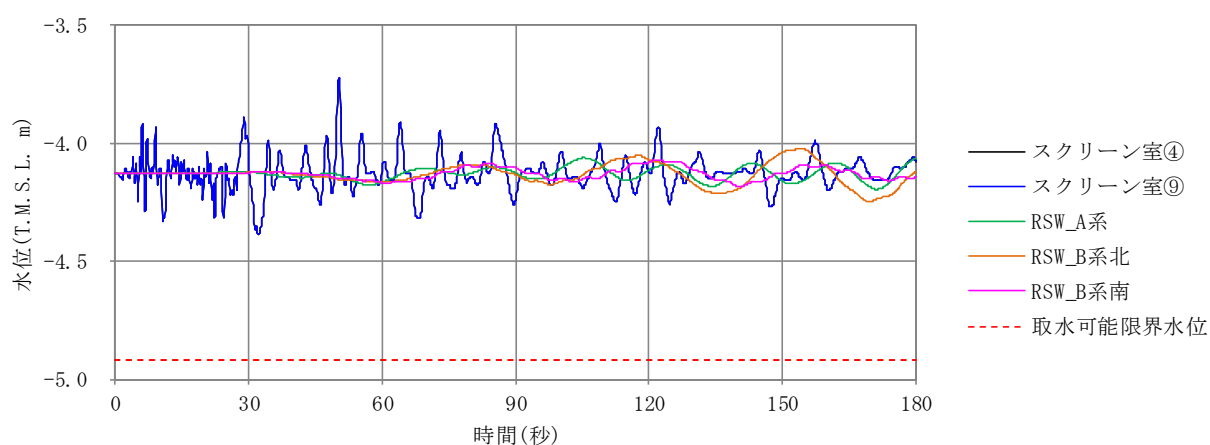


図 5.3 参 2-6 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 3: スクリーン損失あり, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

表 5.3 参 2-5 最低水位

(ケース 3: スクリーン損失あり, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

評価位置	最低水位 (T. M. S. L. m)
スクリーン室④	-4.39
スクリーン室⑨	-4.39
RSW_A 系	-4.20
RSW_B 系北	-4.25
RSW_B 系南	-4.19

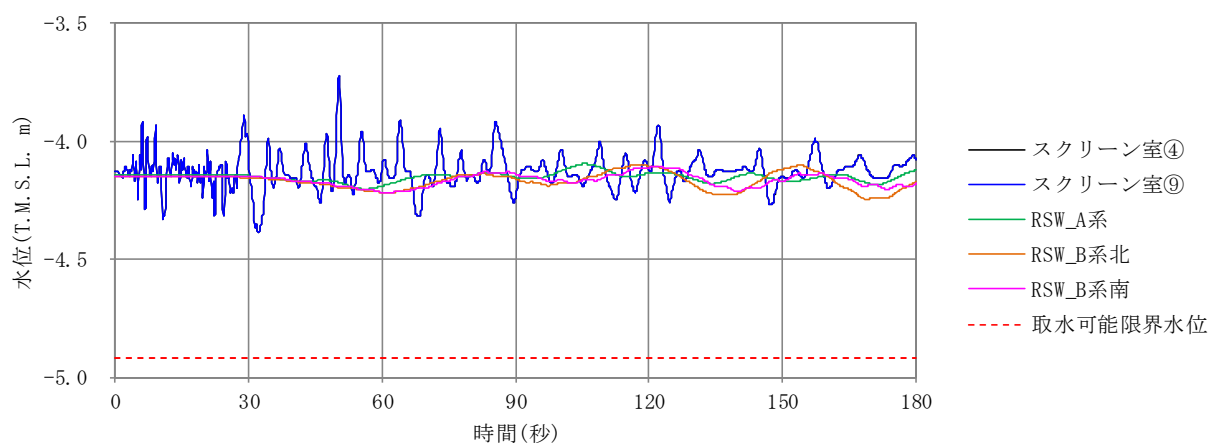


図 5.3 参 2-7 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 4: スクリーン損失あり, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

表 5.3 参 2-6 最低水位

(ケース 4: スクリーン損失あり, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

評価位置	最低水位 (T. M. S. L. m)
スクリーン室④	-4.39
スクリーン室⑨	-4.39
RSW_A 系	-4.21
RSW_B 系北	-4.25
RSW_B 系南	-4.22

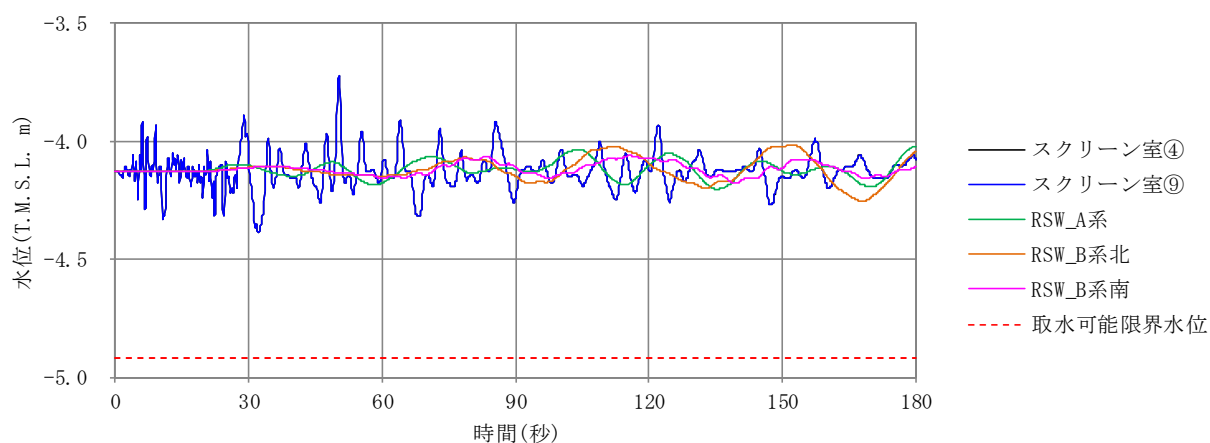


図 5.3 参 2-8 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 5: スクリーン損失なし, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

表 5.3 参 2-7 最低水位

(ケース 5: スクリーン損失なし, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

評価位置	最低水位 (T. M. S. L. m)
スクリーン室④	-4.39
スクリーン室⑨	-4.39
RSW_A 系	-4.21
RSW_B 系北	-4.26
RSW_B 系南	-4.19

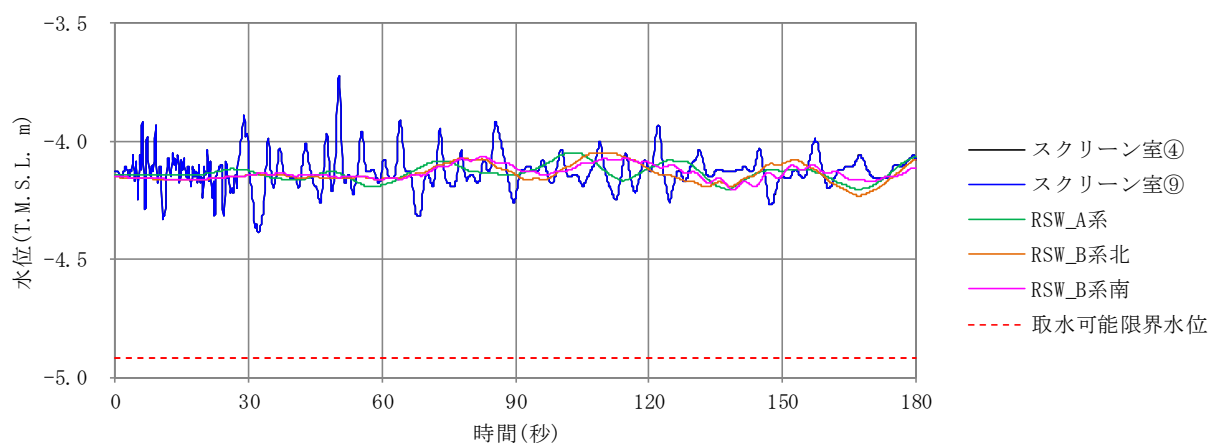


図 5.3 参 2-9 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 6: スクリーン損失なし, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

表 5.3 参 2-8 最低水位

(ケース 6: スクリーン損失なし, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

評価位置	最低水位 (T. M. S. L. m)
スクリーン室④	-4.39
スクリーン室⑨	-4.39
RSW_A 系	-4.21
RSW_B 系北	-4.24
RSW_B 系南	-4.21

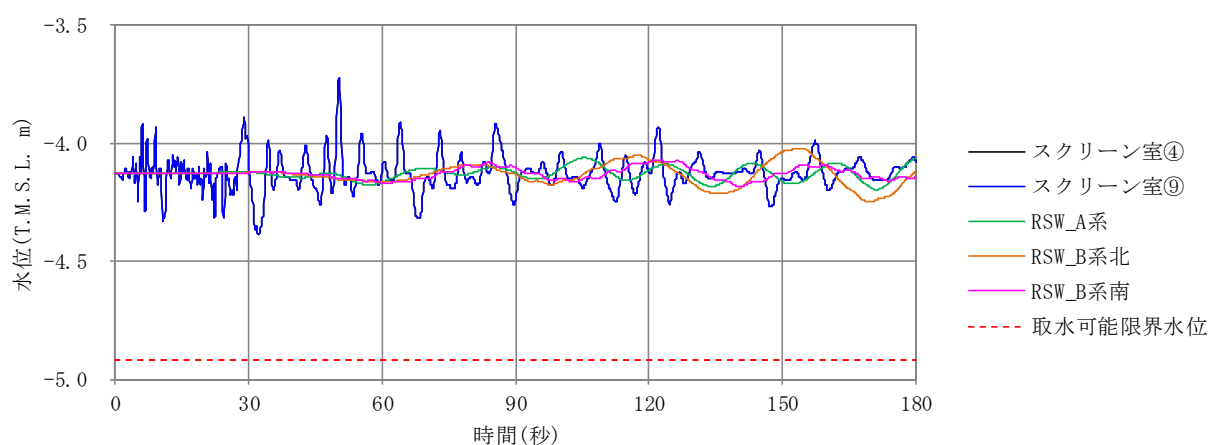


図 5.3 参 2-10 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 7: スクリーン損失あり, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

表 5.3 参 2-9 最低水位

(ケース 7: スクリーン損失あり, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

評価位置	最低水位 (T. M. S. L. m)
スクリーン室④	-4.39
スクリーン室⑨	-4.39
RSW_A 系	-4.20
RSW_B 系北	-4.25
RSW_B 系南	-4.19

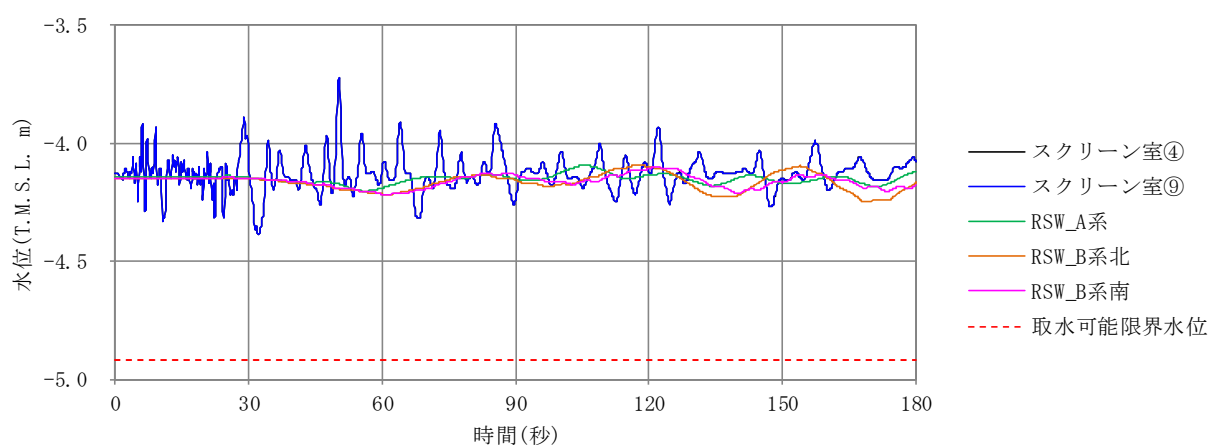


図 5.3 参 2-11 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 8: スクリーン損失あり, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

表 5.3 参 2-10 最低水位

(ケース 8: スクリーン損失あり, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

評価位置	最低水位 (T. M. S. L. m)
スクリーン室④	-4.39
スクリーン室⑨	-4.39
RSW_A 系	-4.21
RSW_B 系北	-4.25
RSW_B 系南	-4.22

水平 2 方向同時加振による影響評価

1. 概要

「5.3 スロッシングによる海水貯留堰貯水量に対する影響評価について」では、水平成分に方向を持たない余震（S d-1）を入力地震波として、海水貯留堰を護岸直角方向（東西方向）に加振した場合と護岸平行方向（南北方向）に加振した場合の 2 ケースのスロッシング解析を実施し、それぞれの結果を整理した。

本参考資料では、スロッシングによる溢水量及び水位低下量を保守的に評価するため、護岸直角方向（東西方向）と護岸平行方向（南北方向）の 2 方向に同位相の余震を入力し、水平 2 方向に同時加振した場合の溢水への影響を評価する。

スロッシング解析モデルと水位時刻歴波形の抽出位置（①～⑨）を図 5.3 参 3-1、解析条件を表 5.3 参 3-1 に示す。

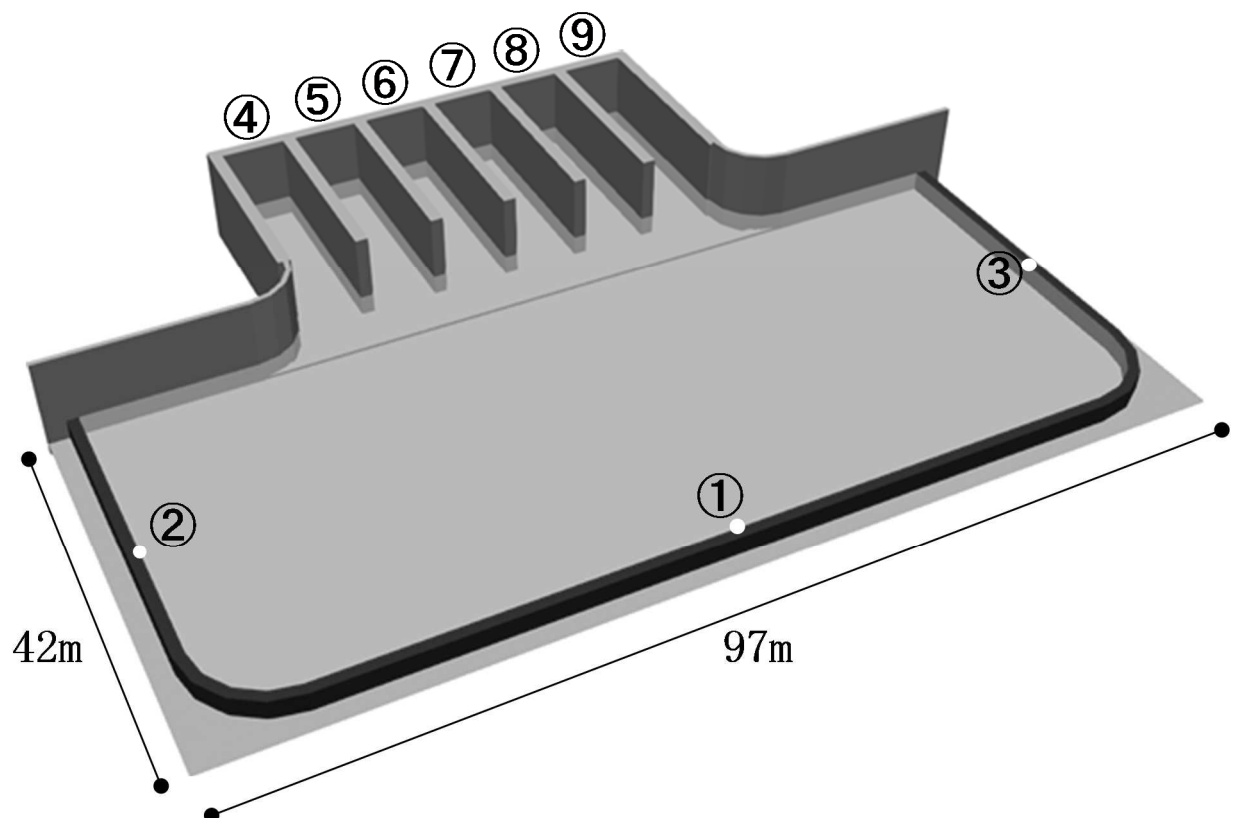


図 5.3 参 3-1 スロッシング解析モデル(OpenFOAM) (①～⑨は水位抽出位置)【再掲】

表 5.3 参 3-1 解析条件【再掲】

モデル化範囲	<ul style="list-style-type: none"> ● 海水貯留堰からスクリーン室まで
境界条件	<ul style="list-style-type: none"> ● 上部は開放とし，他は壁による境界（ノンスリップ）を設定。
溢水量	<ul style="list-style-type: none"> ● スロッシングにより海水貯留堰外側に溢れ出た海水の体積を溢水量として計上する。
初期水位	<ul style="list-style-type: none"> ● 検討項目 1 : T. M. S. L. -3.5m ● 検討項目 2 : T. M. S. L. -4.13m
入力地震波	<ul style="list-style-type: none"> ● 「(3) 入力地震動の策定」で示した，余震による海底面の加速度時刻歴波形を入力地震波とする。
計算時間	<ul style="list-style-type: none"> ● 20 分間（1200 秒間）（検討項目 1） ● 3 分間（180 秒間）（検討項目 2）
解析コード	<ul style="list-style-type: none"> ● OpenFOAM 3.0.1 ● オープンソースの流体解析ソフトウェアであり，実験結果等との比較を行い，スロッシング現象を精度よく計算できることが確認されている。
海水の物性値	<ul style="list-style-type: none"> ● 動粘性係数 $1.05 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ ● 密度 $1024 [\text{kg}/\text{m}^3]$ <p>鈴木ら(1980)に基づき設定。</p>
水位抽出位置	<ul style="list-style-type: none"> ● 海水貯留堰天端を超える様子を参考として確認するために，海水貯留堰北端，東端及び西端を代表点として①～③の 3 点（各壁の中央）を水位抽出位置とする。（検討項目 1） ● スクリーン室奥での水位変動を確認するために，スクリーン室奥の④～⑨の 6 点を水位抽出位置とする。（検討項目 2）
その他	<ul style="list-style-type: none"> ● スクリーンなどの機器については，溢水量を保守的に考慮するためにモデル化しない。 ● 格子サイズは $25\text{cm} \times 25\text{cm} \times 25\text{cm}$ を基本とする。 ● 海水貯留堰鋼管矢板はモデル簡略化のため海水貯留堰内側の壁面形状を直線（隅角部は曲線）としてモデル化する。

2. 解析結果

2.1 検討項目 1

水平 2 方向同時加振した場合の溢水量を考慮しても、海水貯留堰外側の海水位が海水貯留堰天端高を下回る時間の約 16 分に対して、十分な貯留量が確保されていることを確認する。

水平 2 方向同時加振した場合の海水貯留堰位置におけるスロッシング時の水位時刻歴グラフを図 5.3 参 3-2 に示す。また、スロッシングによる 20 分間の溢水量を図 5.3 参 3-3、表 5.3 参 3-2 に示す。溢水量は単調に増加しており、スロッシングによる 20 分間の溢水量は 369m^3 である。また、水位抽出位置で最高水位となる時間の水位分布を図 5.3 参 3-4 に示す。なお、水位抽出位置①で最高水位 T. M. S. L. -3.24m である。

この結果に基づいて海水貯留堰の有効容量からスロッシングによる溢水量を除外したときの原子炉補機冷却海水ポンプの運転継続可能時間は約 42 分となる。したがって、水平 2 方向同時加振によるスロッシングを考慮しても、海水貯留堰外側の海水位が海水貯留堰天端を下回る時間の約 16 分に対して、十分な貯留量が確保されていることが確認できた。

スロッシングによる 20 分間の溢水量 = 369m^3 (水平 2 方向同時加振によるスロッシング)

溢水を考慮した非常用海水

$$\begin{aligned}\text{ポンプの運転継続可能時間} &= (\text{有効容量} - \text{溢水量}) \div \text{非常用海水ポンプ取水量} \\ &= (8000\text{m}^3 - 369\text{m}^3) \div 180\text{m}^3/\text{分} \\ &= 42.39 \text{ 分} \rightarrow \underline{42 \text{ 分}} > 16 \text{ 分}\end{aligned}$$

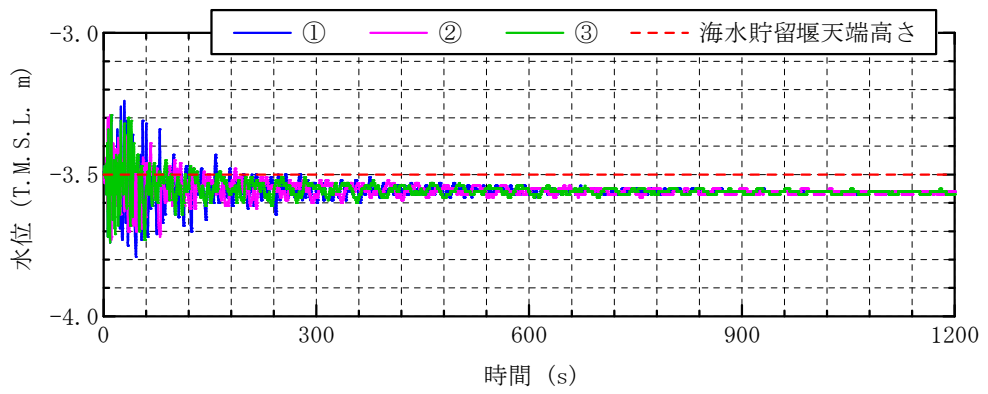


図 5.3 参 3-2 海水貯留堰位置における水位時刻歴波形（水平 2 方向同時加振）

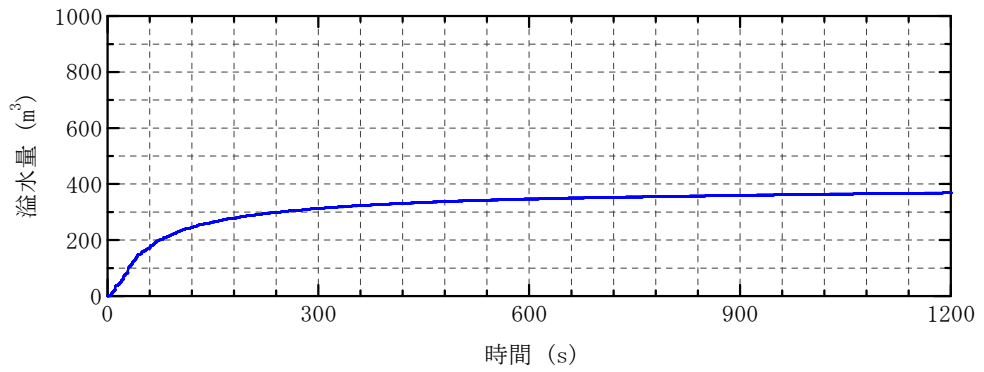


図 5.3 参 3-3 スロッシングによる溢水量の時間変化（水平 2 方向同時加振）

表 5.3 参 3-2 スロッシングによる 20 分間の溢水量

加振方向	溢水量
水平 2 方向同時加振	369m ³

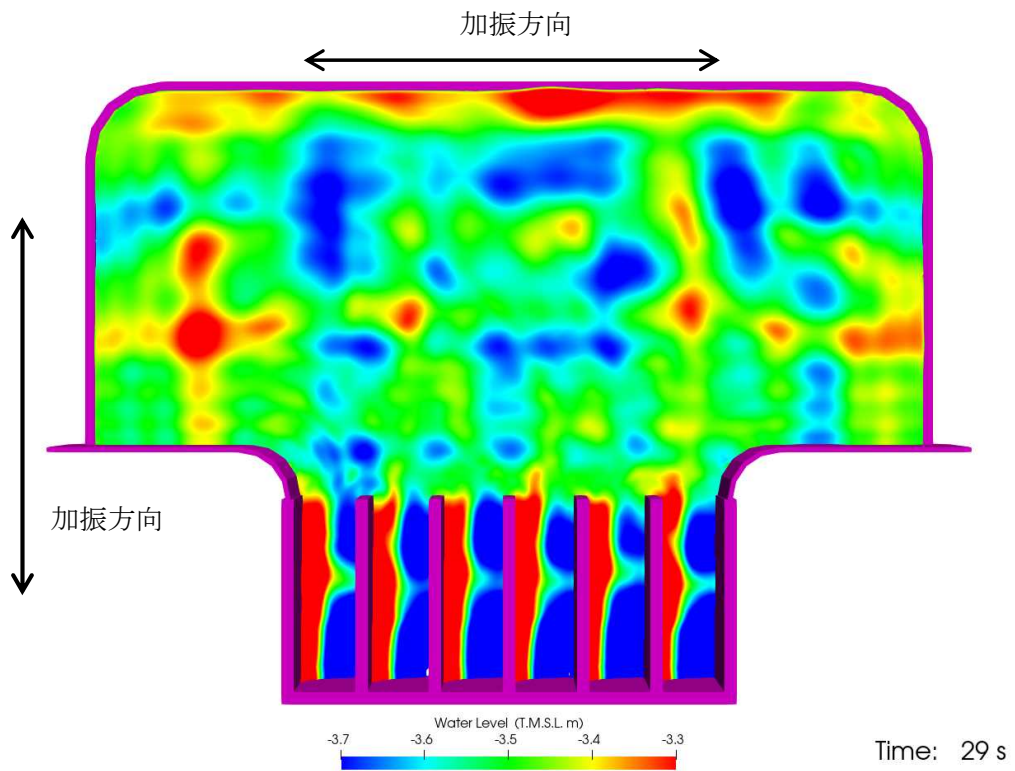


図 5.3 参 3-4 スロッシング時の水位分布 (水平 2 方向同時加振 : 29 秒時)

2.2 検討項目 2

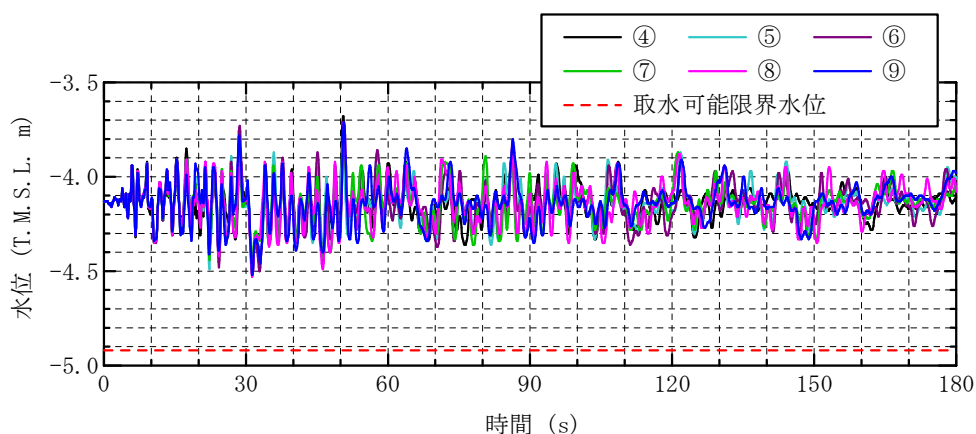
水平 2 方向同時加振した場合の水位変動を考慮しても、海水貯留堰内水位が原子炉補機冷却海水ポンプの取水可能限界水位 (T. M. S. L. -4.92m) を下回らないことを確認する。

スクリーン室奥の水位抽出位置 (④~⑨) におけるスロッシング時の水位時刻歴を図 5.3 参 3-5 に示す。また、スロッシング時の最低水位を表 5.3 参 3-3 に示す。

スクリーン室奥でのスロッシング時の最低水位は約 T. M. S. L. -4.6m である。よって、スロッシングによる溢水及び水面の揺動を考慮しても、海水貯留堰内水位が原子炉補機冷却海水ポンプの取水可能限界水位 (T. M. S. L. -4.92m) を下回らないことを確認した。

スロッシング時の最低水位 = T. M. S. L. -4.6m

→ T. M. S. L. -4.6m > T. M. S. L. -4.92m



水平 2 方向同時加振

図 5.3 参 3-5 スクリーン室奥における水位時刻歴波形

表 5.3 参 3-3 スロッシング時の最低水位

評価位置	最低水位 (T. M. S. L. m)
④	-4.51
⑤	-4.52
⑥	-4.52
⑦	-4.50
⑧	-4.54
⑨	-4.53

3. 加振方向別の溢水量の整理

ここでは、護岸直角方向（東西方向）に加振した場合と護岸平行方向（南北方向）に加振した場合のそれぞれの溢水量を整理した。

スロッシングによる 20 分間の溢水量は、護岸直角方向（東西方向）に加振した場合で 351m³、護岸平行方向（南北方向）に加振した場合で 338m³ である。参考としてそれぞれの溢水量を足し合わせた場合でも、溢水量の和は 689m³ であり、溢水量の和を除外したときの非常用海水ポンプの運転継続可能時間は約 40 分となる。この場合においても、海水貯留堰外側の海水位が海水貯留堰天端を下回る時間の約 16 分に対して、十分な貯留量が確保されている。

5.5 津波による溢水に対して浸水対策を実施する範囲の考え方について

5.5 津波による溢水に対して浸水対策を実施する範囲の考え方について

(1) 概要

本資料は、津波による溢水に対して浸水対策を実施する範囲の考え方を説明するものである。

(2) 津波による溢水で発生する溢水量及び浸水水位と溢水の発生を想定するエリア

「津波による溢水の重要な安全機能及び重大事故等に対処するために必要な機能への影響防止（内郭防護）に係る評価」では、津波による溢水を考慮した浸水範囲及び溢水量を算出し、浸水防護重点化範囲へ浸水する可能性の有無を評価している。

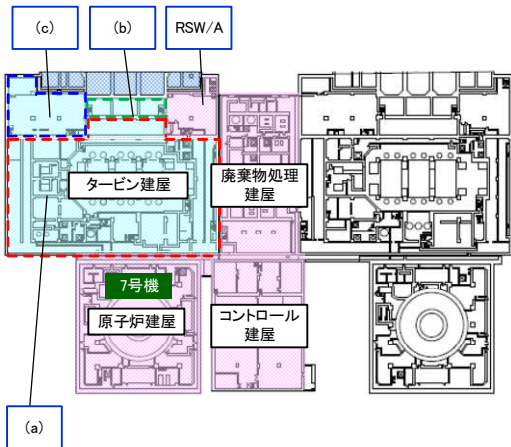
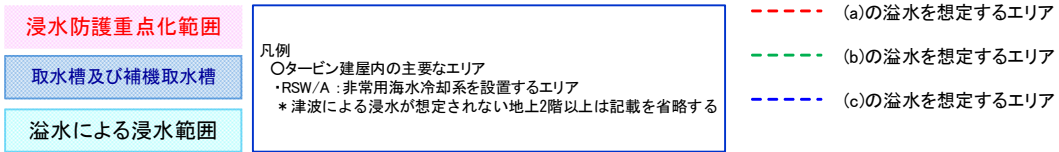
7号機で想定している津波による溢水は、以下の(a)～(c)のエリアにおける溢水を想定している。

- (a) タービン建屋内の復水器を設置するエリアにおける溢水
- (b) タービン建屋内の循環水ポンプを設置するエリアにおける溢水
- (c) タービン補機冷却水系熱交換器を設置するエリアにおける溢水

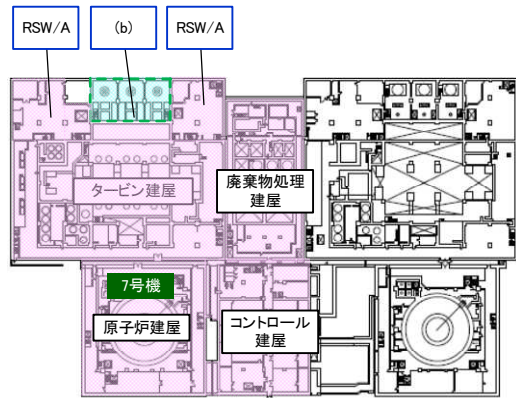
(a)～(c)のエリアにおける合計溢水量とそれによる浸水水位を表5.5-1にまとめ、(a)～(c)の溢水の発生を想定するエリアを図5.5-1に示す。

表 5.5-1 (a)～(c)のエリアにおける合計溢水量及び浸水水位

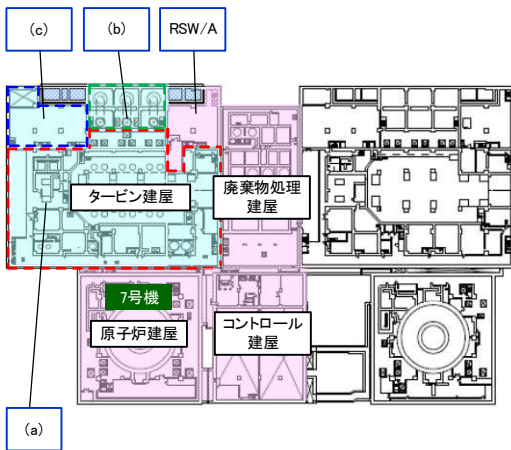
エリア	合計溢水量(m ³)	浸水水位 T. M. S. L. (m)
(a)	約 23750	約+2.40
(b)	約 4649	約+11.85
(c)	約 2080	約-0.80



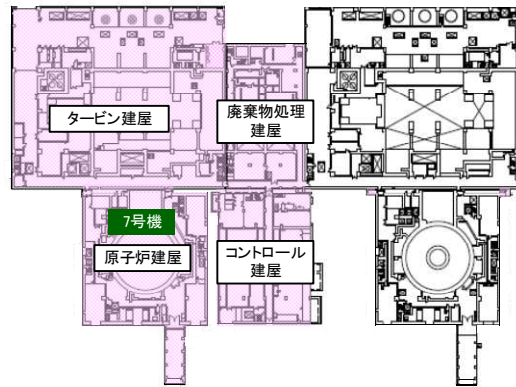
地下3階(タービン建屋地下2階)
 ＊タービン建屋床面高さT.M.S.L.-5.1m



地下1階(タービン建屋地下1階)
 ＊タービン建屋床面高さT.M.S.L.+4.9m



地下2階(タービン建屋地下中間2階)
 ＊タービン建屋床面高さT.M.S.L.-1.1m



地上1階(タービン建屋地上1階)
 ＊タービン建屋床面高さT.M.S.L.+12.3m

図 5.5-1 (a)～(c)の溢水の発生を想定するエリア

(3) 津波による溢水の浸水水位に対し浸水対策を実施する範囲

(2)で示したように(a)～(c)のエリアでは津波による溢水が想定され、これらの浸水水位に対して浸水防護重点化範囲への浸水を防止するため、浸水対策を実施する。浸水水位はそれ自体に保守性を含んでいる値となっているが、浸水対策範囲の設定には設計上の裕度を考慮している。裕度を考慮した浸水対策範囲の考え方と浸水対策範囲について表 5.5-2 にまとめる。

表 5.5-2 (a)～(c)のエリアにおける浸水対策を実施する範囲とその考え方

エリア	浸水水位 T. M. S. L. (m)	浸水対策範囲 T. M. S. L. (m)	浸水対策を実施する範囲の考え方
(a)	約+2.40	+3.5 以下	浸水水位に対して約 0.5mの加算を基本的な考えとし、さらに扉、開口部、貫通部等の配置状況も踏まえ対策工事範囲の切りの良い高さを設定。
(b)	約+11.85	+12.3 以下	浸水水位に対して対策工事範囲の切りの良い、タービン建屋1階 T. M. S. L. +12.3m までの高さとして設定。
(c)	約-0.80	±0.0 以下	浸水水位に対して約 0.5mの加算を基本的な考えとし、さらに扉、開口部、貫通部等の配置状況も踏まえ対策工事範囲の切りの良い高さを設定。

タービン建屋内での海水配管等の破断想定箇所について

(1) 概要

7号機で想定している溢水は、以下の(a)～(c)のエリアにおける溢水を想定している。

- (a) タービン建屋内の復水器を設置するエリアにおける溢水
- (b) タービン建屋内の循環水ポンプを設置するエリアにおける溢水
- (c) タービン補機冷却水系熱交換器を設置するエリアにおける溢水

それぞれのエリアにおける海水配管等の破損想定箇所を図 5.5-参 1-1 に示す。

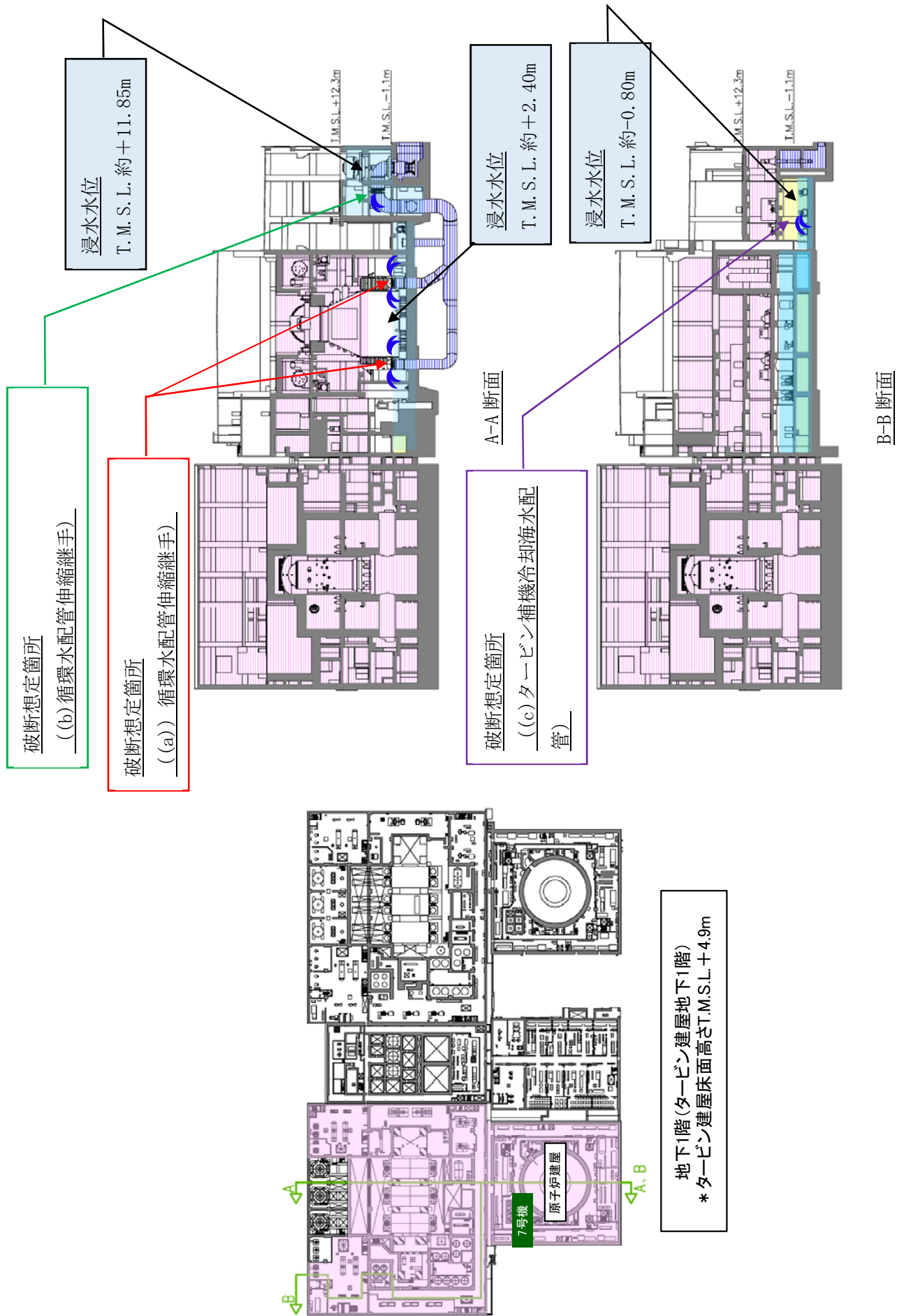


図5.5-1-1 タービン建屋内における溢水イメージと破断箇所