

2.4. LLW 輸送車両 (積載：空)

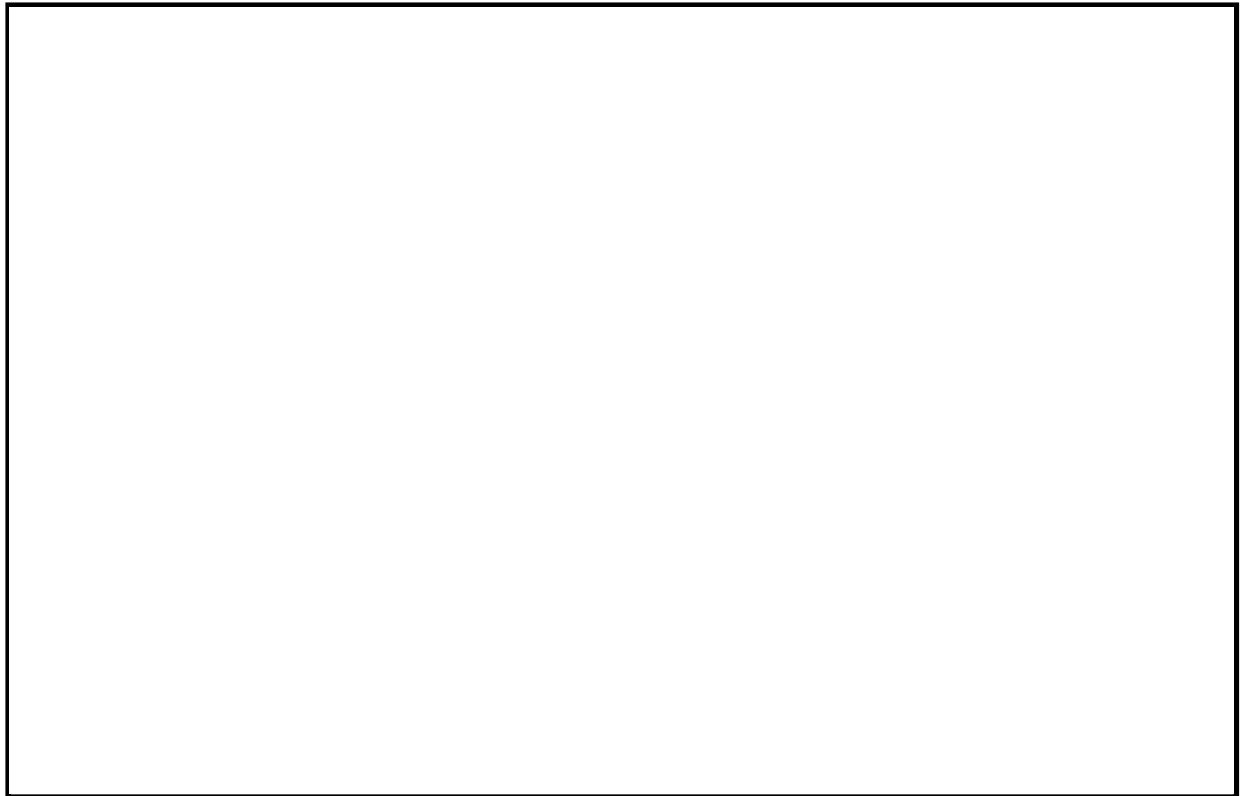


図 4.2-添 3-4 LLW 輸送車両 (積載：空)

密度算定方法	⑥車両重量 [t]	⑦部材密度 [t/m ³]	⑧積荷重量 [t]	⑨積荷密度 [t/m ³]	⑩LLW 容器重量 [t]	⑪体積 [m ³]	⑫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	図面等	7.85	図面等	①+②+③+④+⑤+ (⑥÷⑦)+(⑧÷⑨)	なし	(⑥+⑧+⑩) ÷⑪
気相部開放有	車検証等	7.85×0.65	図面等	7.85	図面等	①+②+③+④+⑤+ (⑥÷⑦)+(⑧÷⑨)	①	(⑥+⑧+⑩) ÷(⑪-⑫)

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	LLW 輸送容器 (空)	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 6.5% の密度)
		LLW 輸送容器固縛装置、重り	(積荷重量) ÷ (鉄の密度)

<密度算定の例 (15tトラック 3軸車の例) >

密度算定方法	体積 [m ³]									重量 [t]	車両密度 [t/m ³]
	①	②	③	④	⑤	⑥÷⑦	⑧÷⑨	⑩	⑫		
気相部開放無	3.42	1.70	0.50	0.08	10.96	2.23	0.64	19.54	-	18.77	0.96
気相部開放有	3.42	1.70	0.50	0.08	10.96	2.23	0.64	19.54	3.42	18.77	1.16
【参考評価】 気相部開放有	3.42	1.70	0.50	0.08	10.96	2.90	0.64	20.22	3.42	18.77	1.12

図 4.2-添 3-4 LLW 輸送車両 (積載：空) の密度算定方法, 体積算定方法, 及び算定結果の例につ

いて

2.5. LLW 輸送車両 (未積載)

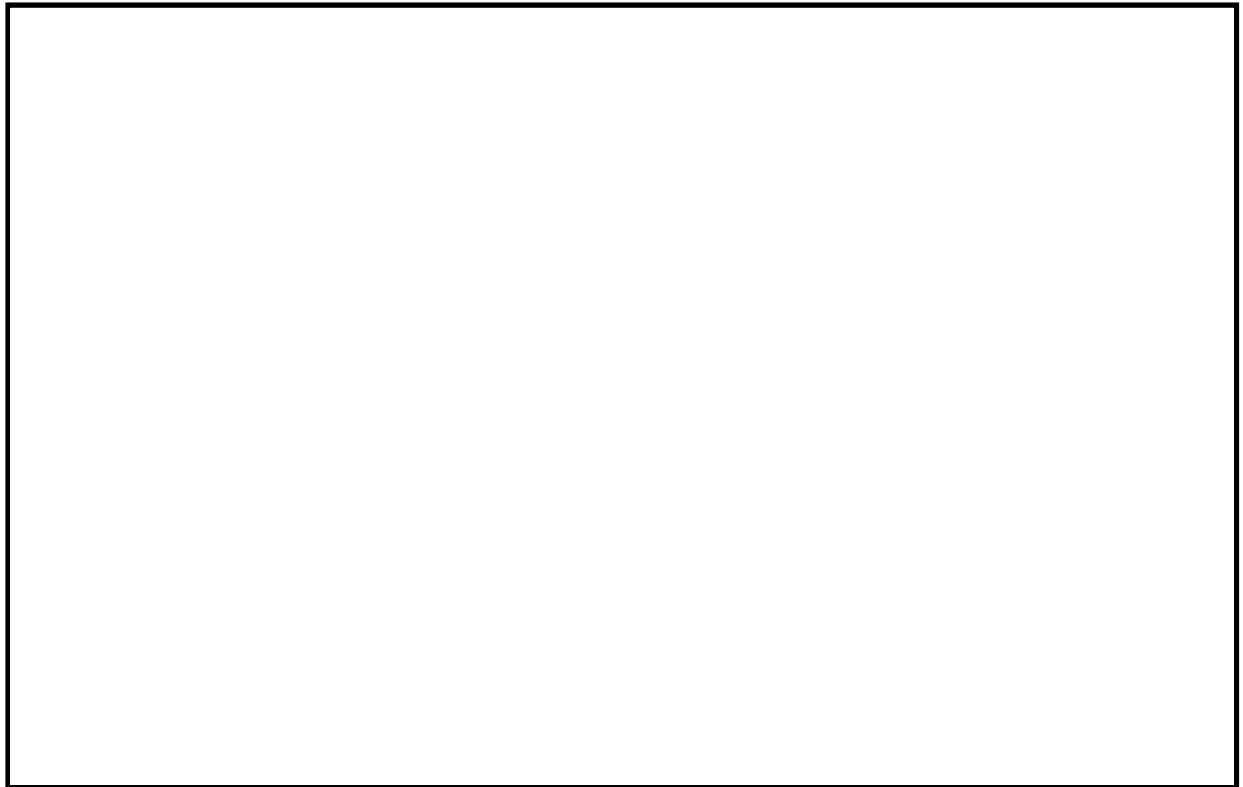


図 4.2-添 3-5 LLW 輸送車両(未積載)

密度算定方法	⑤車両重量 [t]	⑥部材密度 [t/m ³]	⑦積荷重量 [t]	⑧積荷体積 [t]	⑨LLW 容器重量[t]	⑩体積 [m ³]	⑪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	図面等	7.85	図面等	①+②+③+④+(⑤÷⑥)+(⑦÷⑧)	なし	(⑤+⑦+⑨)÷⑩
気相部開放有	車検証等	7.85×0.65	図面等	7.85	図面等	①+②+③+④+(⑤÷⑥)+(⑦÷⑧)	①	(⑤+⑦+⑨)÷(⑩-⑪)

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65%の密度)
		LLW 輸送容器固縛装置	(積荷重量) ÷ (鉄の密度)

<密度算定の例 (LLW 輸送車両(未積載)の例) >

密度算定方法	体積[m ³]								重量[t]	車両密度 [t/m ³]
	①	②	③	④	⑤÷⑥	⑦÷⑧	⑩	⑪		
気相部開放無	3.42	1.70	0.50	0.08	2.23	0.13	8.07	-	12.39	1.54
気相部開放有	3.42	1.70	0.50	0.08	2.23	0.13	8.07	3.42	12.39	2.67
【参考評価】 気相部開放無	3.42	1.70	0.50	0.08	2.90	0.13	8.75	-	12.39	1.42

図 4.2-添 3-5 LLW 輸送車両 (未積載) の密度算定方法, 体積算定方法, 及び算定結果の例につ

いて

4.3 燃料等輸送船の係留索の耐力について

4.3 燃料等輸送船の係留索の耐力について

(1) 概要

燃料等輸送船（以下、「輸送船」という。）は、津波警報等発令時、原則、緊急退避するが、津波流向及び物揚場と取水口との位置関係を踏まえ、短時間に津波が襲来する場合を考慮し、係留索の耐力について評価を実施する。

係留索については、船舶の大きさから一定の算式によって計算される数値（艀装数）に応じた仕様（強度、本数）を有するものを備えることが、日本海事協会（NK）の鋼船規則において定められている。

本書では、輸送船が備えている係留索の係留力及び津波による流圧力を石油会社国際海事評議会 OCIMF (Oil Companies International Maritime Forum) 刊行“Mooring Equipment Guidelines”の手法を用いて算出し、耐力評価を行う。なお、同書は船舶の係留方法・係留設備に関わる要求事項を規定するものであり、流圧力の評価については大型タンカーを主たる適用対象とするものであるが、輸送船は大型タンカーと同じ1軸船であり、水線下の形状が類似しているため、同評価を輸送船に適用することは可能と考える。

(2) 評価

a. 輸送船, 係留索, 係船柱

輸送船, 係留索, 係船柱の仕様を表 4.3-1 に, 配置を図 4.3-1 に示す。

表 4.3-1 輸送船, 係留索, 係船柱の仕様

項目		仕様
輸送船	総トン数	約 5,000 トン
	載貨重量トン	約 3,000 トン
	喫水	約 5m
	全長	100.0m (垂線間長: 94.4m)
	型幅	16.5m
	形状	(図 4.3-1 参照)
係留索	直径	60mm (ノミナル値)
	素材種別	Polyethylene Rope Grade 1
	破断荷重	279kN (キロニュートン) = 28.5tonf
	係船機ブレーキ力	$28.5\text{tonf} \times 0.7 \approx 20.0\text{tonf}$
係船柱	ビット数, 位置	(図 4.3-1 参照)
	係留状態	(図 4.3-1 参照)
	強度	25t, 50t

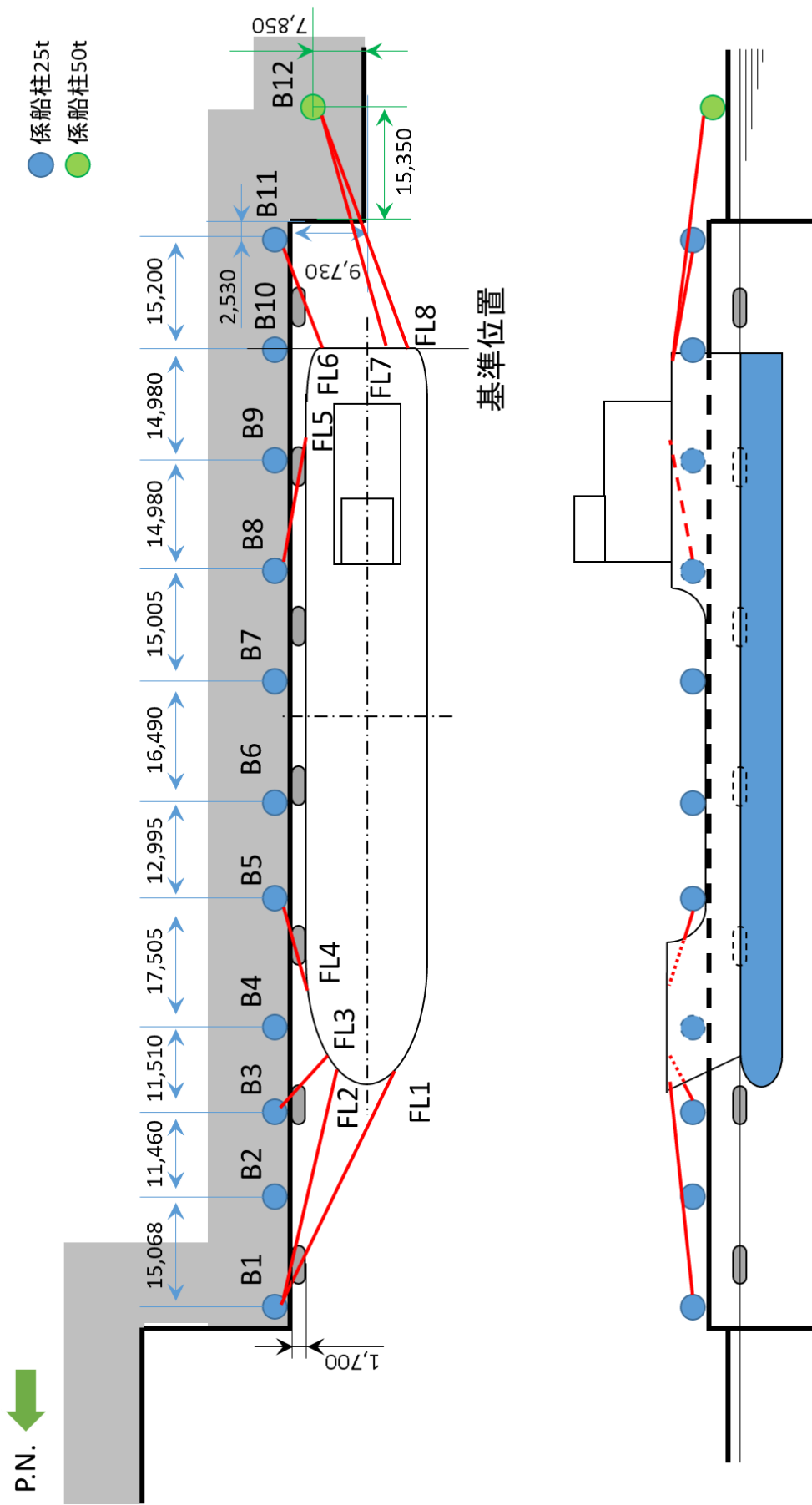


図 4.3-1 輸送船, 係留索, 係船柱の配置

b. 津波条件（流向，水位，流速）

襲来までに時間的余裕がなく，輸送船を離岸できない可能性がある基準津波 3 を評価条件とする。

基準津波 3 による物揚場近傍の流向は，図 4.3-2 に例示するとおり物揚場に対する接線方向の成分が支配的となる。これに対し，輸送船は物揚場（コンクリート製）と平行して接岸されることから，評価は輸送船の船首及び船尾方向の流圧力に対する係留索の耐力について実施する。

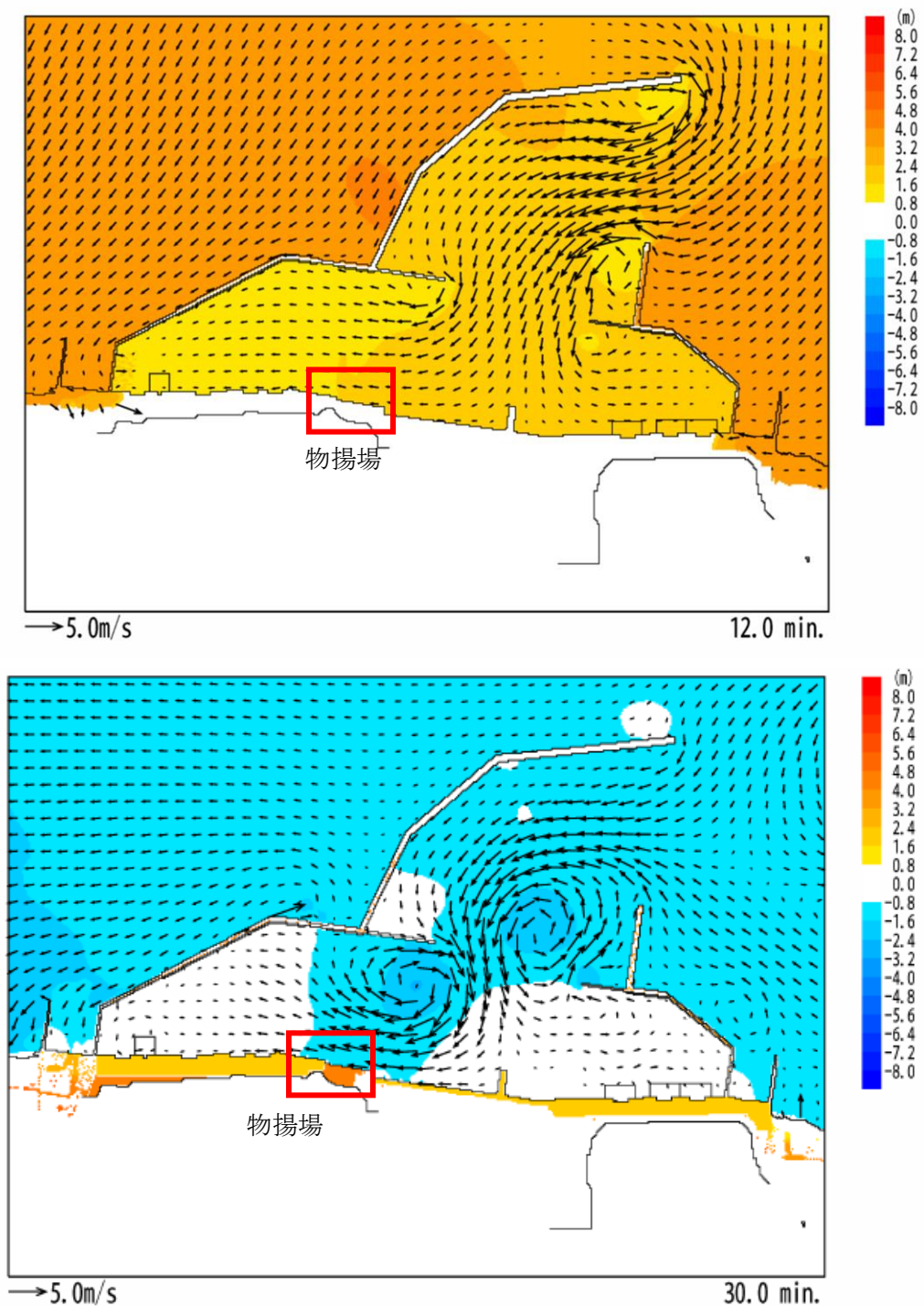


図 4.3-2 基準津波 3 の流向

一方、基準津波3の物揚場位置における水位及び接線方向成分の流速は、図4.3-3-1のとおりとなる。

図4.3-3-1に示すとおり地震発生後15分で第一波の最高점에達する。その後、引き波が発生し、流速は地震発生後30分に最大の3.2m/sに達する。

緊急退避時間との関係から、津波が最大流速に到達する前に輸送船は退避できると考えられるものの、今回は係留により対応することを仮定し、最大流速3.2m/sで生じる流圧力に対する係留力を評価する。

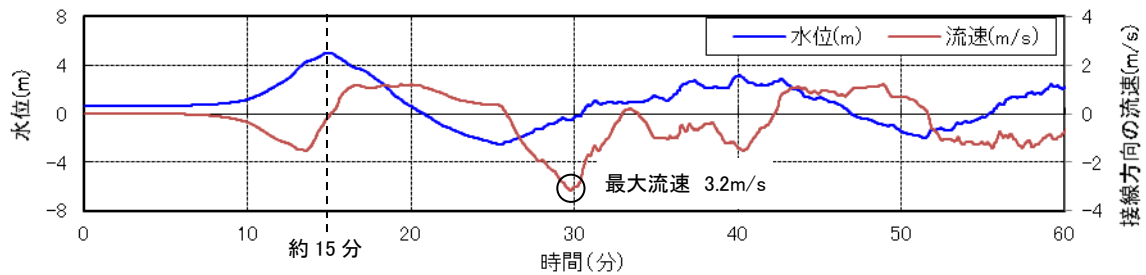


図 4.3-3-1 基準津波3の水位・流速（物揚場前面）

なお、地震等により防波堤の損傷を想定した場合（防波堤なしの条件）でも、接線方向成分の流速は、図4.3-3-2に示すとおり防波堤健全時（図4.3-3-1）よりも小さいため、流速条件は健全状態における流速に包含される。

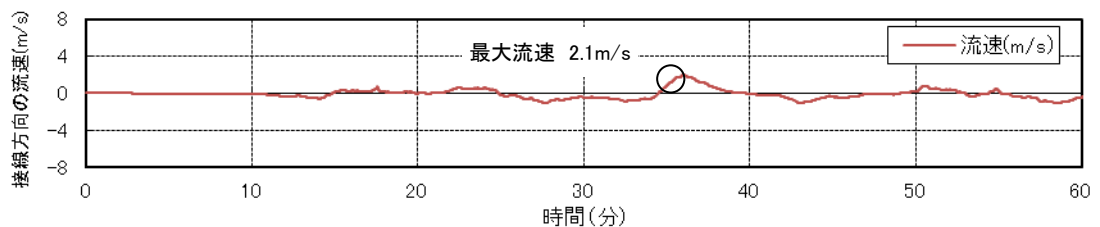
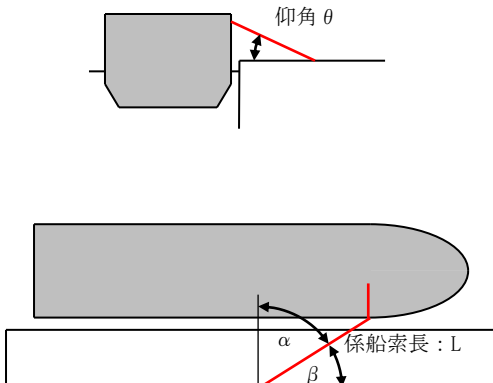


図 4.3-3-2 防波堤損傷時における基準津波3の流速（物揚場前面）

c. 係留力

係留力の計算方法を表 4.3-2 に、計算結果を表 4.3-3、図 4.3-4 及び図 4.3-5 に示す。

表 4.3-2 係留力の計算方法¹⁾

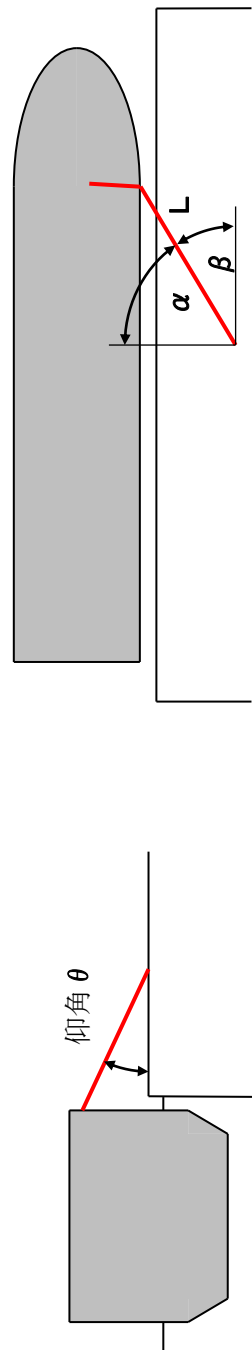
<p>【各索の係留力計算式】</p> $R_x = T \times ((\cos^2 \beta \times \cos \theta^2) / L) \times (L_c / (\cos \beta_c \times \cos \theta_c))$	
<p> R_x : 前後係留力 (tonf) (前方は添字 f, 後方は添字 a) T : 係留索 1 本に掛けることができる最大張力 (tonf) β : 係留索水平角 (物揚場平行線となす角度) (deg) θ : 係留索の仰角 (deg) L : 係留索の長さ (船外+船内) (m) β_c : 各グループ*で最も負荷の大きい係留索の係留索水平角 (物揚場平行線となす角度) (deg) θ_c : 各グループ*で最も負荷の大きい係留索の仰角 (deg) L_c : 各グループ*で最も負荷の大きい係留索の長さ (船外+船内) (m) 注記* : 係留索の機能別グループ (前方係留力または後方係留力) </p>	

参考文献

1) 日本タンカー協会 : 係留設備に関する指針 第 2 版, pp. 167, 2002.

表 4.3-3 係留力 (図 4.3-1) の計算結果

フェア リーダー	索種類	係船柱	係船索長さ[m]		係留角		索張力 T [tonf]	係留力 前後 [tonf]	Bitt Performance [tonf]		係船柱強度	
			船外		θ	β			Bitt Load	合計		
FL1	Line1	B1	36.9		5.1	-24.3	20.0	-6.91	7.31	15.96	25	
FL2	Line2	B1	34.2		5.5	-10.4	20.0	-8.60	8.65			
FL3	Line3	B3	10.5		18.1	-31.8	20.0	-16.16	20.00	20.00	25	
								-31.67				
FL4	Line4	B5	13.7		13.7	11.9	20.0	19.01	20.00	20.00	25	
								19.01				
FL5	Line5	B8	25.0		6.8	7.3	20.0	-19.70	20.00	20.00	25	
								-19.70				
FL6	Line6	B11	16.6		10.3	21.0	20.0	18.37	20.00	20.00	25	
FL7	Line7	B12	34.8		8.2	15.9	20.0	10.56	10.90	21.39	50	
FL8	Line8	B12	35.8		8.0	21.0	20.0	9.70	10.49			
								38.62				
								前後(+) 計				
								57.63				
								前後(-) 計				
								-51.37				



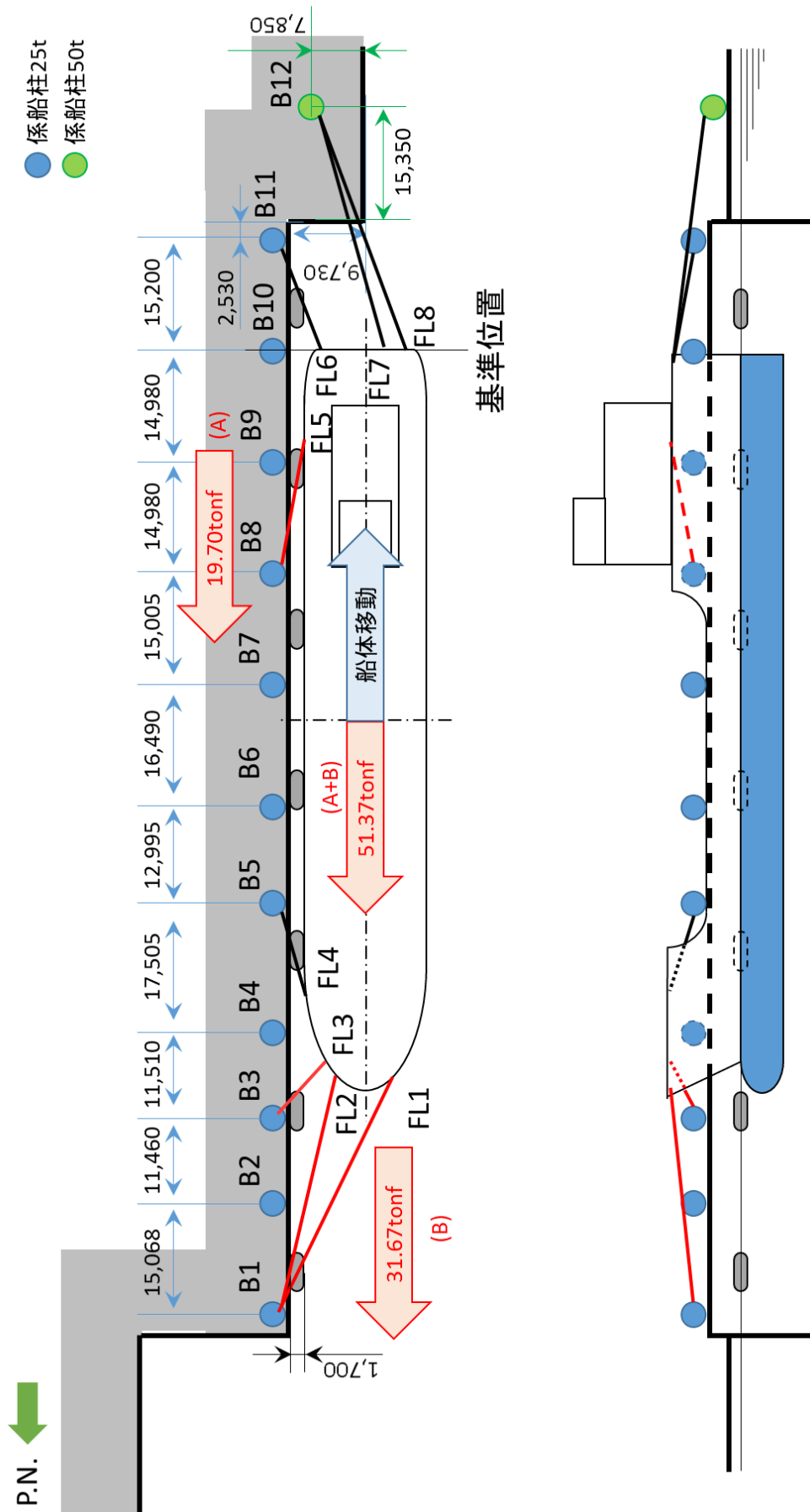


図 4.3-4 船尾方向への移動に対する船首方向係留力

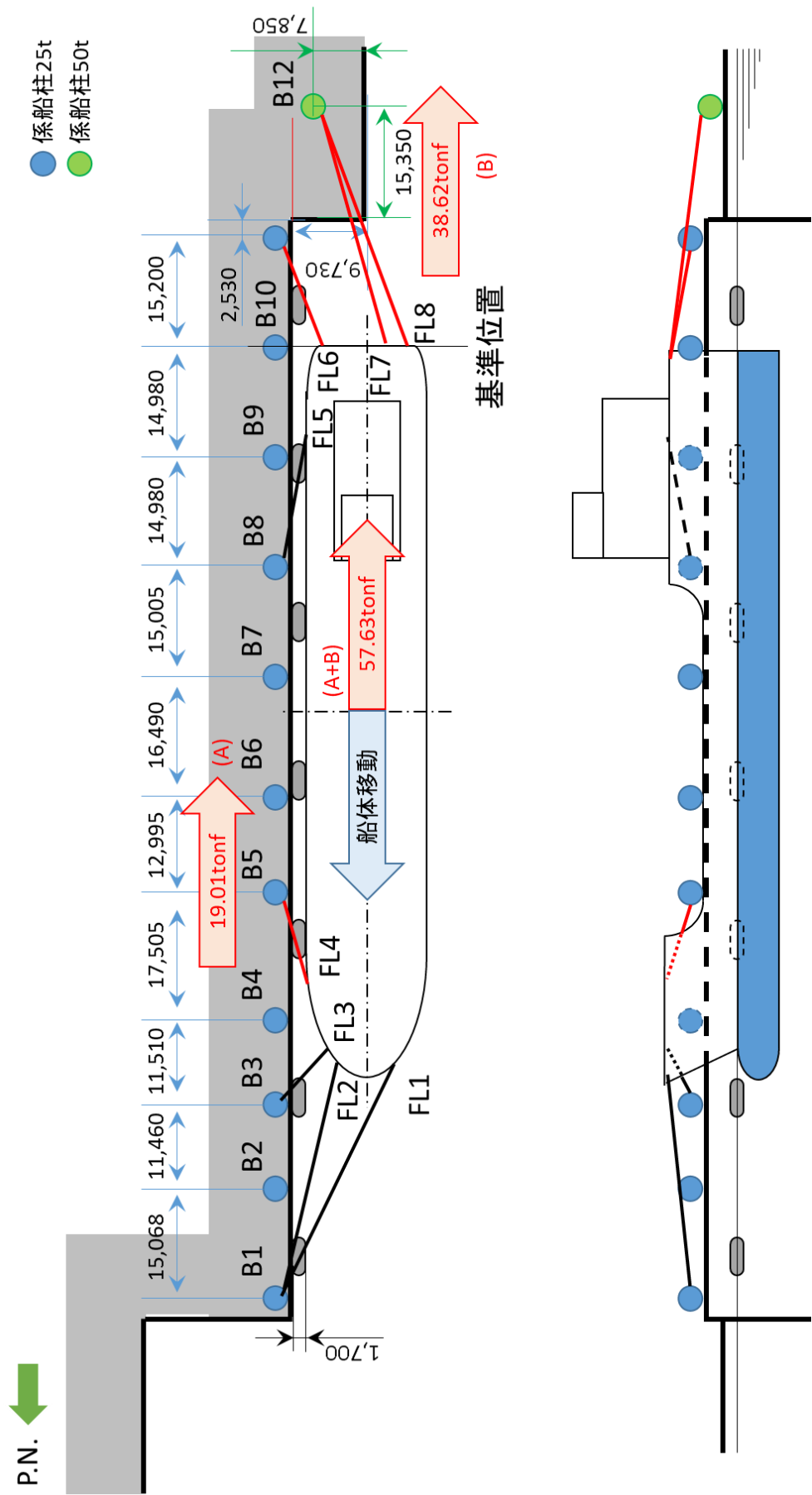


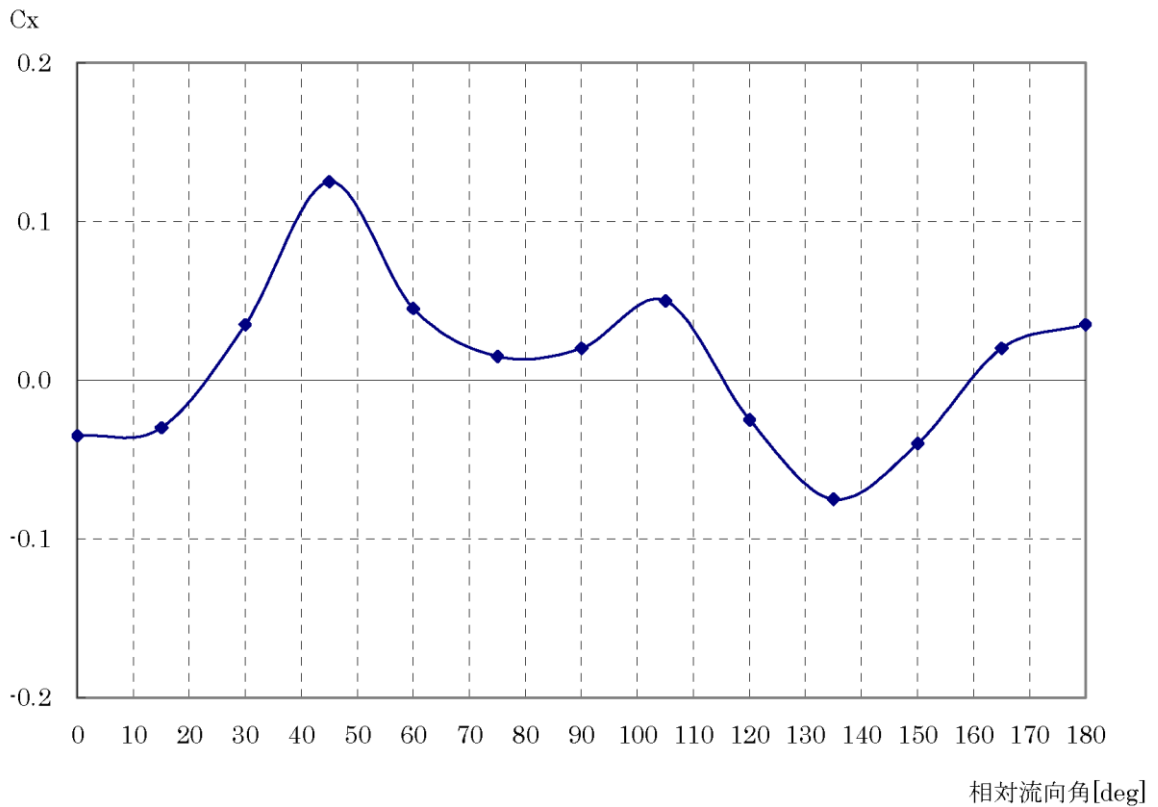
図 4.3-5 船首方向への移動に対する船尾方向係留力

d. 流圧力

流圧力の計算方法を表 4.3-4 に、係留力との比較結果を図 4.3-6 に示す。

表 4.3-4 流圧力の計算方法¹⁾

<p>【流圧力計算式】</p> $F_{Xc} = 1/2 \times C_{Xc} \times \rho_c \times V_c^2 \times L_{PP} \times d$	<p>F_{Xc} : 縦方向流圧力 (kgf) C_{Xc} : 縦方向流圧力係数 V_c : 流速 (m/s) L_{PP} : 垂線間長 (m) d : 喫水 (m) ρ_c : 水密度 (kgf・sec²/m⁴) (=104.7kgf・sec²/m⁴)</p>
--	---



参考文献

1) OCIMF : Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition, pp.178, pp.187, pp.202, 2008.

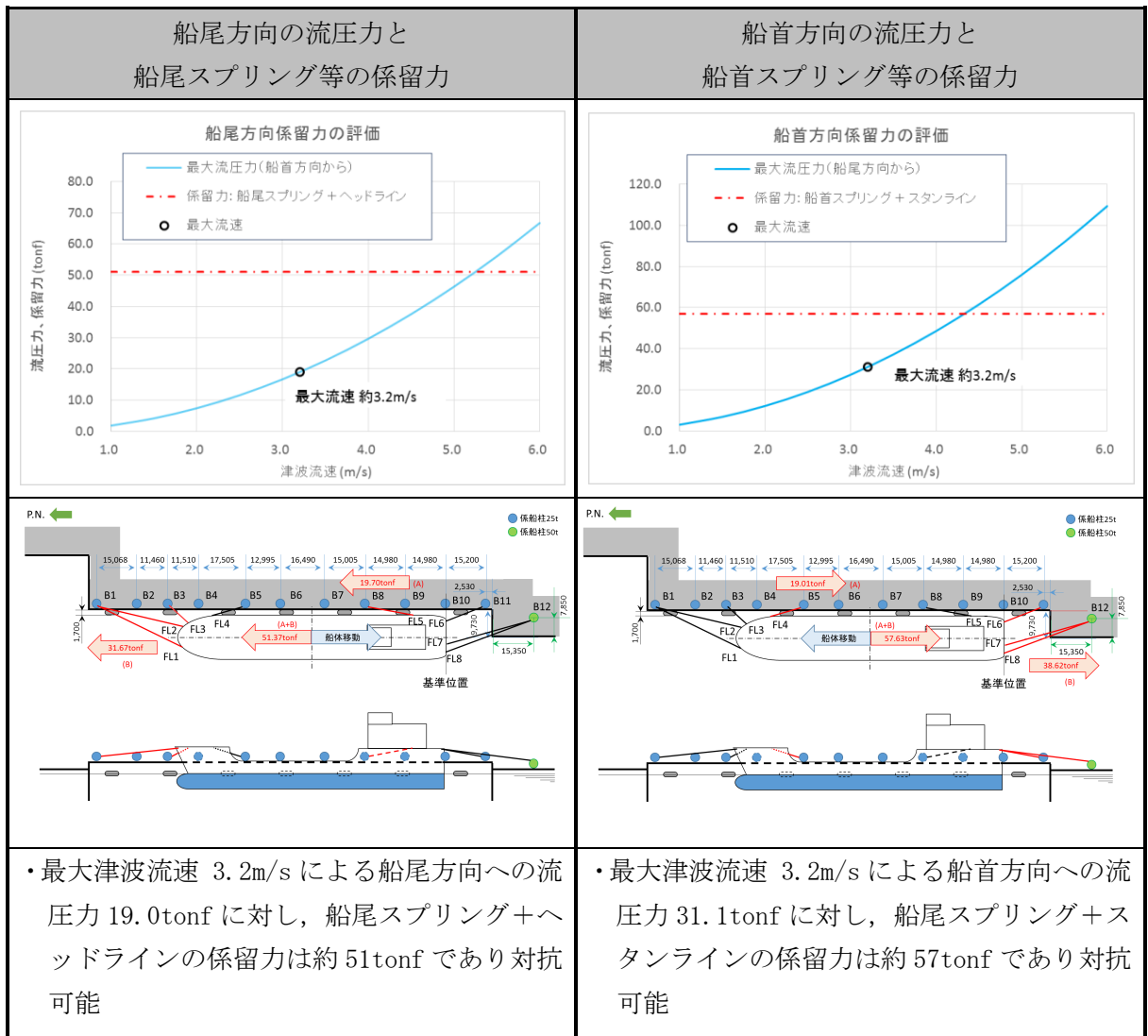


図 4.3-6 流圧力と係留力の比較

(3) 結論

津波(最大流速 3.2m/s: 図 4.3-3 参照)による流圧力に対し、係留力(約 51tonf, 約 57tonf)が上回ることを確認した。

したがって、津波に対し、輸送船が係留によって対応すると仮定した場合においても係留力により物揚場に留まり続けることができる。

燃料等輸送船の漂流物影響について

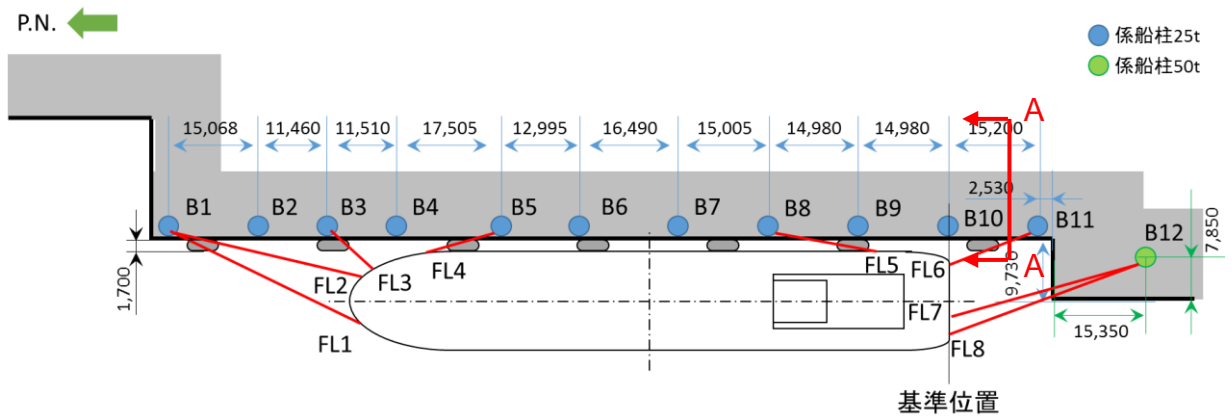
(1) 概要

「補足 4.2 (1) d. 通水性に与える影響の評価」に示しているように、燃料等輸送船は襲来までに時間的な余裕がある基準津波に対しては緊急退避が可能と考えられるが、時間的な余裕がない津波（津波警報等発令から 12 分程度で到達する基準津波 3）に対しては、津波発生時に「荷役」行程中であった場合、津波襲来時には離岸のための荷役作業（干渉回避）中となり緊急退避ができない可能性がある。そのため、「補足 4.3 燃料等輸送船の係留索の耐力について」で到達が早い津波に対しては係留により漂流物化しないことを確認している。

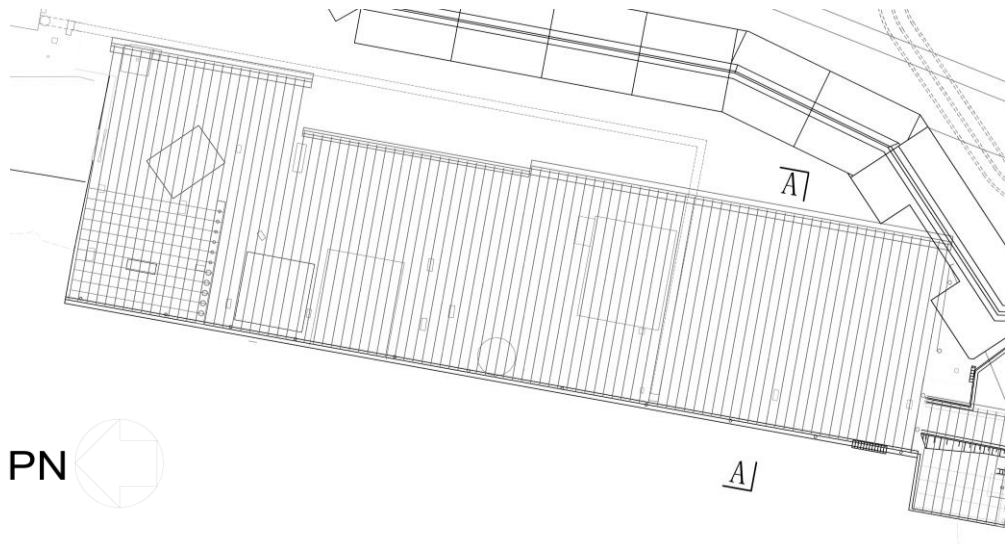
本参考資料では、係留時における基準地震動 S_s に対する燃料等輸送船の漂流物影響について検討を行った。

(2) 物揚場の設備構成

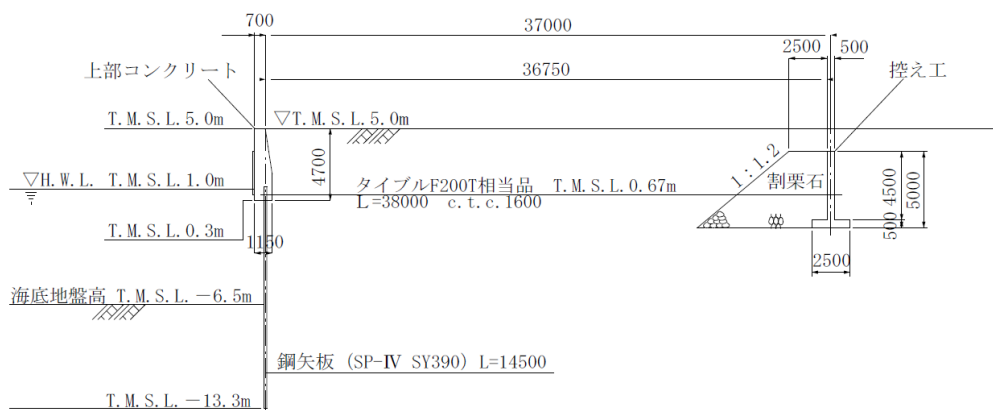
柏崎刈羽原子力発電所の物揚場における係船柱は 50t 係船柱と 25t 係船柱があり、コンクリート基礎又は鋼矢板式護岸の上部コンクリートに取り付けられている。図 4.3-参 1-1 に係船柱の配置と燃料等輸送船の係留イメージ図とそのコンクリート基礎を示す。



(1) 係船柱の配置と燃料等輸送船の係留イメージ

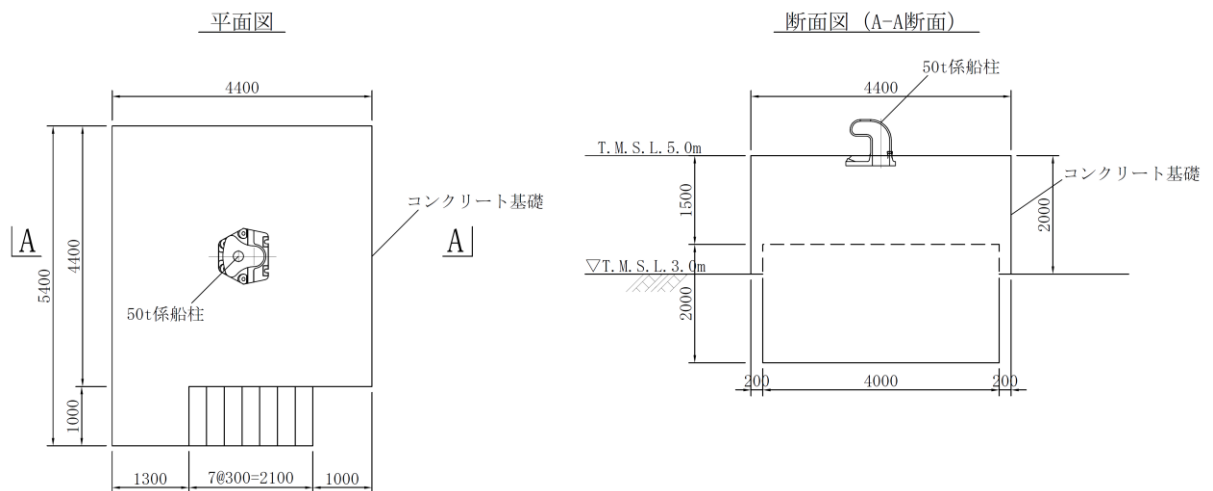


(2) 物揚場平面図



(3) 物揚場断面図 (A-A 断面)

図 4.3-参 1-1 係船柱とその基礎について



(4) 50t 係船柱コンクリート基礎図

図 4.3-参 1-1 係船柱とその基礎について

(3) 燃料等輸送船の漂流物影響

燃料等輸送船は、襲来までに時間的な余裕がある基準津波 1, 2 に対しては緊急退避が可能と整理しており、時間的な余裕がない津波（津波警報等発令から 12 分程度で到達する基準津波 3）に対しても、津波発生時に「荷役」行程中でない場合であれば、緊急退避が可能と整理している。

ここでは緊急退避ができない可能性があるとして整理している、津波発生時に「荷役」行程中であった場合の時間的な余裕がない津波（津波警報等発令から 12 分程度で到達する基準津波 3）について、燃料等輸送船の漂流物影響について検討を行う。検討に際しては係船柱の設置されている物揚場は、基準地震動 S_s が発生した場合、地震による周辺地盤の変状等が想定されるため、保守的に係船柱の係留機能が維持できなくなった場合についての燃料等輸送船の漂流物影響について検討を行う。

係船柱の係留機能が維持できなくなった場合に、燃料等輸送船が緊急退避するためには、以下の対応が必要となる。

- ① 航行可能状態にするための係船索の取り外し
- ② 係船索取り外し後の緊急退避

①については、係船索は船内からの切断が可能となっているため、係船柱からの取り外しができなかった場合でも、切断により対応が可能となっている。

②については、キャスクの荷役の際、物揚場は立入制限区域となっているため、乗組員は上陸できず、常に船内に待機している状態となっており、操舵に必要な人員が常に船内に確保されているため、対応が可能となっている。

①及び②の検討結果より、燃料等輸送船は万が一係船柱の係留機能が失われた場合を想定したとしても、上記対応により緊急退避が可能であり漂流物とならない。

なお、津波襲来直後すぐに緊急退避出来ない場合であっても、図 4.3-参 1-3 に示す物

揚場前面の海上の軌跡シミュレーションにおいて、6号及び7号機側に向かう流れにはならないことから、6号及び7号機の海水貯留堰に到達することはなく、①及び②を実施後緊急退避が可能である。（軌跡シミュレーションの評価条件及び、初期配置は表4.3-参1-1及び図4.3-参1-2）

表 4.3-参 1-1 軌跡シミュレーションの評価条件（燃料等輸送船）

項目		評価条件	備考
評価時間		地震発生から 240分間	—
基準津波		基準津波3	○緊急退避ができない可能性があるとして整理している、基準津波3について実施
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。

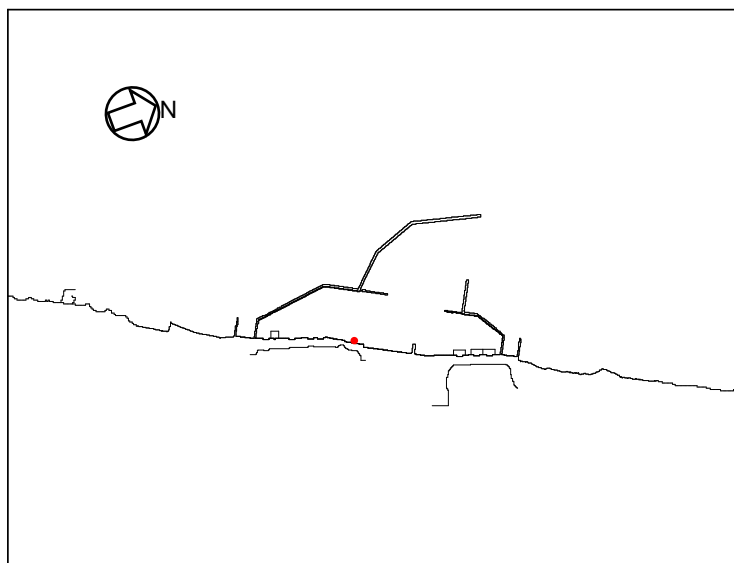


図 4.3-参 1-2 軌跡シミュレーションの初期配置（燃料等輸送船）

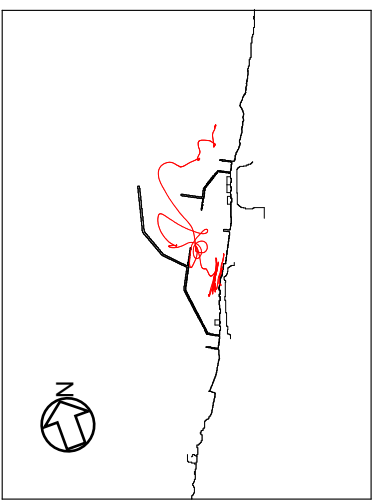
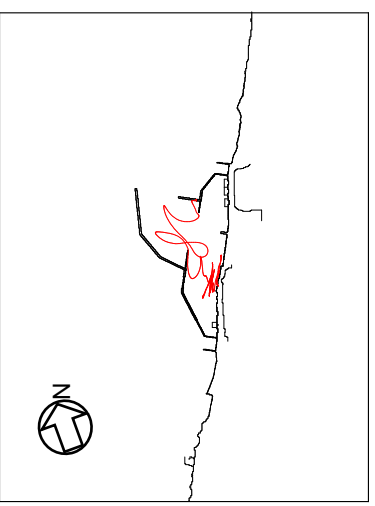
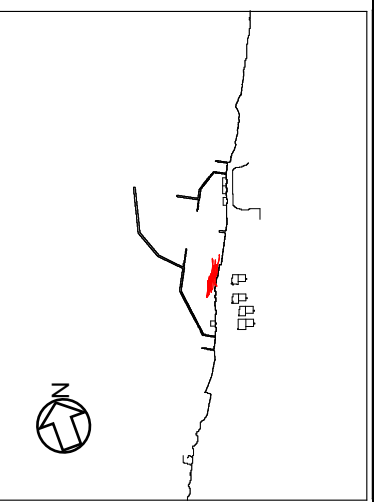
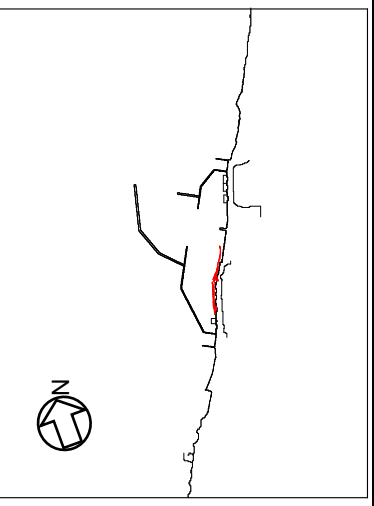
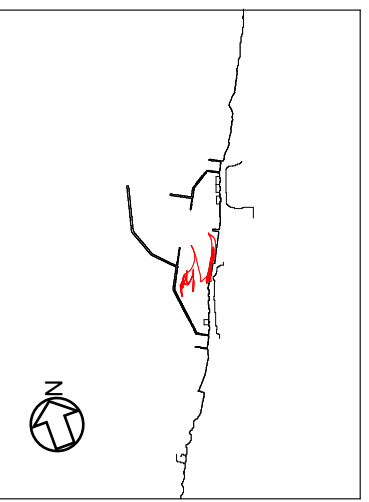
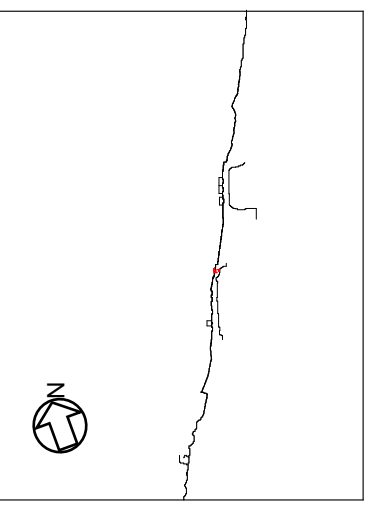
基準津波 3			
基本 ケース		1m 沈 降	
荒浜側 防潮堤 なし		2m 沈 降	
護岸部 2m 沈下		なし	
防波堤損傷			

図 4.3-1-3 基準津波 3 軌跡シミュレーションの結果 (燃料等輸送船)

(4) 物揚場を構成する部材の漂流物影響

物揚場の護岸形式は鋼矢板式護岸であり、鋼矢板、上部コンクリート、タイ材及び控え工により構成される。これらの部材で構成される物揚場は(3)に記載のように基準地震動 S_s に対して健全性が確保できず、損傷することが想定される。

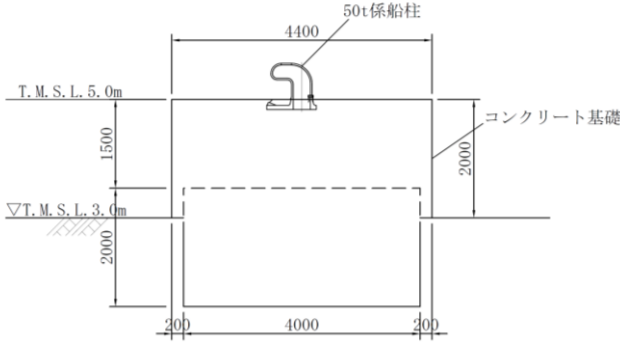
また、物揚場にはクレーンが設置されているため、これらの部材について漂流物影響について検討を行う。表 4.3-参 1-2, 3, 4 に物揚場における構成部材とその重量、主要材料、密度について記載する。これより、物揚場を構成する部材については、主要材料の密度により漂流物とならない。また、これらの部材については、滑動する可能性があるため、イスバッシュ式をもとに、部材が水の流れによって動かない最大流速（限界流速： U_d ）を算出する。算出した限界流速は、最低速度で 8.6m/s となり、図 4.3-参 1-4, 5 に示す、港湾内の流速の分布図からわかるように、物揚場位置では滑動する可能性があるが、大湊側港湾口付近ではこの限界流速（最大流速 4.0m/s 程度）を下回るため、滑動しない結果となる。上記結果と 7 号機取水口までの距離が約 700m あることを加味すると、損傷した場合を考えたとしても、6 号及び 7 号機の海水貯留堰に到達することはない。

【イスバッシュ式】

$$M_d = \frac{\pi \rho_r U_d^6}{48g^3 (y_d)^6 (S_r - 1)^3 (\cos\theta - \sin\theta)^3}$$

$$U_d = \sqrt[6]{\frac{48g^3 (y_d)^6 (S_r - 1)^3 (\cos\theta - \sin\theta)^3 M_d}{\pi \rho_r}} \quad (\text{上式を変形})$$

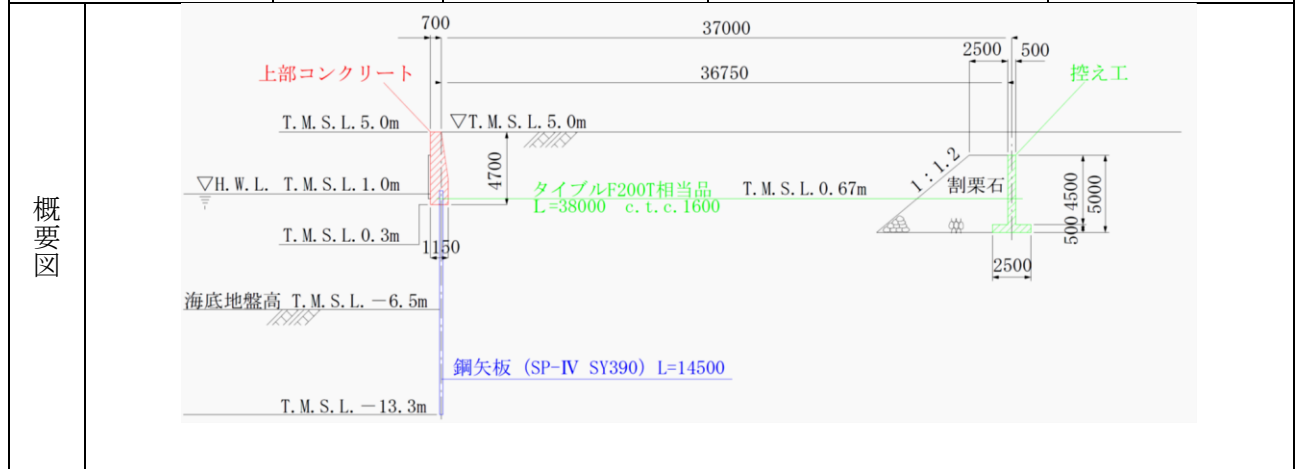
表 4.3-参 1-2 50t 係船柱基礎の重量

部材名	重量[t]	主要材料	密度[t/m ³]	限界流速[m/s]
コンクリート基礎	約 150	鉄筋コンクリート	【コンクリート】 2.3 【鋼材】 7.9	9.4*1
概要図				

注記*1：主要材料のコンクリートの密度を使用して算定。

表 4.3-参 1-3 25t 係船柱基礎（物揚場：鋼矢板式護岸）の部材の重量

部材名	重量*1	主要材料	密度[t/m ³]	限界流速[m/s]
上部コンクリート	約 120t	鉄筋コンクリート	【コンクリート】 2.3 【鋼材】 7.9	9.0*2
鋼矢板	約 30t	鋼矢板（SP-IV 型, SY390）	【鋼材】 7.9	13.6
タイ材及び控え工	約 90t	タイ材（ダブル F200T 相当品） 及び鉄筋コンクリ ート	【コンクリート】 2.3 【鋼材】 7.9	8.6*2



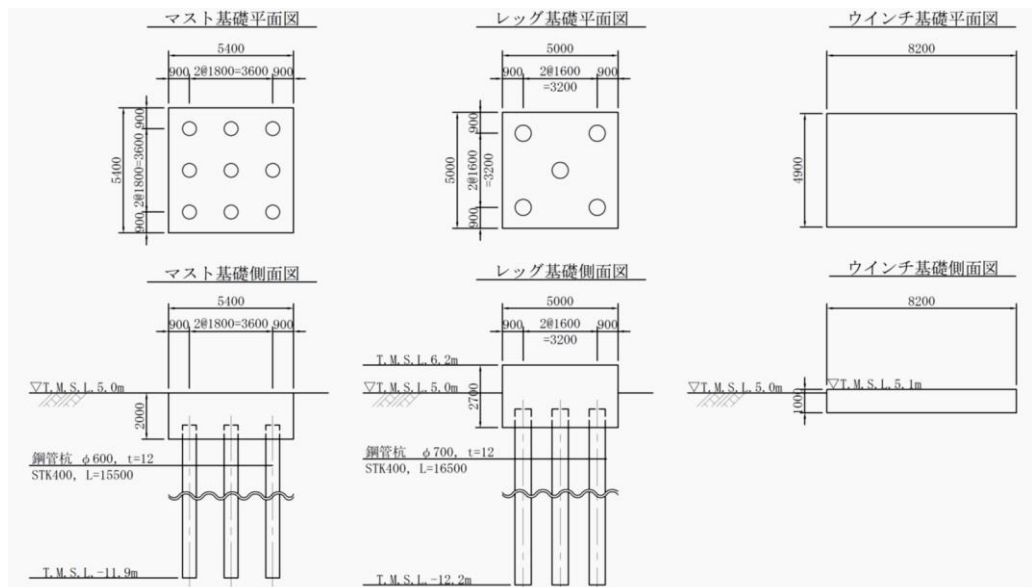
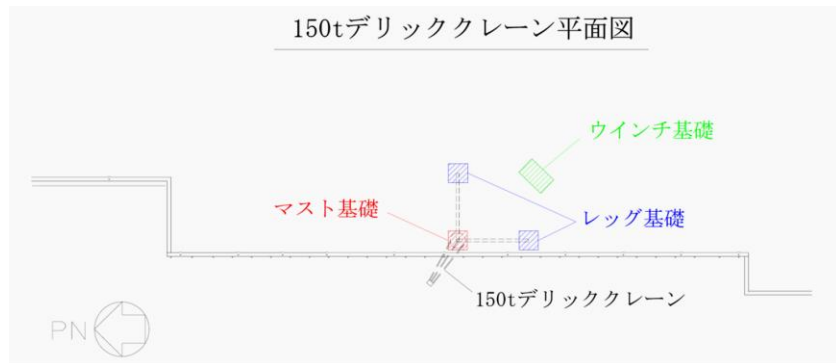
注記*1：上部コンクリート 1 スパン平均延長（10.7m）あたりの重量として算定。

注記*2：主要材料のコンクリートの密度を使用して算定。

表 4.3-参 1-4 150t デリックスクレーンの重量

名称	部材名	重量	主要材料	密度[t/m ³]	限界流速[m/s]
150t デリックスクレーン	マスト基礎	約 170t	鉄筋コンクリート 及び鋼管杭 (φ 600, t=12, STK400)	【コンクリート】 2.3 【鋼材】 7.9	9.6* ¹
	レッグ基礎	約 180t	鉄筋コンクリート 及び鋼管杭 (φ 700, t=12, STK400)	【コンクリート】 2.3 【鋼材】 7.9	9.7
	ウインチ基礎	約 108t	鉄筋コンクリート	【コンクリート】 2.3 【鋼材】 7.9	8.9* ¹

概要図



注記*1：主要材料のコンクリートの密度を使用して算定。

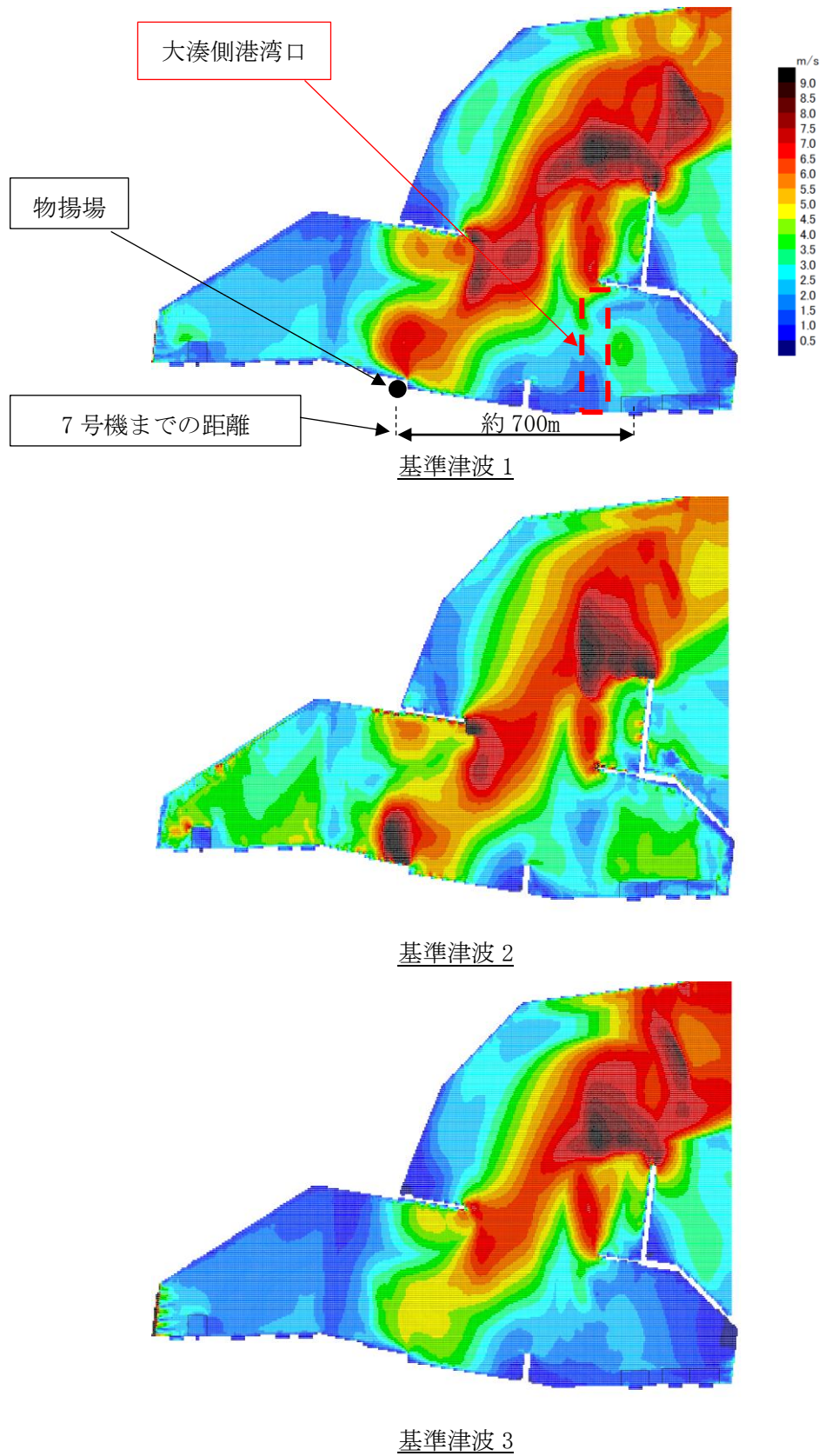
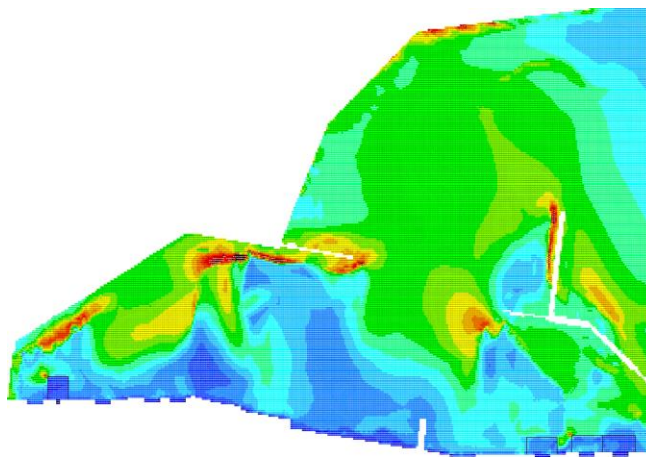
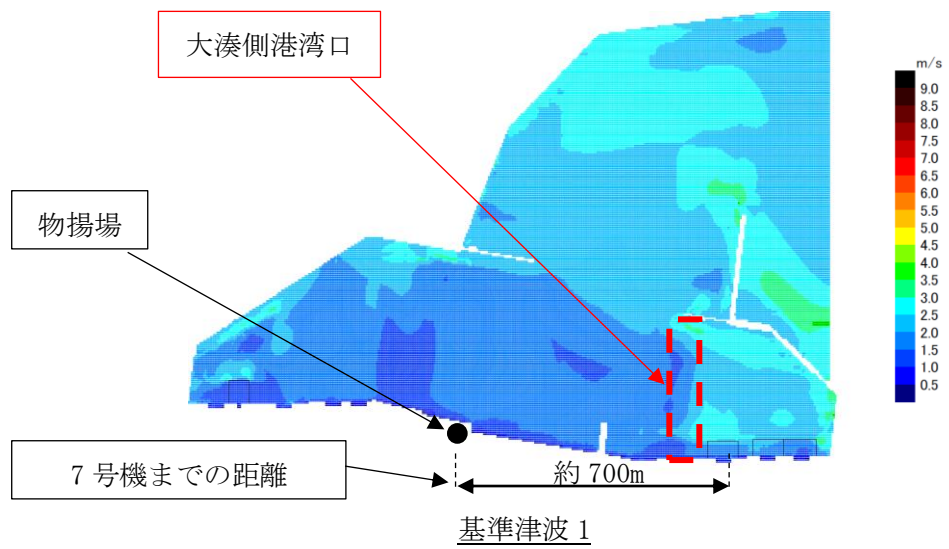
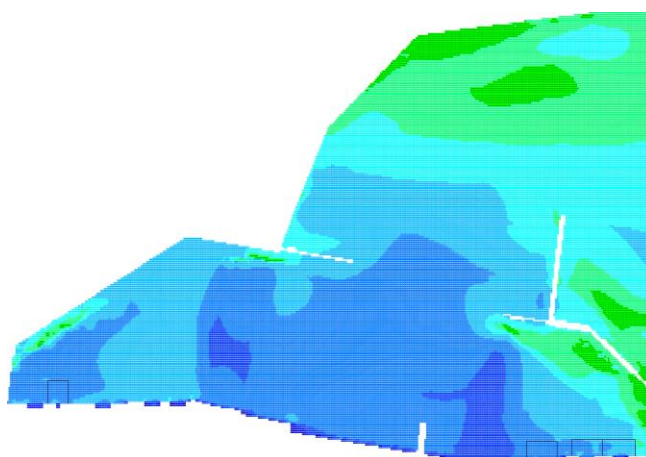


図 4.3-参 1-4 基準津波により生じる最大流速分布（防波堤あり）



基準津波 2



基準津波 3

図 4.3-参 1-5 基準津波により生じる最大流速分布 (防波堤なし)

4.4 燃料等輸送船の喫水と津波高さの関係について

4.4 燃料等輸送船の喫水と津波高さの関係について

(1) はじめに

燃料等輸送船は、津波警報等発令時、原則、緊急退避するが、津波の襲来までに時間的な余裕がなく緊急退避が困難な場合について、燃料等輸送船の喫水と津波高さとの関係に基づき、寄せ波に対して物揚場に乗り上げることのないこと、引き波に対して座礁及び転覆するおそれのないことを確認する。また、緊急退避が可能であった場合についても、退避中に引き波により、座礁及び転覆するおそれのないことを確認する。

(2) 確認条件

燃料等輸送船は、津波警報等発令時、原則、緊急退避する。輸送行程（「物揚場への接岸」～「荷役」～「物揚場からの離岸」）において、輸送船と輸送物の干渉がない「荷役」以外の行程においては、津波警報等の発令から数分程度で緊急退避が可能であるが、輸送船と輸送物が干渉し得る「荷役」行程では、緊急退避に15～30分程度を要する場合がある。

柏崎刈羽原子力発電所で襲来が想定される津波の到達時間と緊急退避に要する時間との関係を示すと図4.4-1のとおりとなる。

これを踏まえ、以下の3ケースを確認ケースとする。なお、図4.4-1より、40分程度の時間があれば緊急退避が十分可能であることから、確認の範囲は津波警報等の発令後、40分の期間とした。

ケース1：寄せ波による物揚場への乗り上げ評価

緊急退避できずに基準津波3の寄せ波第一波（*1）を受ける

注記*1：最高水位 T.M.S.L. +4.08m（発生時刻：地震後約15分）

ケース2：引き波による座礁及び転覆評価（緊急退避不能時）

緊急退避できずに基準津波3の引き波第一波（*2～3）を受ける

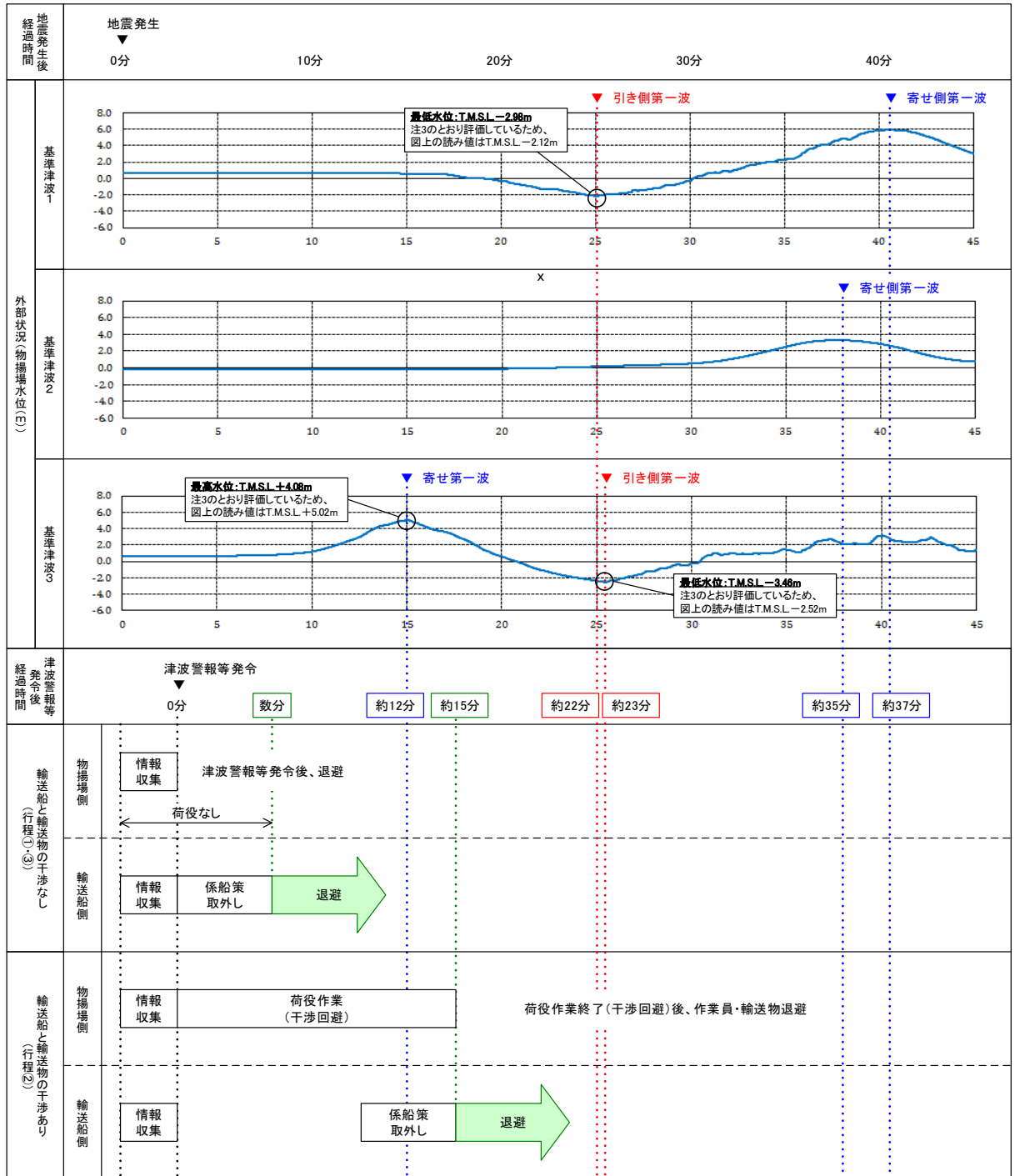
注記*2：最低水位 T.M.S.L. -3.46m（発生時刻：地震後約26分）

注記*3：基準津波1の引き波第一波は本ケースに包含される

ケース3：引き波による座礁及び転覆評価（退避中）

緊急退避中に基準津波3の引き波第一波（*4）を受ける

注記*4：ケース2と同条件



注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
 注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
 注3：本図の津波水位は、それぞれ以下の数値を予め含めて評価した結果を示している
 ・標準津波1：朔望平均満潮位（T.M.S.L.+0.49m）、潮位のバラつき（上昇側0.16m）、地殻変動量（0.21m）
 ・標準津波2：朔望平均干潮位（T.M.S.L.+0.03m）、潮位のバラつき（下降側0.15m）、地殻変動量（0.20m）
 ・標準津波3：朔望平均満潮位（T.M.S.L.+0.49m）、潮位のバラつき（上昇側0.16m）、地殻変動量（0.29m）
 注4：輸送船の退避とは、物揚場から離岸することを示す
 注5：行程①は「物揚場への接岸」、行程②は「荷役」、行程③は「物揚場からの離岸」を示す

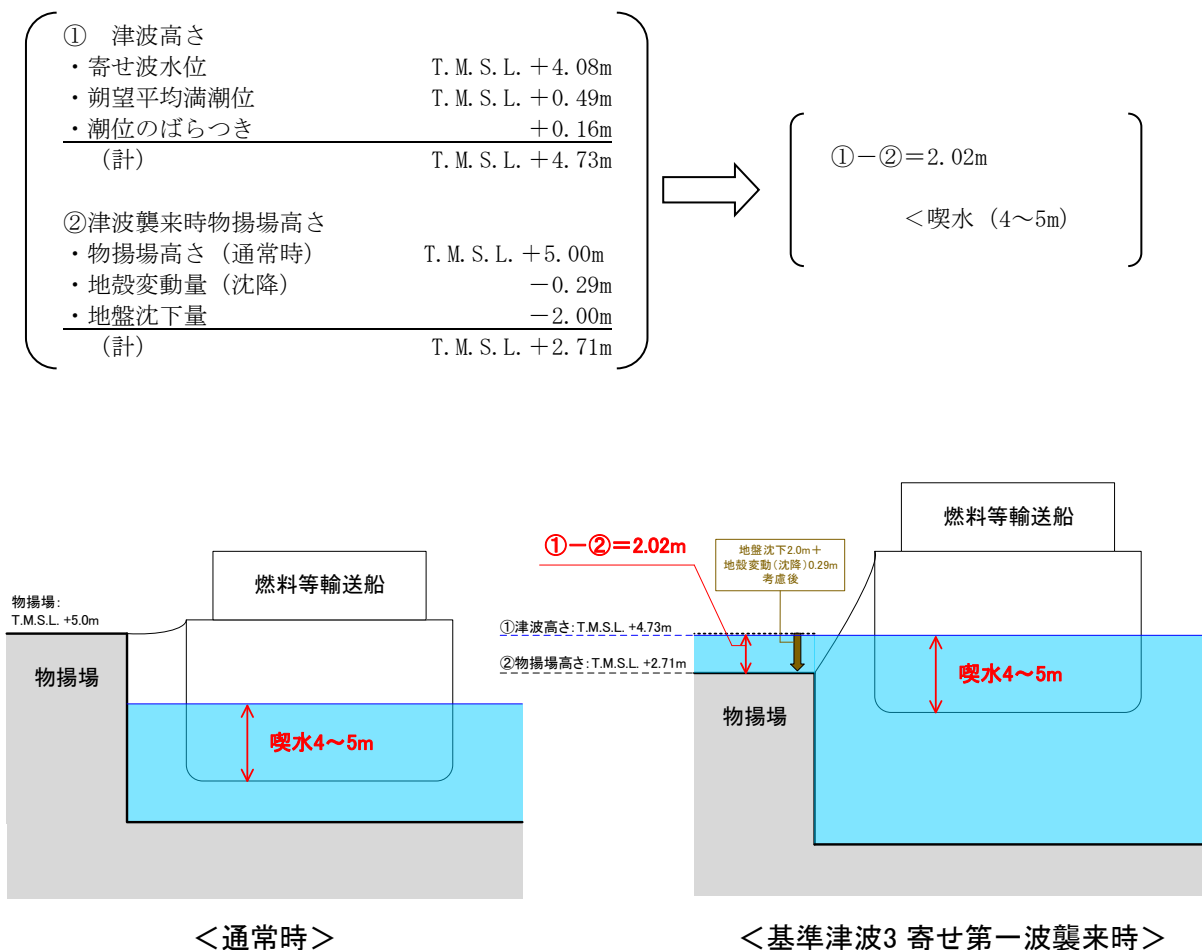
図 4.4-1 津波の到達と燃料等輸送船の緊急退避に要する時間

(3) 確認結果

a. ケース 1：寄せ波による物揚場への乗り上げ評価

寄せ波による津波高さと喫水の関係を図 4.4-2 に示す。

これより、燃料等輸送船は物揚場に乗り上げることはないことを確認した。



(備考)

- 津波の原因となる地震による地殻変動 (0.29m 沈降) を考慮した。
- 地盤変状について、基準地震動による地盤沈下を保守的に評価した値 (2.0m 沈下) を考慮しても、燃料等輸送船は物揚場に乗り上げることはない。
- なお、燃料等輸送船の喫水は、積荷、バラスト水等で変動するが、積荷なしでも過去の実績よりおよそ 4m 以上である。

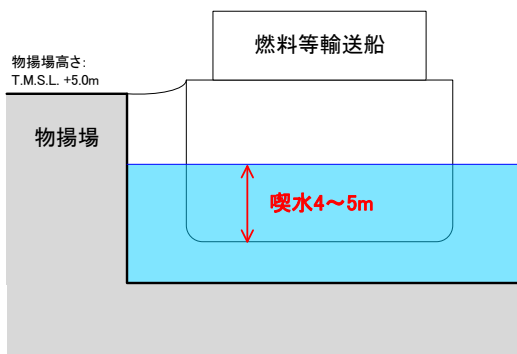
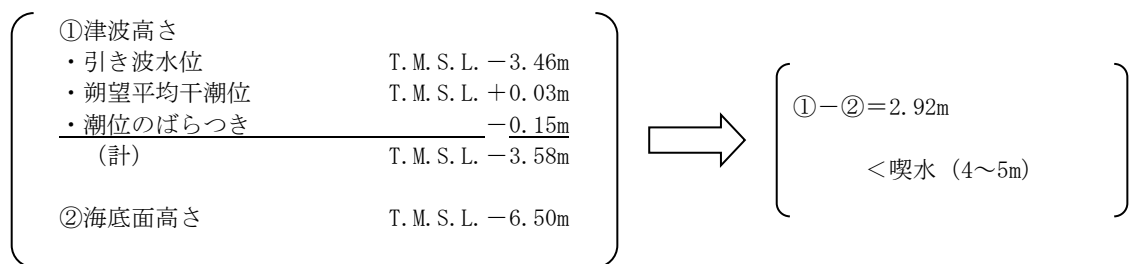
図 4.4-2 寄せ波による津波高さと喫水の関係

b. ケース 2：引き波による座礁及び転覆評価（緊急退避不能時）

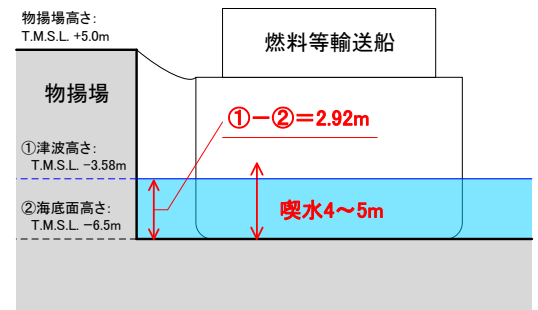
引き波による津波高さと喫水の関係を図 4.4-3 に示す。

これより、燃料等輸送船は引き波のピークの際には一時的に着底し得ることが示されるが、この場合も、以下の理由より座礁及び転覆することはない（漂流物とならない）。

- 一時的な着底があったとしても、輸送船は二重船殻構造等、十分な船体強度を有しており、水位回復後に退避が可能である。
- また、着底後の引き波による流圧力、あるいは水位回復時の寄せ波による流圧力に対する転覆の可能性については、輸送船の重量及び扁平な断面形状より、その可能性はない。なお、転覆の可能性に関わる具体的な評価を別紙に示す。



<通常時>



<基準津波3 引き第一波襲来時>

(備考)

○津波の原因となる地震による地殻変動及び地盤変状は、海底との距離が大きくなる方向に寄与するため、保守的に考慮していない。

図 4.4-3 引き波による津波高さと喫水の関係

c. ケース 3：引き波による座礁及び転覆評価（退避中）

柏崎刈羽原子力発電所の港湾内の海底面高さは、港湾内でほぼ一定であるため、本ケースにおける引き波高さと喫水との関係はケース 2 における図 4.4-3 と同等である。

したがって、図より燃料等輸送船は、退避中、引き波のピークの際には一時的に着底し得ることが示されるが、この場合も、前述と同様、輸送船の船体強度、重量及び形状より、離岸後の輸送船は、座礁及び転覆することなく、退避可能（漂流物とならない）と判断できる。

d. 結論

朔望平均満潮位・干潮位等の保守的な条件を考慮した場合でも、燃料等輸送船は、津波高さと喫水高さの関係から寄せ波により物揚場に乗り上げることはなく、また、緊急退避ができない場合及び退避中に引き波により一時的に着底した場合でも、座礁及び転覆しない（漂流物とならない）ことを確認した。

燃料等輸送船の着底時の転覆の可能性について

本別紙では、燃料等輸送船が物揚場における停泊時及び港湾内で緊急退避中に引き波により着底することを想定し、その際の転覆の可能性について評価する。

1. 評価条件

(1) 燃料等輸送船の仕様・形状

燃料等輸送船の仕様を表1に、外形図を図1及び図2に示す。転覆評価では、排水量について少ない方が保守的な評価となるため、空荷状態で評価を行った。

表1 燃料等輸送船の仕様

項目	仕様
排水量	満載状態：約7,000トン (空荷状態：4,000トン)
載貨重量トン	約3,000トン
喫水	約5m
全長	100.0m (垂線間長：94.4m)
型幅	16.5m

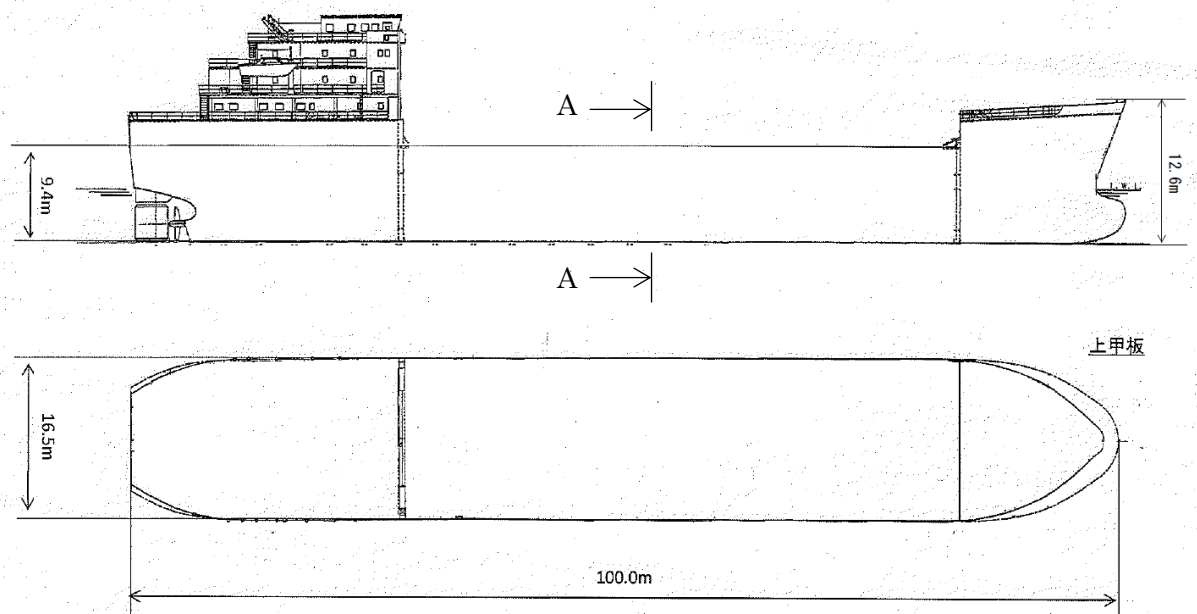


図1 燃料等輸送船外形図

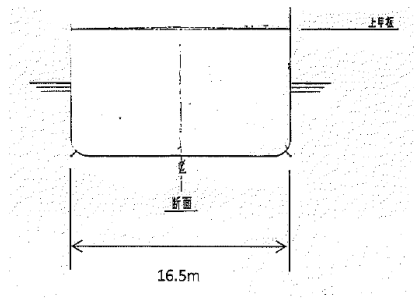


図2 燃料等輸送船外形図 (A-A 矢視)

(2) 転覆モード

小型の船舶の場合、丸型やV型の船底を有しているものがある。このような船舶の場合、図3に示すとおり引き波により着底した際には傾きが発生し、この状態で津波による流圧力を受けると転覆する可能性が考えられる。

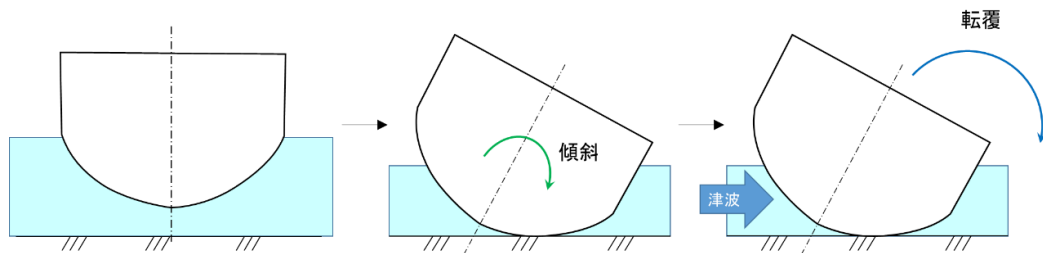


図3 丸型の船底を有する船舶の着底状態

一方、燃料等輸送船は一般のタンカーなどと同様に図2で示したとおり、断面形状が扁平であり船底が平底型である。このため、引き波により着底した場合にも傾くことなく安定していると考えられるが、ここでは保守的に、図4に示すように燃料等輸送船が津波を受けた際に船底の端部が海底に引っ掛かり、船底端部周りに回転する状況を想定し、転覆可能性の評価を行うものとする。

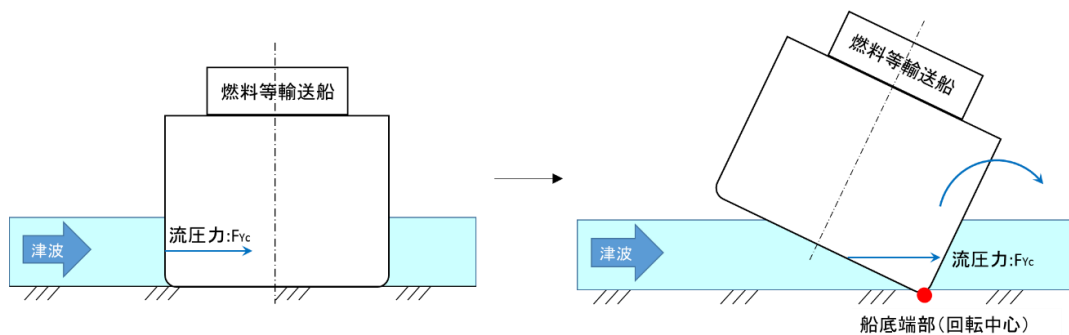


図4 想定転覆モード

2. 転覆評価

図4の転覆モードにおいて燃料等輸送船に働く力とモーメントを図5に示す。

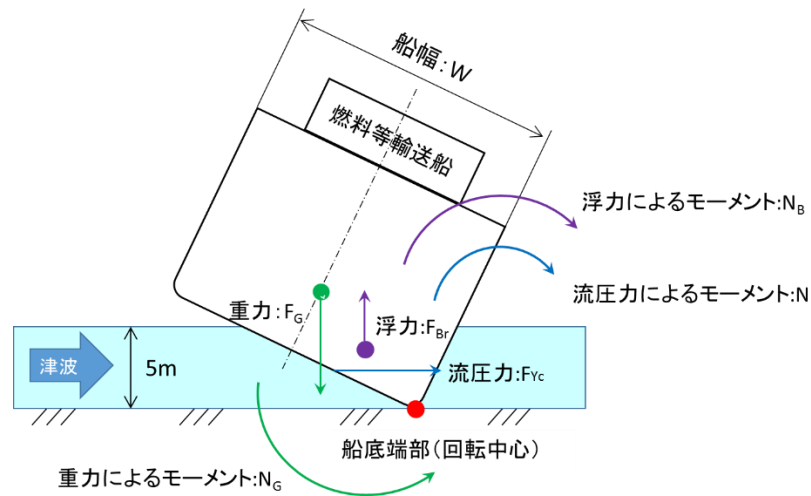


図5 燃料等輸送船に働く力とモーメント

津波を受けると流圧力 F_{Yc} によるモーメント N が発生し、船底端部を中心に燃料等輸送船を回転させる。また、浮力 F_{Br} によるモーメント N_B も流圧力によるモーメント N と同じ方向に発生する。一方、重力 F_G によるモーメント N_G がこれらのモーメントと逆方向に発生し燃料等輸送船の傾きを戻す。この際、流圧力及び浮力によるモーメントにより傾きが増大し、重心位置が回転中心の鉛直線上を超える場合には転覆する。

重心位置が回転中心の鉛直線上にあるときの傾きは約 48° であるため、ここでは傾きを 24° と仮定し、流圧力によるモーメント N と浮力によるモーメント N_B の和と重力によるモーメント N_G とのモーメントの釣り合いから転覆しないことを確認する。

重力によるモーメント N_G は次式のとおりとなる。

$$\begin{aligned} N_G &= F_G \times X(\text{GR}) \\ &= 4000 \times 4.5 \\ &= 18000 (\text{tonf} \cdot \text{m}) \end{aligned}$$

N_G : 重力によるモーメント (tonf・m)

F_G : 燃料等輸送船 (空荷状態) の重量 (tonf) (=4000)

$X(\text{GR})$: 重心と回転中心の水平方向距離 (m) (≈ 4.5)

次に流圧力によるモーメント N は次式にて計算できる。

$$N = F_{Yc} \times W \div 2$$

$$= F_{Yc} \times d \div 2$$

N : 流圧力によるモーメント (tonf・m)

F_{Yc} : 流圧力 (tonf)

W : 水位 (m)

d : 喫水 (m) (=5)

ここで、流圧力は受圧面積が最大のときに最も大きくなり、かつ、流圧力によるモーメントは流圧力の作用点と回転中心との距離が最大のときに最も大きくなるため、本評価における水位は喫水と同等とした。

また、横方向の流圧力 F_{Yc} を表 2 に示す方法で計算する。

表 2 横方向流圧力の計算方法¹⁾

<p>【流圧力計算式】</p> $F_{Yc} = 1/2 \times C_{Yc} \times \rho_c \times V_c^2 \times L_{PP} \times d$	<p>F_{Yc} : 横方向流圧力 (kgf)</p> <p>C_{Yc} : 横方向流圧力係数</p> <p>V_c : 流速 (m/s)</p> <p>L_{PP} : 垂線間長 (m) (=94.4)</p> <p>d : 喫水 (m) (=5)</p> <p>ρ_c : 水密度 (kgf・sec²/m⁴) (=104.7kgf・sec²/m⁴)</p>
---	--

このとき、流速は図 6-1 に示す早く襲来する津波の最大流速 3.2m/s を適用し、横方向流圧力係数を図 7 より 10 と仮定する。

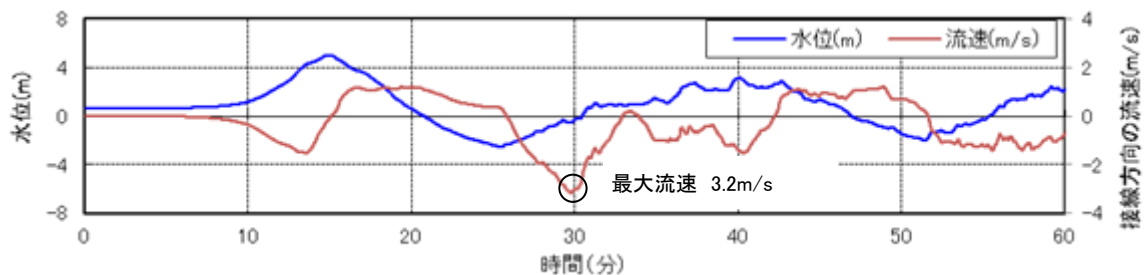


図 6-1 基準津波 3 の水位・流速 (物揚場前面)

なお、地震等により防波堤が損傷した場合でも、流速は図 6-2 に示すとおり防波堤健全時

(図 6-1) よりも小さいため、流速条件は防波堤健全時における流速に含まれる。

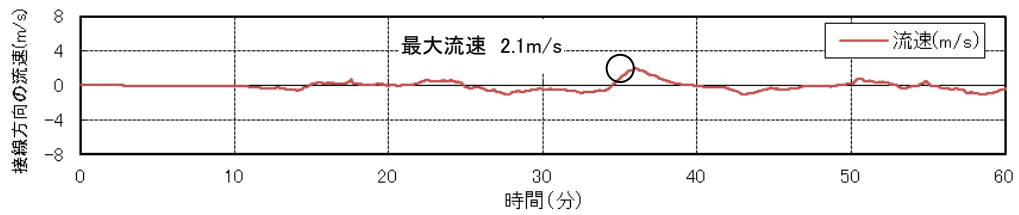


図 6-2 防波堤損傷時における基準津波 3 の流速 (物揚場前面)

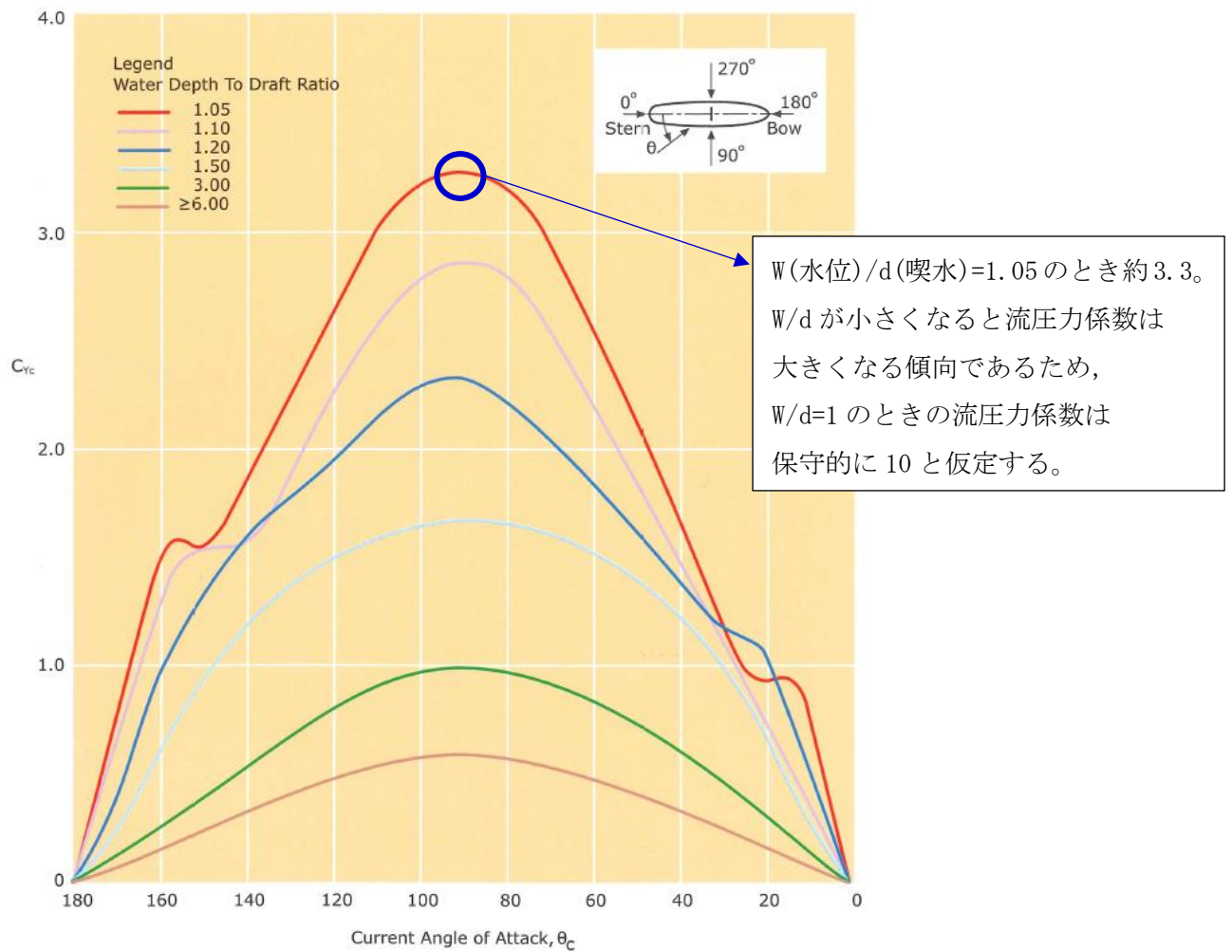


図 7 横方向の流圧力係数¹⁾

参考文献

- 1) OCIMF : Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition, pp.178, pp.190, pp.202, 2008.

上記の表 2 により F_{Yc} は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} F_{Yc} &= 1 \div 2 \times 10 \times 104.7 \times 3.2^2 \times 94.4 \times 5 \\ &\simeq 2531000 \text{ (kgf)} \\ &= 2531 \text{ (tonf)} \end{aligned}$$

従って、流圧力によるモーメントは以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} N &= F_{Yc} \times d \div 2 \\ &= 2531 \times 5 \div 2 \\ &\simeq 6328 \text{ (tonf} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

最後に浮力によるモーメント N_B は次式にて評価する。

$$\begin{aligned} N_B &= F_{Br} \times X(BR) \\ &= 1700 \times 3.0 \\ &\simeq 5100 \text{ (tonf} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

N_B : 浮力によるモーメント (tonf·m)
 F_{Br} : 傾いた際の燃料等輸送船の浮力 (tonf) ($\simeq 1700$)
 $X(BR)$: 浮心と回転中心の水平方向距離 (m) ($\simeq 3.0$)

以上の結果をまとめると、以下に示すとおり重力によるモーメント N_G は流圧力によるモーメントと浮力によるモーメントの和より大きくなるため、燃料等輸送船は転覆することはない。

$$\begin{aligned} N + N_B &= 6328 + 5100 \\ &= 11428 \text{ (tonf} \cdot \text{m)} < N_G = 18000 \text{ (tonf} \cdot \text{m)} \end{aligned}$$

3. 結論

燃料等輸送船は着底後に津波による流圧力を受けてもその形状から通常の状態であれば転覆することはない、また、保守的に船底の一部が固定されるような状態を想定した場合であっても転覆しないことを確認した。

4.5 浚渫船の係留可能な限界流速について

4.5 浚渫船の係留可能な限界流速について

(1) 概要

浚渫船は、浚渫作業中に基準津波が発生した場合は緊急退避が困難であることから、作業現場において錨泊することになる。本資料では、錨泊により係留可能な限界流速を評価する。

(2) 評価

a. 浚渫船及び係船設備の仕様と錨泊状態

浚渫船及び係船設備の仕様を表 4.5-1 に、浚渫船の外形図及びストックアンカーの外形図を図 4.5-1 に、錨泊状態を図 4.5-2 に示す。

表 4.5-1 浚渫船及び係船設備の仕様表

項目		仕様
浚渫船	総トン数	約 500 トン
	喫水	約 1.8m
	全長	43.0m
	型幅	17.0m
アンカー	型式	ストックアンカー
	重量	1.980tonf
アンカーライン	種類	ワイヤー
	数量	4本

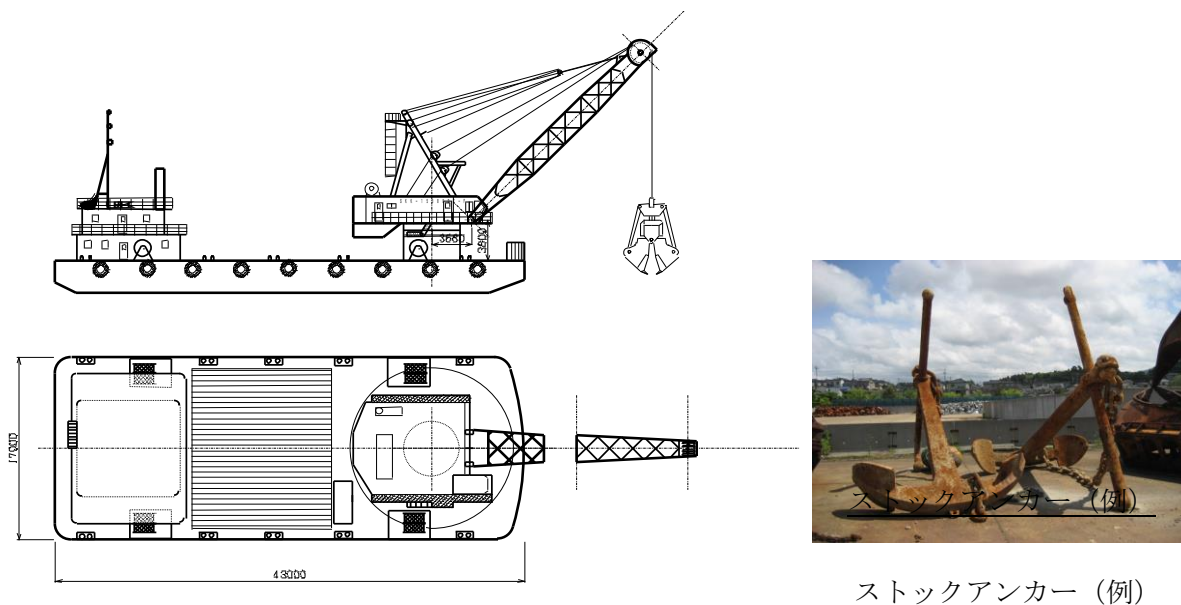


図 4.5-1 浚渫船の外形図

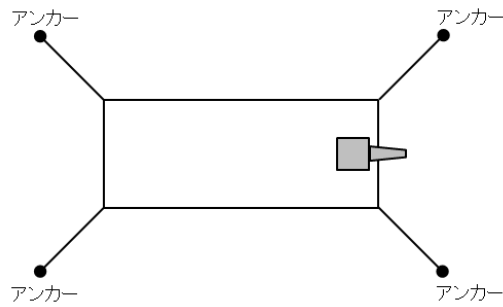


図 4.5-2 錨泊状態

b. アンカーの把駐力

アンカー1基あたりの把駐力は以下のとおり計算できる¹⁾。なお、アンカーラインはワイヤーを使用するため、その係駐力は期待しない。

$$\begin{aligned}
 P &= \omega a \times \lambda a \\
 &= 2.475 \times 0.87 \times 5.1 \\
 &\approx 10.9
 \end{aligned}$$

P : アンカー1基あたりの把駐力 (tonf)

ωa : アンカーの海水中重量 (tonf)

(= 2.475 (空気中重量) \times 0.87¹⁾)

λa : アンカーの把駐係数 (= 5.1²⁾)

なお、アンカーの空気中重量は、以下の式³⁾にてストックアンカーの重量をストックレスアンカーの重量に換算した値を適用した。

$$\begin{aligned}
 \omega l &= \omega s \div 0.8 \\
 &= 1.980 \div 0.8 \\
 &= 2.475
 \end{aligned}$$

ωl : ストックレスアンカー相当重量 (tonf)

ωs : ストックアンカー重量 (tonf) (= 1.980)

ここで、図 4.5-2 のとおり 4 基のアンカーを使用し錨泊しているが、速い津波を受け走錨すると図 4.5-3 の状態となる。

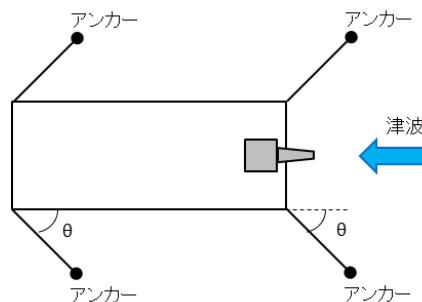


図 4.5-3 走錨状態

走錨時にはアンカーラインの角度 θ は 0° に近づくが、ここでは保守的に 45° としてアンカー4基分の把駐力を計算すると以下のとおりとなる¹⁾。

$$\begin{aligned} P2 &= P \times \cos \theta \times 4 \\ &= 10.9 \times \cos 45^\circ \times 4 \\ &\approx 30.8 \end{aligned}$$

$P2$: 4基のアンカーによる把駐力 (tonf)
 θ : アンカーラインの角度 (degree) (=45)

参考文献

- 1) 本田啓之輔：操船通論，pp. 110, pp. 115, pp. 125, 成山堂書店，2011.
- 2) 佐藤治夫：錨の把駐性能に関する一考察，[海自然と文化] 東海大学紀要海洋学部，第3巻第3号，pp. 35, 2005.
- 3) 日本海事協会：鋼船規則C編 船体構造及び船体艤装，pp. 178, pp. 183, 2016.

(3) 係留可能な限界流速

算出した把駐力における係留可能な限界流速を算出する。津波の流速と流圧力は表 4.5-2 に示す計算式にて関係付けられるため、この式から限界流速を算出できる。また、一般的に縦方向よりも横方向の流圧力が大きくなるので、横方向の流圧力に対する限界流速を求める。

表 4.5-2 流圧力の計算方法¹⁾

<p>【流圧力計算式】</p> $F_{Yc} = 1/2 \times C_{Yc} \times \rho_c \times V_c^2 \times L_{PP} \times d$	<p>F_{Yc} : 横方向流圧力 (kgf) C_{Yc} : 横方向流圧力係数 (=1 ; 図 4.5-4 より) V_c : 流速 (m/s) L_{PP} : 垂線間長 (m) (=43) d : 喫水 (m) (=1.8) ρ_c : 水密度 (kgf・sec²/m⁴) (=104.7kgf・sec²/m⁴)</p>
--	--

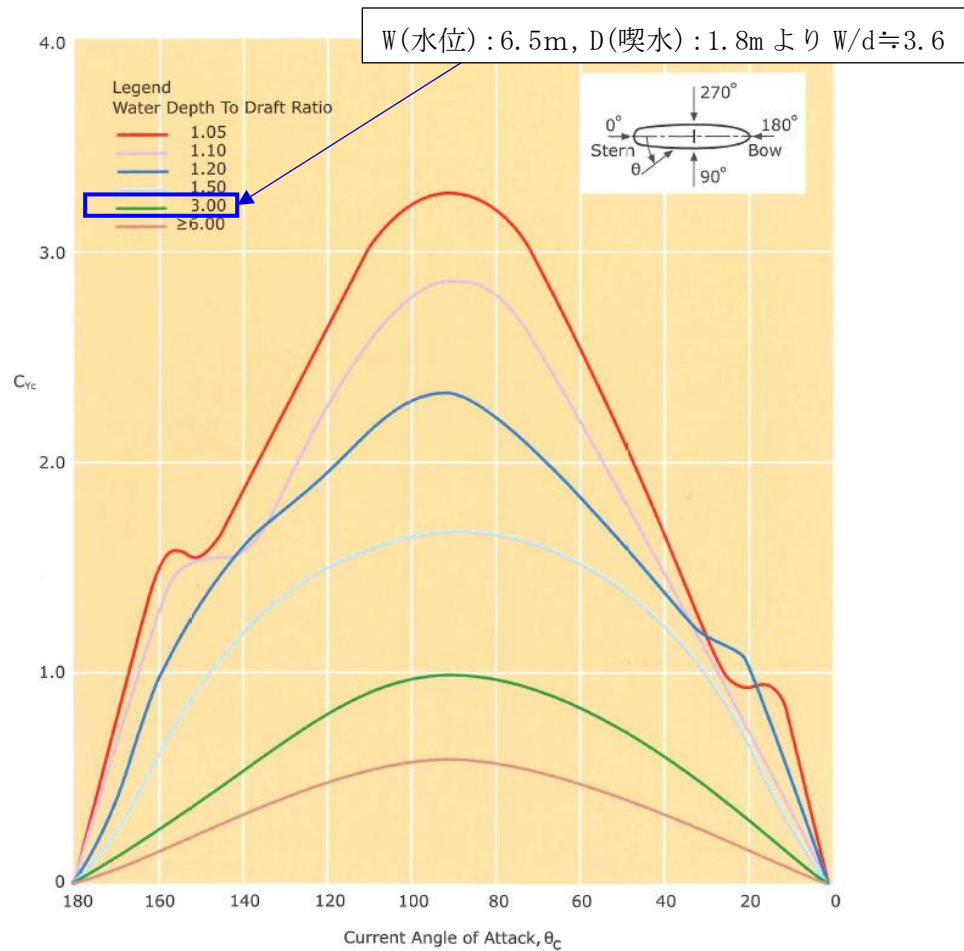


図 4.5-4 横方向流圧力係数 [C_{Yc}]¹⁾

なお、浚渫船の船首・船尾形状は、タンカーの船首のような流線型ではなく、舷側のような平坦な形状であるため、タンカーの横方向流圧力係数を適用する。

ここで、 $F_{Yc}=P$ とすると限界流速 V_L (m/s) は以下のとおり計算できる。

$$P = \frac{1}{2} \times C_{Yc} \times \rho_c \times V_L^2 \times L_{pp} \times d$$

$$V_L = \sqrt{2 \times P \div (C_{Yc} \times \rho_c \times L_{pp} \times d)}$$

$$= \sqrt{2 \times 30.8 \div (1 \times 104.7 \div 1000 \times 43 \times 1.8)}$$

$$\approx 2.7$$

従って、浚渫船の錨泊時に係留可能な限界流速は 2.7m/s 程度である。

参考文献

- 1) OCIMF : Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition, pp.178, pp.190, pp.202, 2008.

4.6 漂流物の衝突荷重算定式の適用性について

4.6 漂流物の衝突荷重算定式の適用性について

(1) 衝突荷重算定式記載の規格・基準類

耐津波設計に係る工認審査ガイドにおいて挙げられている参考規格・基準類のうち、漂流物の衝突荷重又は衝突エネルギーについて記載されているものは、「道路橋示方書・同解説 I 共通編（平成 14 年 3 月）」¹⁾と「津波漂流物対策施設設計ガイドライン平成 26 年 3 月」²⁾である。後者は、鋼管杭等の支柱の変形及びワイヤーロープの伸びにより衝突エネルギーを吸収する考え方であり、弾性設計には適さないと考えられるため、前者を漂流物の衝突荷重として採用することが適切と考えられる。

① 道路橋示方書・同解説 I 共通編（(社)日本道路協会，平成 14 年 3 月）¹⁾

○ 適用範囲・考え方：

橋（橋脚）に自動車，流木あるいは船舶等が衝突する場合の衝突荷重を算定する式である。

○ 算定式：

$$\text{衝突力 } P = 0.1 \times W \times v$$

ここに，P：衝突力(kN)

W：流送物の重量(kN)

v：表面流速(m/s)

② 津波漂流物対策施設設計ガイドライン（沿岸技術研究センター，寒地港湾技術研究センター，平成 26 年）²⁾

○ 適用範囲・考え方：

「漁港・漁場の施設の設計の手引き（全国漁港漁場協会 2003 年版）」の接岸エネルギーの算定方法に準じて設定されたものであり，漁船の他，車両・流木・コンテナにも適用されるが，支柱及び漂流物補足スクリーンの変形でエネルギーを吸収させることにより漂流物の進入を防ぐための津波漂流物対策施設の設計に適用される式である。

○ 算定式：

$$\text{船舶の衝突エネルギー } E = E_0 = W \times V^2 / (2g)$$

$$\text{(船の回転により衝突エネルギーが消費される (1/4 点衝突) 場合 } E = E' = W \times V^2 / (4g))$$

$$\text{ここに, } W = W_0 + W' = W_0 + (\pi/4) \times D^2 L \gamma_w$$

W : 仮想重量 (kN)

W₀ : 排水トン数 (kN)

W' : 付加重量 (kN)

D : 喫水 (m)

L : 横付けの場合は船の長さ, 縦付けの場合は船の幅 (m)

γ_w : 海水の単位体積重量 (kN/m³)

g : 重力加速度

(2) 漂流物の衝突荷重算定式の適用事例

安藤ら (2006)³⁾によれば, 南海地震津波による被害を想定して高知港を対象に, 平面二次元津波数値シミュレーション結果に基づいた被害予測手法の検討を行い, 特に漂流物の衝突による構造物の被害, 道路交通網等アクセス手段の途絶について検討を行い, 港湾全体における脆弱性評価手法を検討している。この中で荷役設備・海岸施設の漂流物による被害を検討するに当たって漂流物の衝突力を算定しており, 船舶に対しては道路橋示方書を採用している。

表-1 各施設の許容漂流速度

		選 定 式	対象施設		
			クレーン	水門	倉庫
車両		陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究 ⁴⁾	4.8 m/s	1.5 m/s	1.5 m/s
コンテナ	20ft	陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究 ⁴⁾	4.9 m/s	1.5 m/s	1.5 m/s
	40ft	陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究 ⁴⁾	4.7 m/s	1.5 m/s	1.5 m/s
船舶	小型	衝突荷重 (道路橋示方書)	5.0m/s超	5.0m/s超	5.0m/s超
	大型	衝突荷重 (道路橋示方書)	5.0m/s超	1.8 m/s	1.8 m/s
木材		陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究 ⁴⁾	5.0m/s超	1.7 m/s	1.7 m/s

(3) 漂流物による衝突力評価式に関する既往の研究論文

道路橋示方書等の基準類以外でも、漂流物による衝突力評価に対する研究が複数存在している。以下に、これらの研究概要を例示するが、木材やコンテナ等を対象とした事例が多く、船舶の衝突を考慮した事例は少ない。

○ 適用範囲・考え方：

「平成 23 年度建築基準整備促進事業 40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」（東京大学生産技術研究所（2011）⁴⁾）では、「漂流物の衝突による建築物への影響の評価については、研究途上の段階であり、また、被害調査においても、被害をもたらした漂流物の詳細な情報を得ることは難しいため、既往の知見の検証は困難であった」としている。また、津波による漂流物が建築物に衝突する際の衝突力に関する研究を以下に示しているが、「対象としている漂流物は(a), (b), (d), (e)」が流木, (c), (d), (e)がコンテナである（(e)は任意の漂流物を対象としているものの実質流木とコンテナしか算定できない。）」としている。

○ 算定式(a)：

(a) 松富の評価式⁵⁾

津波による円柱形上の流木が縦向きに衝突する場合の衝突力を次式のとおり提案している。

$$F_m = 1.6 C_{MA} [v_{A0} / (gD)^{0.5}]^{1.2} (\sigma_f / \gamma L)^{0.4} \times \gamma D^2 L$$

ここに、 C_{MA} ：見かけの質量係数

（段波・サージでは 1.7，定常流では 1.9）

v_{A0} ：流木の衝突速度， D ：流木の直径

L ：流木の長さ

σ_f ：流木の降伏応力

γ ：流木の単位体積重量

g ：重力加速度

○ 算定式(b) :

(b) 池野らの評価式⁶⁾

円柱以外にも角柱，球の形状をした木材による衝突力を次式のとおり提案している。

$$F_H = S \times C_{MA} \times (V_H / (g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25}))^{2.5} \times g M$$

ここに， F_H ：漂流物の衝突力(kN)

S ：係数(5.0)

C_{MA} ：見かけの質量数

(円柱横向き：2.0 (2次元)，1.5 (3次元)，

角柱横向き：2.0～4.0 (2次元)，1.5 (3次元)，

円柱縦向き：2.0程度，球：0.8程度)

V_H ：漂流物移動速度(m/s)

D ：漂流物の代表高さ(m)

L ：漂流物の代表長さ(m)

M ：漂流物の質量(t)

g ：重力加速度

○ 算定式(c) :

(c) 水谷らの評価式⁷⁾

津波により漂流するコンテナの衝突力を次式のとおり提案している。

$$F_m = 2 \rho_w \eta_m B_c V_x^2 + W V_x / (g dt)$$

ここに， F_m ：漂流衝突力(kN)

dt ：衝突時間(s)

η_m ：最大遡上水位(m)

ρ_w ：水の密度(t/m³)

B_c ：コンテナ幅(m)

V_x ：コンテナの漂流速度(m/s)

W ：コンテナ重量(kN)

g ：重力加速度

○ 算定式(d) :

(d) 有川らの評価式⁸⁾

コンクリート構造物に鋼構造物（コンテナ等）が漂流衝突する際の衝突力を次式のとおり提案している。

$$F = \gamma_p X^{2/5} (5/4 \times m)^{3/5} v^{6/5}$$

$$X = 4 \times \sqrt{a} \div (3\pi \times (k_1 + k_2)), \quad k = (1 - \nu^2) / (\pi E),$$

$$m = (m_1 \times m_2) \div (m_1 + m_2)$$

ここに、a : 衝突面半径の 1/2

(コンテナ衝突面の縦横長さの平均の 1/4)

E : ヤング率 (コンクリート板)

ν : ポアソン比

m : 質量(t)

v : 衝突速度(m/s)

γ_p : 塑性によるエネルギー減衰効果(0.25)

m や k の添え字は衝突体と被衝突体を示す。

(4) まとめ

既往の知見によると、さまざまな衝突力算定式が提案されているが、いずれも柏崎刈羽原子力発電所で想定する作業船の衝突力とは状況が異なる。既往の事例等を参照しても、船舶の衝突荷重の算出を道路橋示方書に示される算定式を採用している。

以上から、柏崎刈羽原子力発電所で想定する作業船の衝突荷重は道路橋示方書による方法で算定することとする。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，平成 14 年 3 月。
- 2) 沿岸技術研究センター，寒地港湾技術研究センター：津波漂流物対策施設設計ガイドライン，平成 26 年 3 月。
- 3) 安藤誠，小田勝也，岡本修，熊谷兼太郎：地震津波に対する脆弱性評価手法の検討，沿岸技術研究センター論文集，No. 6，pp. 5-8，2006。
- 4) 東京大学生産技術研究所：平成 23 年度建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その 2，平成 23 年 10 月。
- 5) 松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，No. 621，II-47，pp. 111-127，1999. 5. 6) 池野正明，田中寛好：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 721-725，2003. 7) 水谷法美，高木祐介，白石和睦，宮島正悟，富田孝史：エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 741-745，2005. 8) 有川太郎，大坪大輔，中野史丈，下迫健一郎，石川信隆：遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 846-850，2007。

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。

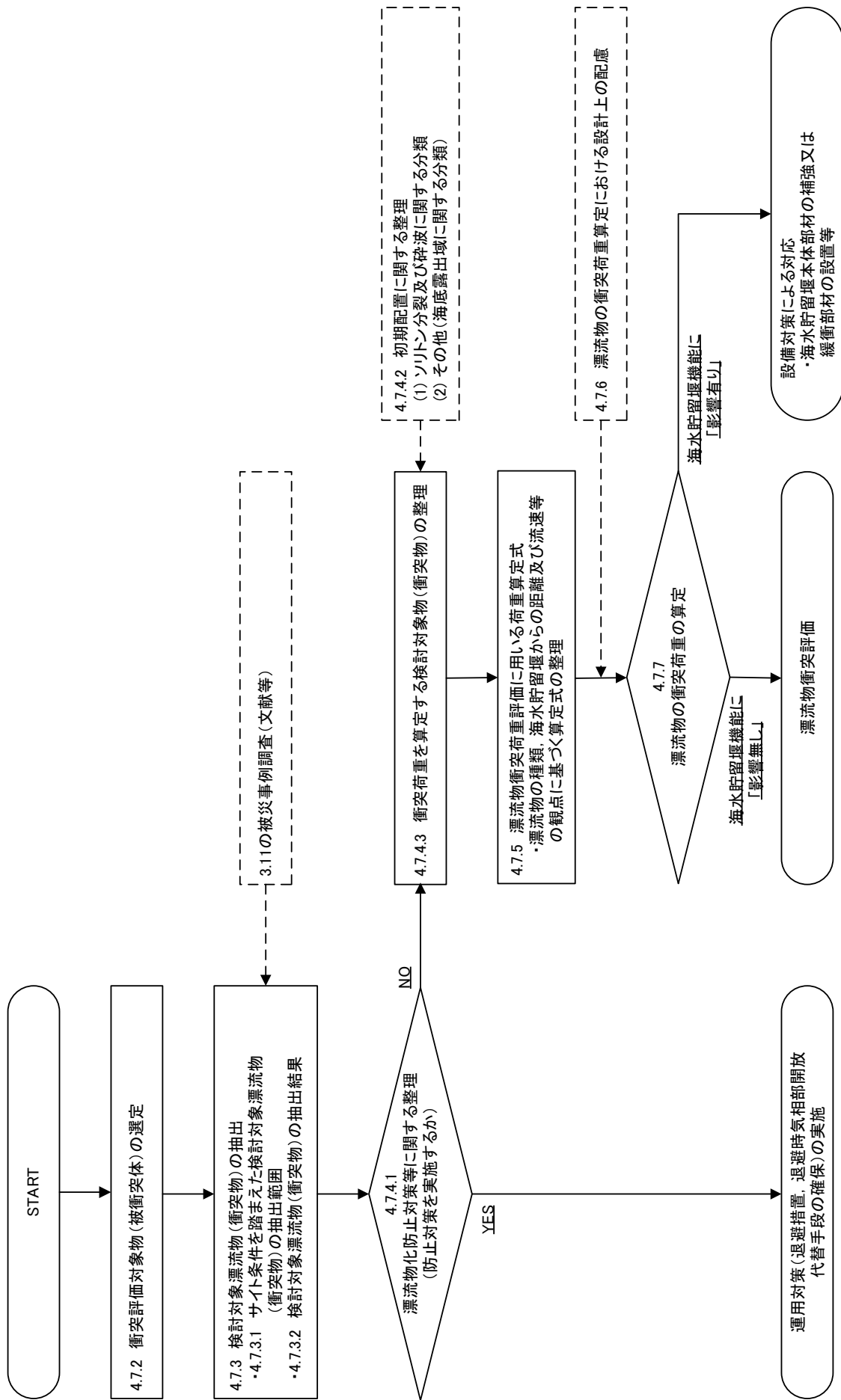


図 4.7-1 漂流物衝突を考慮した津波防護施設の設計に係る検討フロー

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。

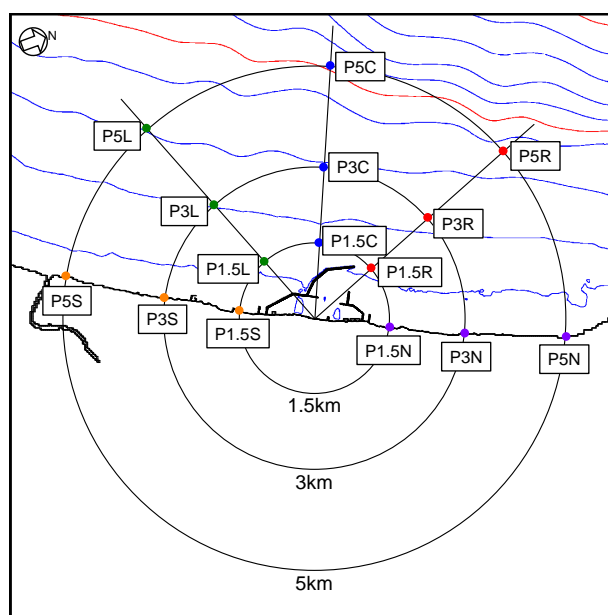


図 4.7-2 発電所周辺海域における軌跡シミュレーションの初期配置（図 4.2-30 を再掲）

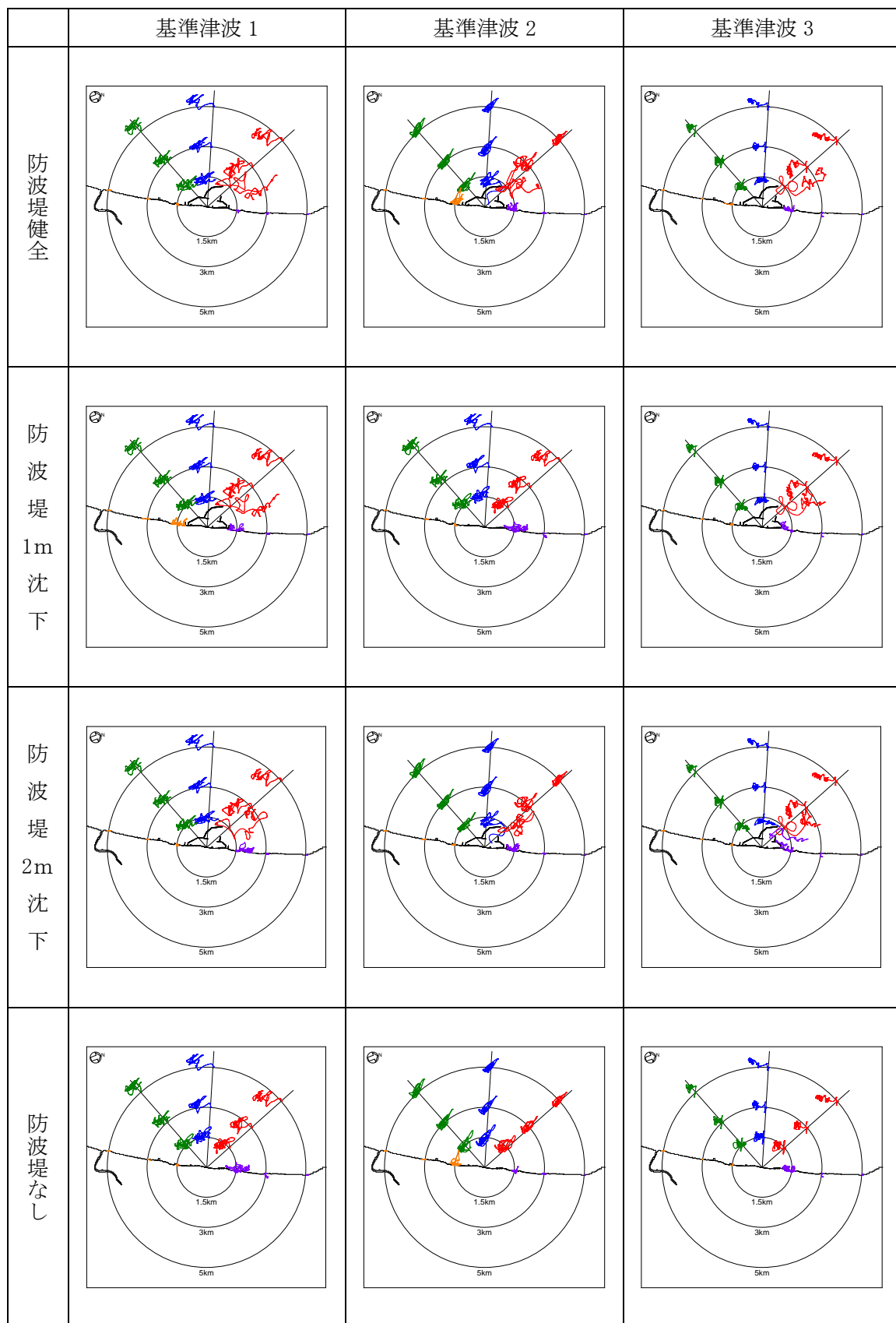


図 4.7-3 発電所周辺海域における軌跡シミュレーションの結果 (図 4.2-32 を再掲)

(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)

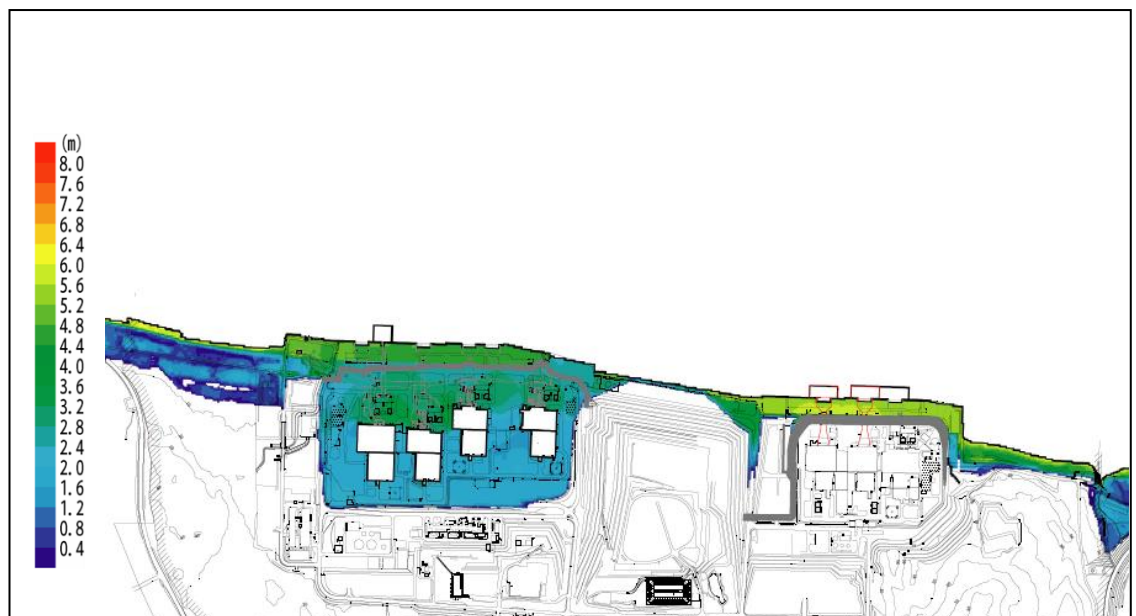


図 4.7-5 基準津波による発電所全体遡上域の最大浸水深分布
(「V-1-1-3-2-3 入力津波の設定」図 3-3(2)を抜粋)

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「4.2 漂流物による影響確認について」において取水性への影響評価を行う中で、海水貯留堰に到達し得ると整理されたもの（【結果Ⅲ】として整理されるもの）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。

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	港湾内作業船舶	30t 未満
	陸域	・大湊側護岸部	資機材	ユニットハウス 角材、足場板、ホース、カラーコーン	1t 未満 数 kg
			一般構築物	監視カメラ、拡声器、標識等	数 kg
			車両	人員・資機材運搬車両、工事用車両	約 0.7t～約 45t
			資機材	ユニットハウス 角材、足場板、ホース、カラーコーン	1t 未満 数 kg
		・荒浜側護岸部 (物揚場を含む)	一般構築物	監視カメラ、拡声器、標識等	数 kg
			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	約 140kg
			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 発電所構外海岸線に退避した作業船	15t 未満 15t 未満
	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 発電所構外海岸線に退避した作業船

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。

4.7.4.1 漂流物化防止対策等に関する整理

一部の漂流物については、津波時の退避運用等を定めることにより漂流物化の防止を図ることができる。以下に、検討対象物（衝突物）ごとに漂流物化防止のための対策等を示す。

(1) 港湾内作業船舶

港湾内の作業船舶に関しては、図 4.7-6 に示すとおり、大湊側港湾内、発電所全体港湾内又は港湾外（発電所付近）のいずれかで作業を実施する。

このうち、大湊側港湾内で作業を実施する船舶については、カーテンウォール等が障害物となり、船舶を用いての退避が困難となり、船舶を大湊側港湾内に残置して人員のみ北側防波堤又は大湊側護岸部の陸域に避難する可能性がある。その場合、当該船舶が 7 号機取水口に到達する可能性があるとともに、海水貯留堰に衝突する可能性があるため、海水貯留堰への衝突影響軽減の観点から、大湊側港湾内については、基本的に剛性が比較的小さく海水貯留堰に有意な影響を与える漂流物とならないゴムボート以外は入港禁止とする運用とする。

一方で、発電所全体港湾内及び港湾外（発電所付近）で作業する船舶については、図 4.7-7 に示す通り、到達が早い津波（基準津波 3 の場合であって、津波警報発令後から約 12 分後に到達）に対しても沖合 1.5km あるいは構外の海岸まで退避可能であるため、上記船舶は津波時に退避する運用とする。

ここで、発電所全体港湾内で作業する船舶の退避にあたっては、図 4.7-6 に示す通り防波堤間の離隔距離は港口で約 500m、構内でも約 400m であり、船舶の大きさ（表 4.7-2 参照）と比較すると十分に広いことから、複数船舶が同時に退避することは可能である。なお、船舶退避の実効性を高める観点から、燃料等の輸送作業と港湾内浚渫作業は同時期に実施しない運用とする。

以上の運用を整理すると表 4.7-3 のとおりとなるが、上記運用を実施することにより、港湾内作業船舶としては、大湊側港湾内で作業を実施するゴムボートのみが海水貯留堰に衝突する可能性があることとなる。

なお、上記の船舶の津波時退避に係る運用は保安規定に定め管理する。

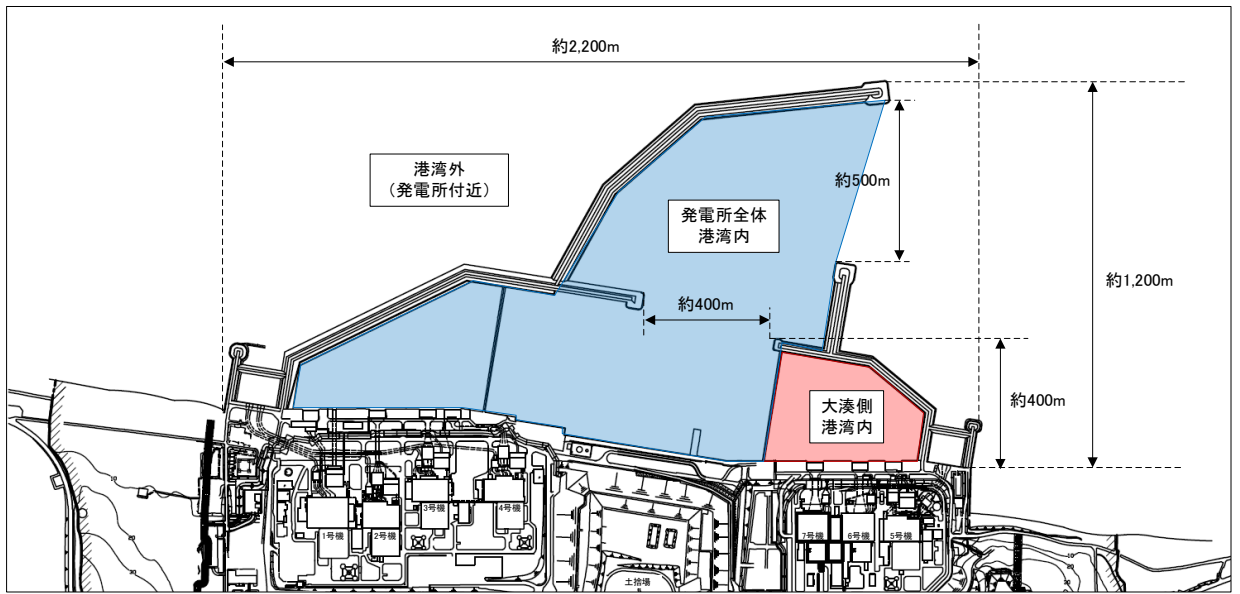


図 4.7-6 港湾内作業船舶の作業エリア分類

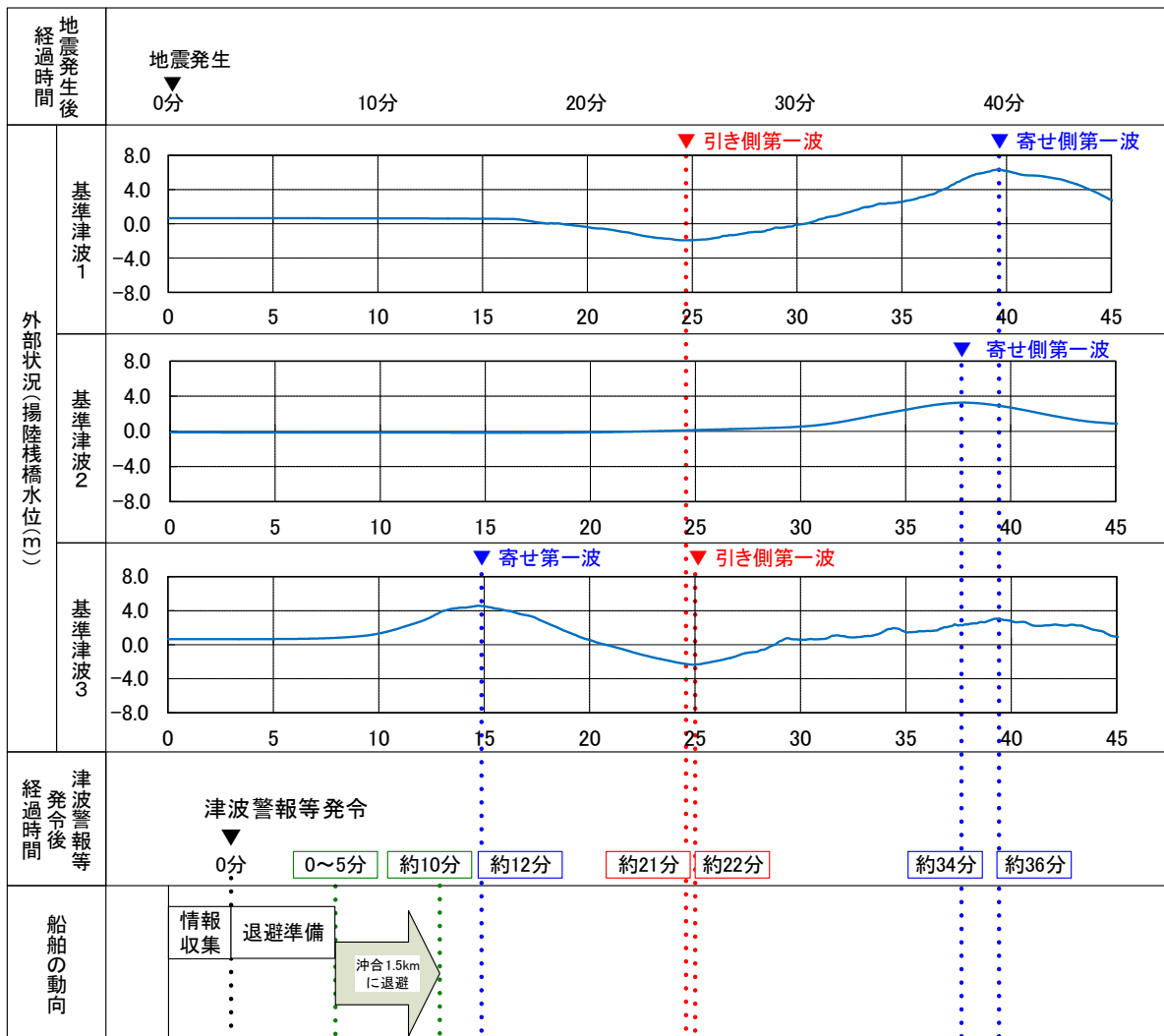


図 4.7-7 港湾内作業船舶の退避に係る時系列

表 4.7-2 各種船舶の主要寸法

船舶の種類別	主要寸法	
	幅	長さ
燃料等輸送船	約 17m	約 100m
浚渫船	約 17m	約 43m
土運船	約 11m	約 32m
曳船	約 6m～7m	約 15m～27m
作業船	約 1.5m～4m	約 5m～12m

表 4.7-3 その他作業船の整理結果

作業名称	総トン数 (約)	作業範囲	備考 (適用する運用)
海洋環境調査	～10 トン	・発電所全体港湾内 ・港湾外	津波警報発令で沖合に退避
		・大湊側港湾内 ・発電所全体港湾内	ゴムボートを利用
温排水水温調査	5 トン未満	・発電所全体港湾内 ・港湾外	津波警報発令で港湾外砂浜に退避
	～90 トン	・発電所全体港湾内 ・港湾外	津波警報発令で沖合に退避
港湾設備保守	1 トン未満	・大湊側港湾内 ・発電所全体港湾内	ゴムボートを利用
	1 トン未満	・発電所全体港湾内 ・港湾外	津波警報発令で港湾外砂浜に退避
	～10 トン	・発電所全体港湾内 ・港湾外	津波警報発令で沖合に退避

(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 4.7-4 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 4.7-4 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)で漂流を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.

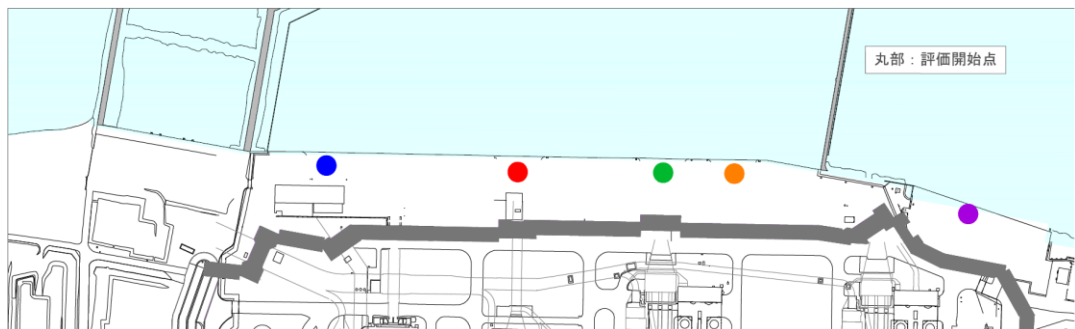


図 4.7-8 漂流物軌跡評価の初期配置（荒浜側護岸部）（図 4.2-26 を再掲）

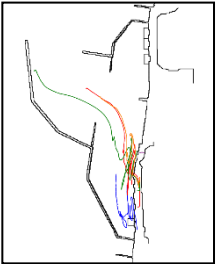
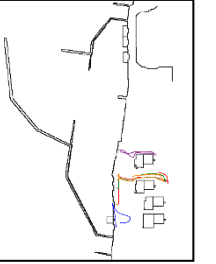
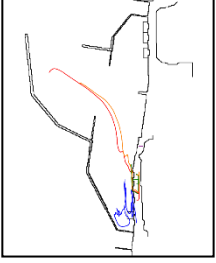

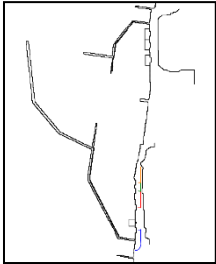
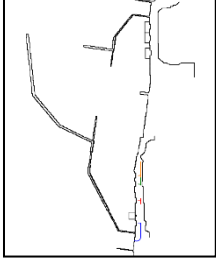
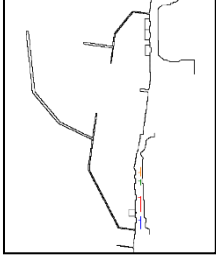

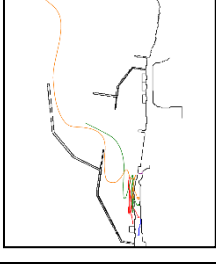

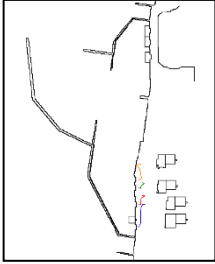
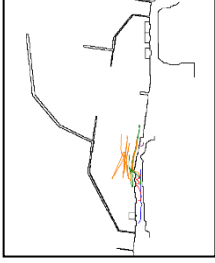

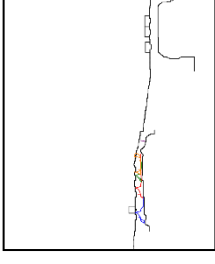
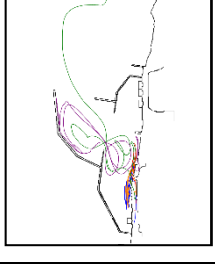
	基本ケース	荒浜側防潮堤 なし		防波堤損傷		護岸部 2m 沈下
		1m 沈降	2m 沈降	なし		
基準津波 1						
基準津波 2						
基準津波 3						

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)

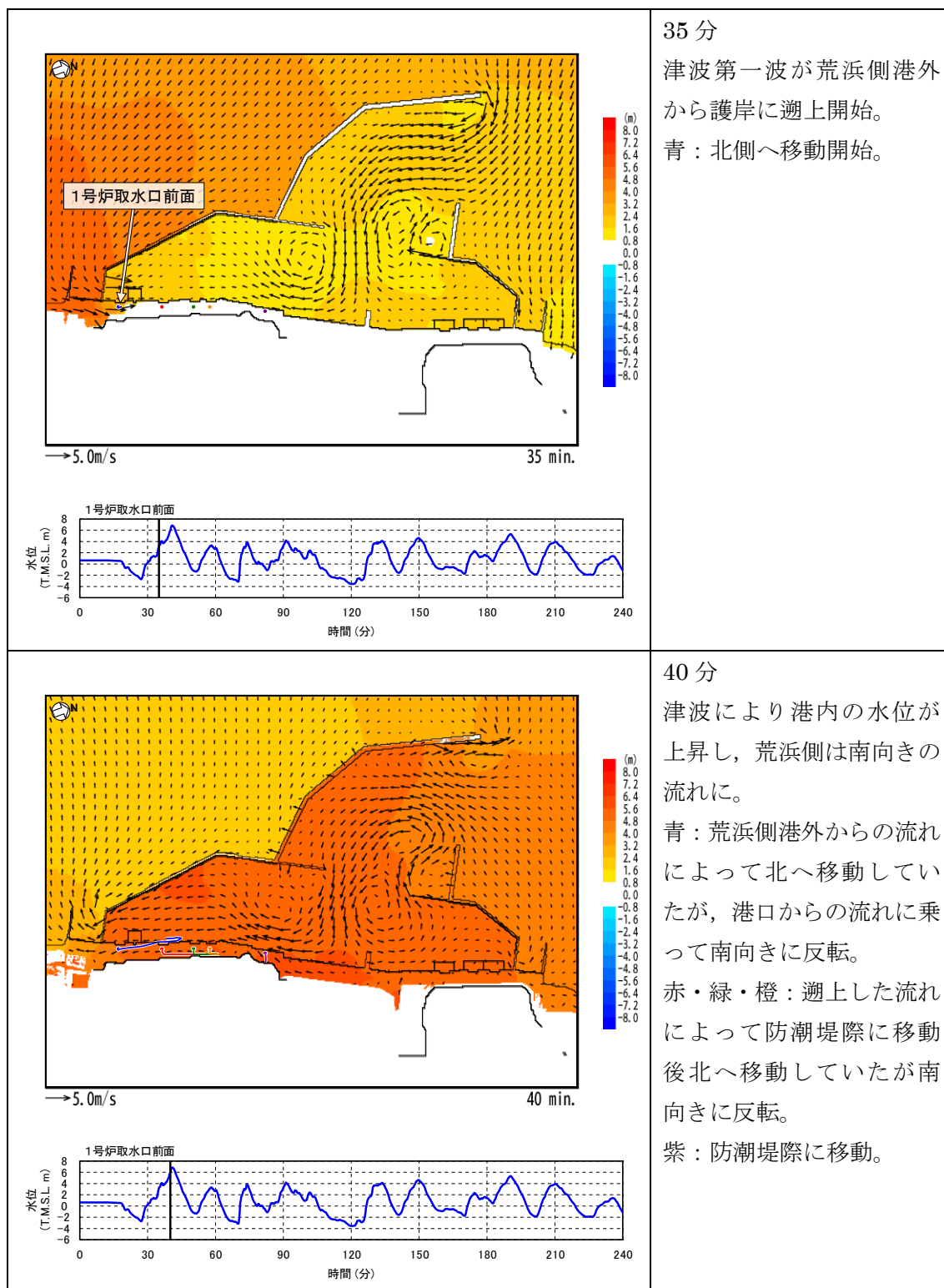


図 4.7-10(1) 流速ベクトルを用いた軌跡の考察 (基本ケース, 基準津波 1)

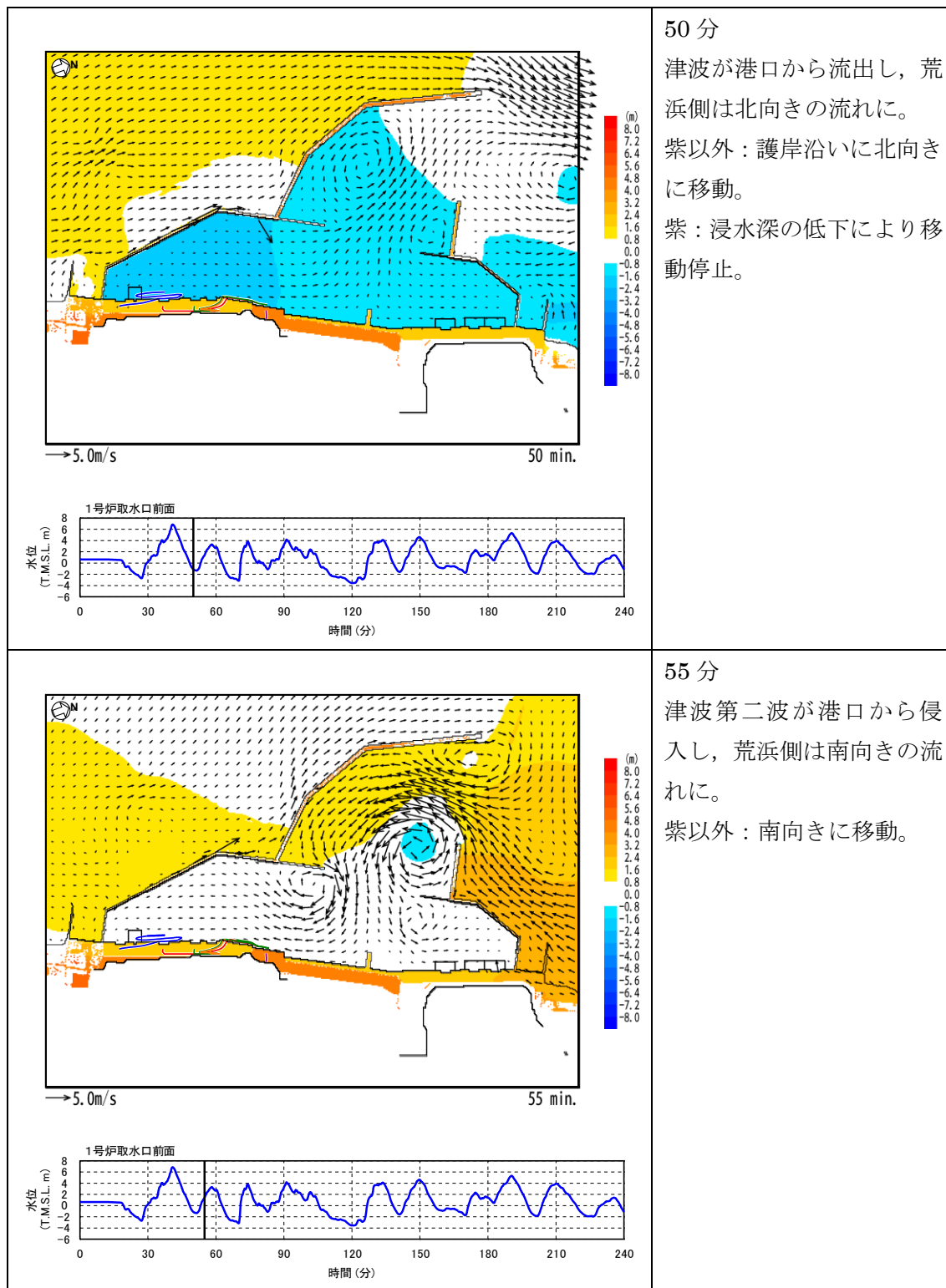


図 4.7-10(2) 流速ベクトルを用いた軌跡の考察（基本ケース，基準津波1）

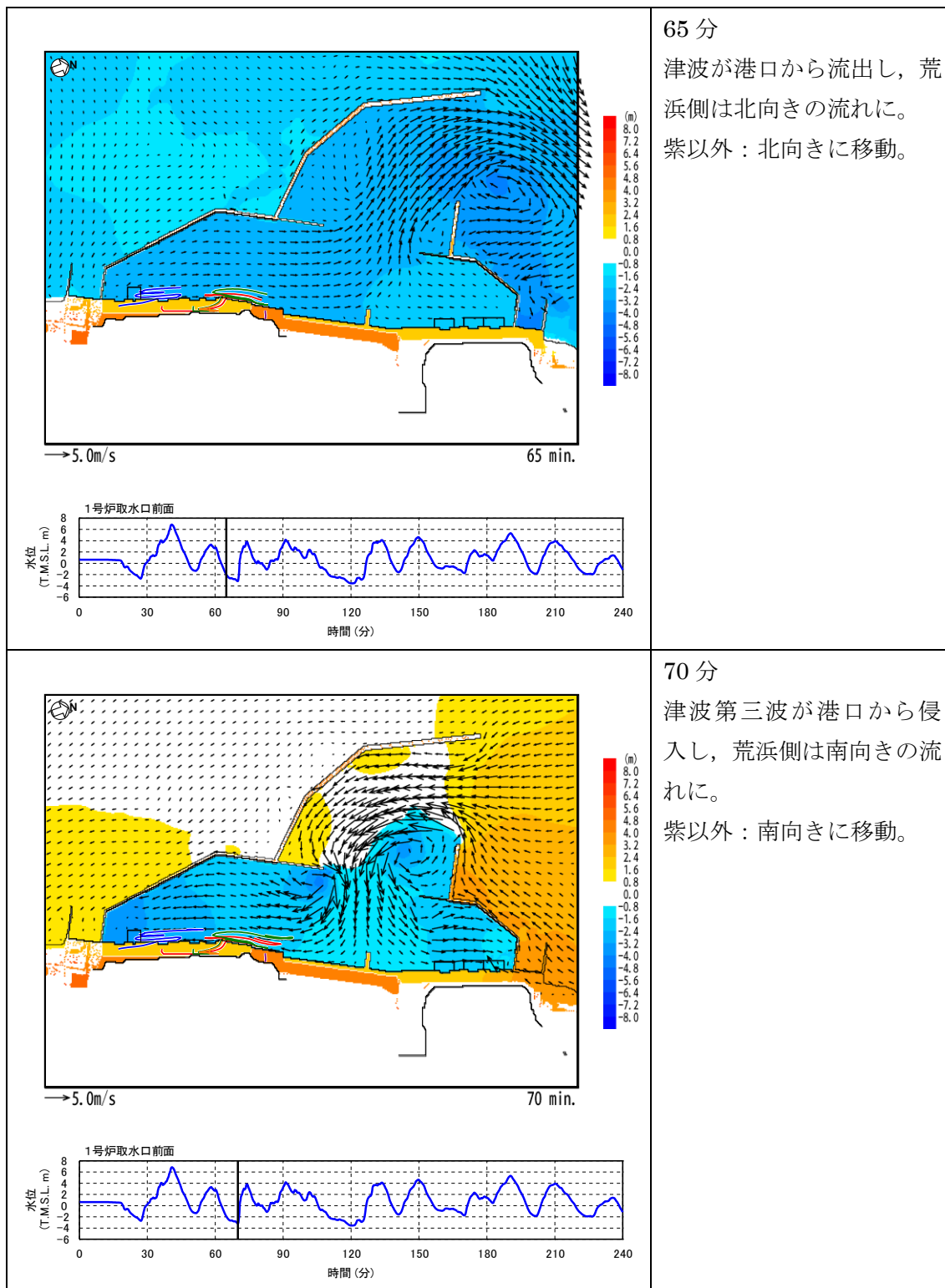


図 4.7-10(3) 流速ベクトルを用いた軌跡の考察（基本ケース，基準津波 1）

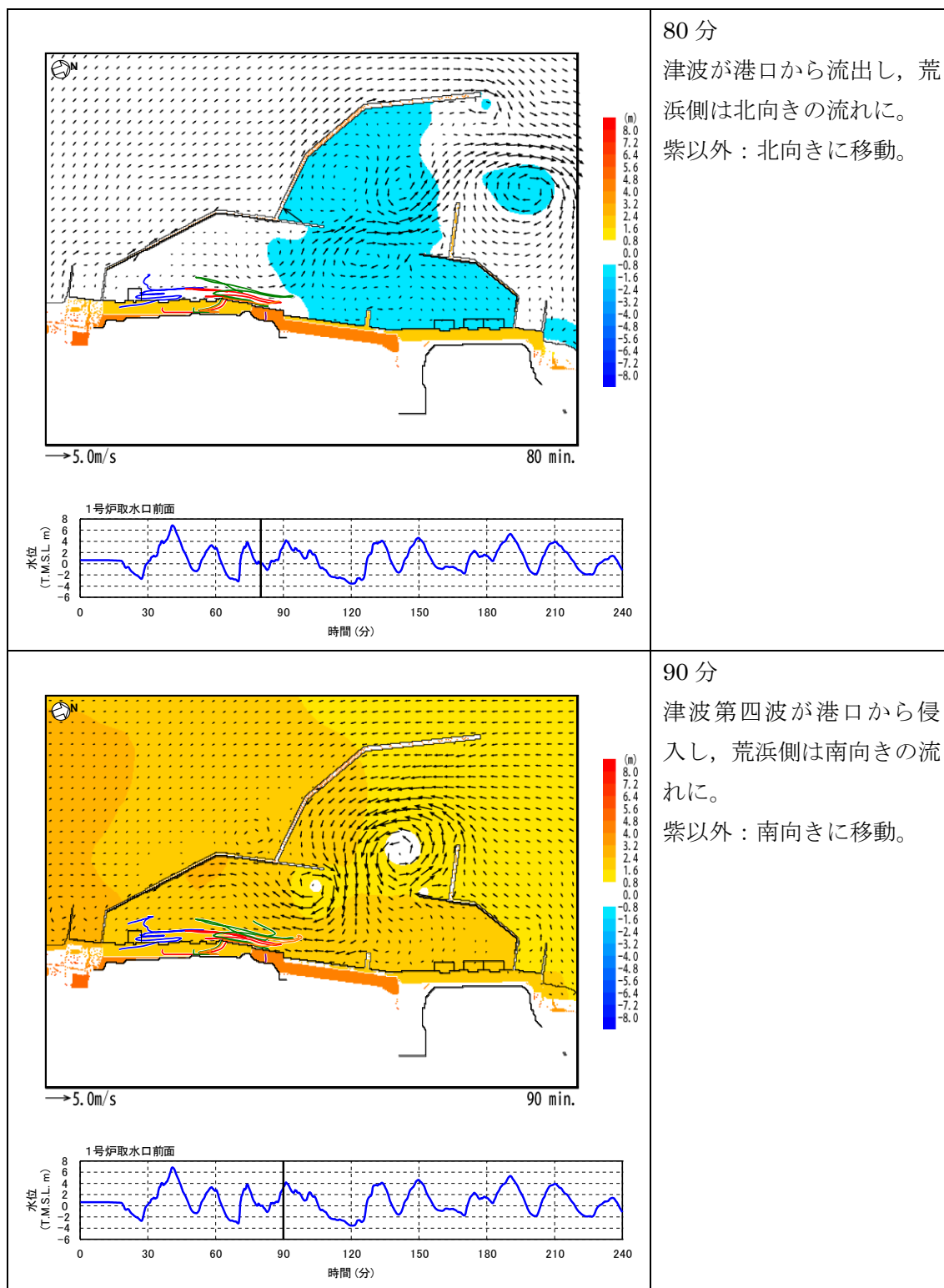


図 4.7-10(4) 流速ベクトルを用いた軌跡の考察（基本ケース，基準津波 1）

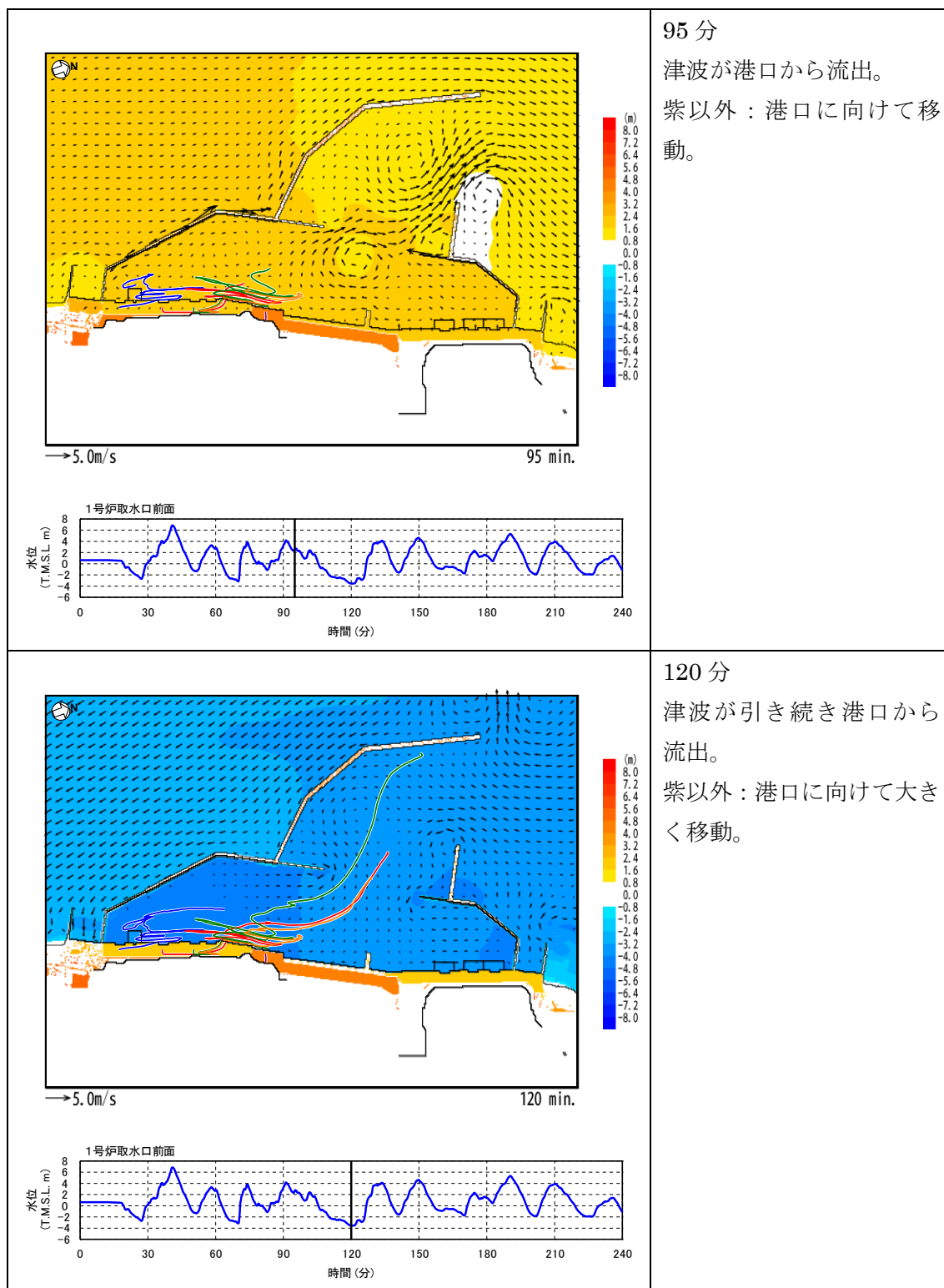


図 4.7-10(5) 流速ベクトルを用いた軌跡の考察（基本ケース，基準津波1）

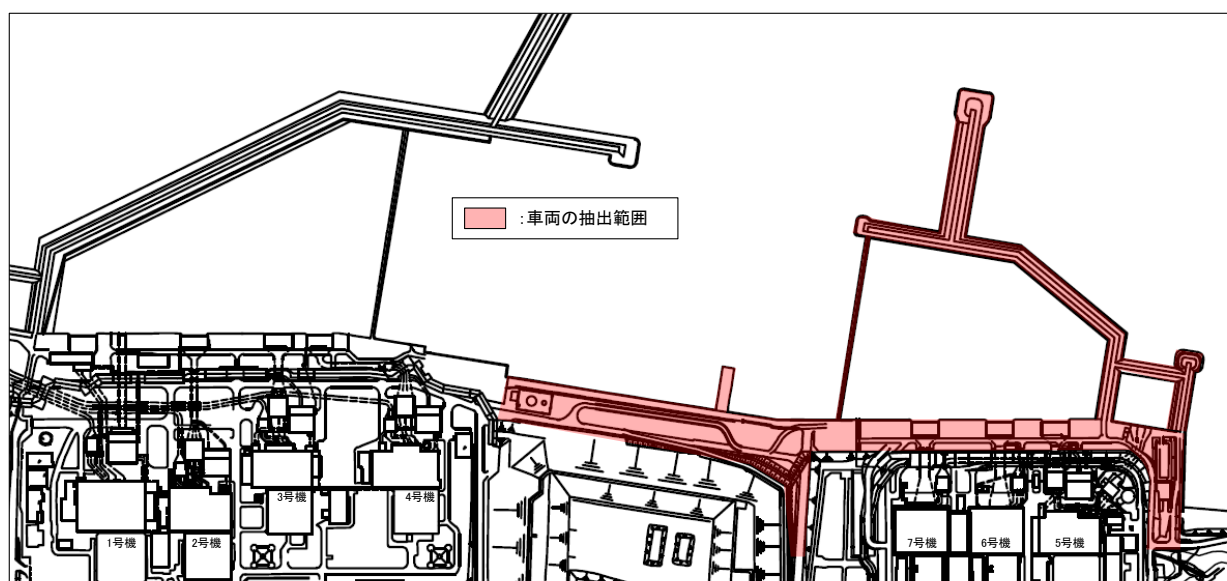


図 4.7-11 車両の抽出範囲（大湊側護岸部）

図 4.7-11 に示す範囲に駐停車する車両については、大津波警報発令により退避することが基本となるが、津波の起因事象の一つである地震による地面の変状により、退避ルートの健全性を確保できない可能性がある。上記状況を考慮し、車両について全て退避不可と仮定した場合でも海水貯留堰の機能へ有意な影響を与えることがないよう、各種車両に対して表 4.7-5 に示す運用を定める。各車両に対して定める運用は、図 4.7-12 に示すフローに従い選定するものとし、具体的な内容を以下に、またそれらを整理し表 4.7-6 に示す。

上記検討の結果、車両としては軽自動車は 7 号機取水口に到達する可能性があるものとして整理される。

(ア) 小型建設用車両（スキッドローダー、高所作業車等）

小型建設用車両（スキッドローダー、高所作業車等）は、取水路及びその関連設備の保全を実施する際に必要な車両となる。

一方で、その密度は 3.26t/m^3 程度（各車種に対する密度評価の詳細は添付資料 4 に示す。）であり、海水密度 1.05t/m^3 *1 よりも大きいことから小型建設用車両は漂流物化し、取水口に到達することはないと整理する。

(イ) 軽自動車

軽自動車は、取水路及びその関連設備の保全を実施する際に必要な車両となる。また、その密度は 0.25t/m^3 程度であり漂流物化し 7 号機取水口に到達する可能性がある。

一方で、軽自動車は体積及び重量が小さいため取水性への影響及び海水貯留堰への衝突影響は比較的軽微と考えられるため、7 号機取水口に到達するものとして、その影響

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

を評価することとする。

(ウ) 乗用車

乗用車は、取水路及びその関連設備の保全を実施する際に必要な車両となる。また、その密度は $0.28\text{t}/\text{m}^3$ 程度であり漂流物化し7号機取水口に到達する可能性があるとともに、衝突時に海水貯留堰の機能に影響を与える可能性がある。

一方で、乗用車の利用目的は主に人員運搬であるため軽自動車での代替が可能な場合があることから、可能な場合は代替車両を利用する。なお、代替車両の利用が困難な状況が生じた場合は、停車時間を人員乗降に要する必要最低限の時間のみに制限するとともに、駐車は禁止とする運用とする。ここで、万一停車時間中に津波警報が発令された場合は、退避時気相部開放措置を実施する運用とすることで、その密度を $3.26\text{t}/\text{m}^3$ 程度とし漂流物化を防止する。

上記より、乗用車は漂流物化し、取水口に到達することはないと整理する。

(エ) 中型トラック

中型トラックは、取水路及びその関連設備の保全を実施する際に必要な車両となる。また、その密度は $0.80\text{t}/\text{m}^3$ 程度であり漂流物化し7号機取水口に到達する可能性があるとともに、衝突時に海水貯留堰の機能に影響を与える可能性がある。

一方で、中型トラックの利用目的は主に資機材運搬であるため、軽自動車又は後述する大型トラックでの代替が可能な場合があることから、可能な場合は代替車両を利用する。なお、代替車両の利用が困難な状況が生じた場合は、退避時気相部開放措置を実施する運用とすることで、その密度を $2.55\text{t}/\text{m}^3$ 程度とし漂流物化を防止する。上記より、中型トラックは漂流物化し、取水口に到達することはないと整理する。ここで、退避時気相部開放措置の実効性について添付資料5に示す。

(オ) ユニック

ユニックは、取水路及びその関連設備の保全を実施する際に必要な車両となる。また、その密度は $0.97\text{t}/\text{m}^3$ 程度であり漂流物化し7号機取水口に到達する可能性があるとともに、衝突時に海水貯留堰の機能に影響を与える可能性がある。

一方で、ユニックの利用目的は主に設備吊り上げであるため、後述する大型建設用車両での代替が可能な場合があることから、可能な場合は代替車両を利用する。代替車両の利用が困難な場合は、退避時気相部開放措置を実施する運用とすることで、その密度を $2.81\text{t}/\text{m}^3$ 程度とし漂流物化を防止する。上記より、ユニックは漂流物化し、取水口に到達することはないと整理する。

(カ) 大型トラック（トレーラ含む。）

大型トラック（トレーラを含む。）は、取水路及びその関連設備の保全を実施する際に必要な車両となる。

一方で、その密度は $1.36\text{t}/\text{m}^3$ 程度であり、海水密度 $1.05\text{t}/\text{m}^3$ よりも大きいことから大

型トラックは漂流物化し、取水口に到達することはないと整理する。

(キ) バキューム車

バキューム車は、取水路及びその関連設備の保全を実施する際に必要な車両となる。また、その密度は0.51t/m³程度であり漂流物化し7号機取水口に到達する可能性があるとともに、衝突時に海水貯留堰の機能に影響を与える可能性がある。

一方で、バキューム車の利用目的は主に汚泥集積であるため、後述する大型建設用車両での代替が可能である場合があることから、可能な場合には代替車両を利用する。代替車両の利用が困難な場合は、退避時気相部開放措置を実施する運用とすることで、その密度を1.37t/m³程度とし漂流物化を防止する。上記より、ユニックは漂流物化し、取水口に到達することはないと整理する。

(ク) 大型建設用車両（クレーン、高所作業車等）

大型建設用車両（クレーン、高所作業車等）は、取水路及びその関連設備の保全を実施する際に必要な車両となる。

一方で、その密度は1.18t/m³程度であり、海水密度1.05t/m³よりも大きいことから大型建設用車両は漂流物化し、取水口に到達することはないと整理する。

表 4.7-5 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	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 より大きいことを確認する。
②	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。
③	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。
④	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4参照）
⑤	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。） 万一、護岸部に停車している期間に津波警報が発令された場合は、④退避時気相部開放を適用する。

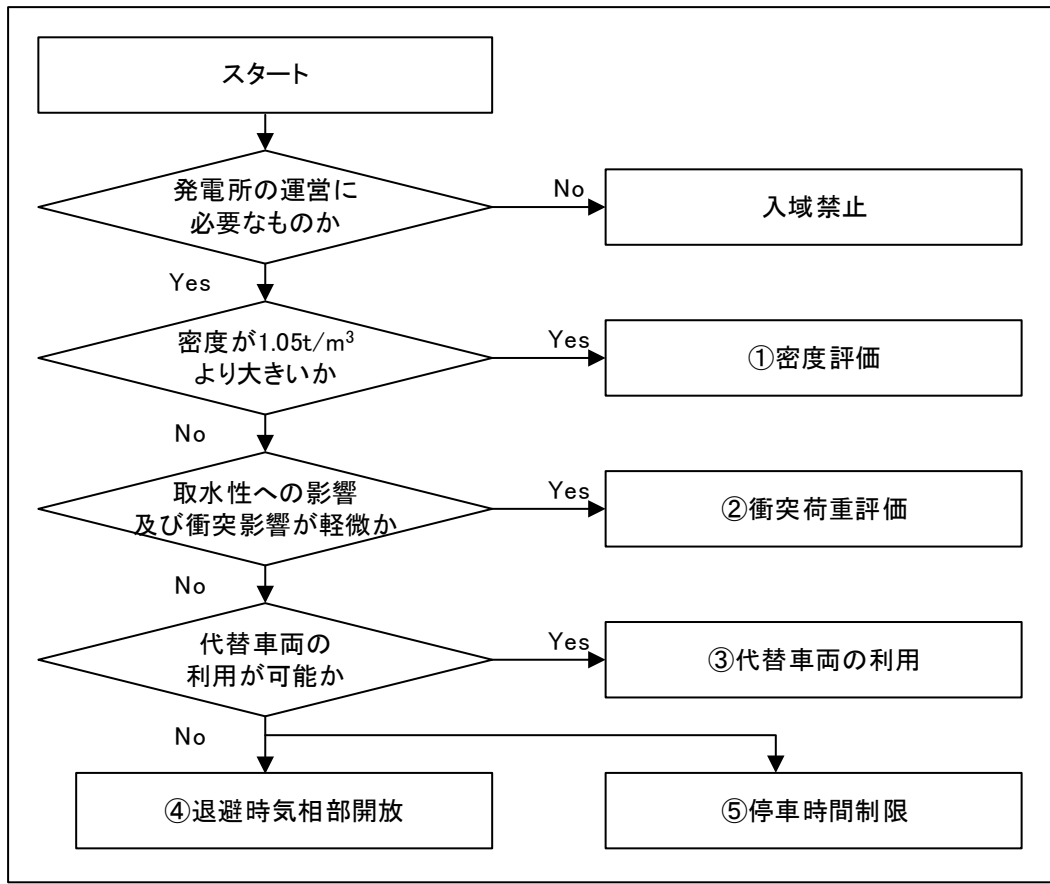


図 4.7-12 車両運用選定フロー

表 4.7-6 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	車両重量[t]	密度[t/m ³]*1		参考密度[t/m ³]*2	
				開放無し*3	開放有り*4	開放無し*3	開放有り*4
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	①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	②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代替車両(軽自動車)の利用 (困難な場合は④退避時気相部開放)	2.00	0.28	選択しない	0.27	3.26
中型トラック	資機材運搬	③代替車両(軽自動車又は大型トラック) の利用 (困難な場合は④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	③代替車両(大型建設用車両)の利用 (困難な場合は④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	①密度評価	9.70	1.36	不要	1.26	不要
バキューム車	汚泥集積	③代替車両(大型建設用車両)の利用 (困難な場合は④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	①密度評価	7.32	1.26	不要	1.18	不要

注記*1: 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)

*2: 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

*3: 「⑤退避時気相部開放」を適用しない場合の密度を記載

*4: 「⑤退避時気相部開放」を適用する場合の密度を記載

(3) その他資機材，一般構築物

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，一般構築物として，監視カメラ，拡声器，標識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含まれることから，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 4.7-13 及び図 4.7-14 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。

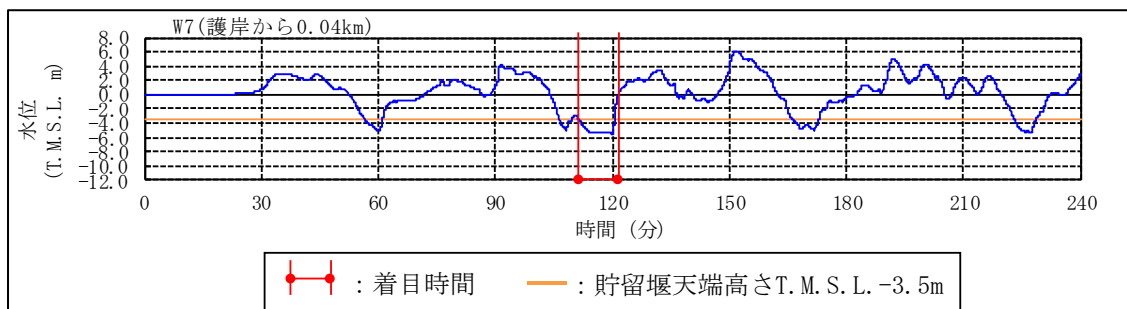


図 4.7-13 最大水面勾配が確認された時刻（基準津波 2，118 分，海水貯留堰設置位置（W7））

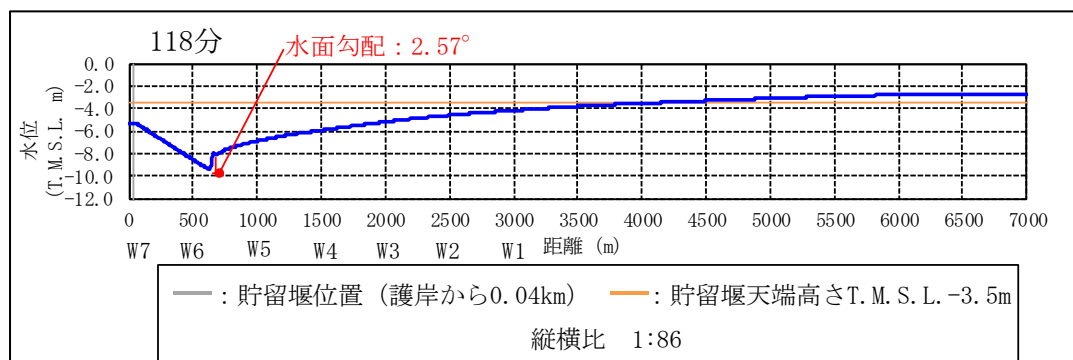


図 4.7-13 最大水面勾配が確認された時刻の津波波形（空間分布）

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 4.7-15 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 4.7-16 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。

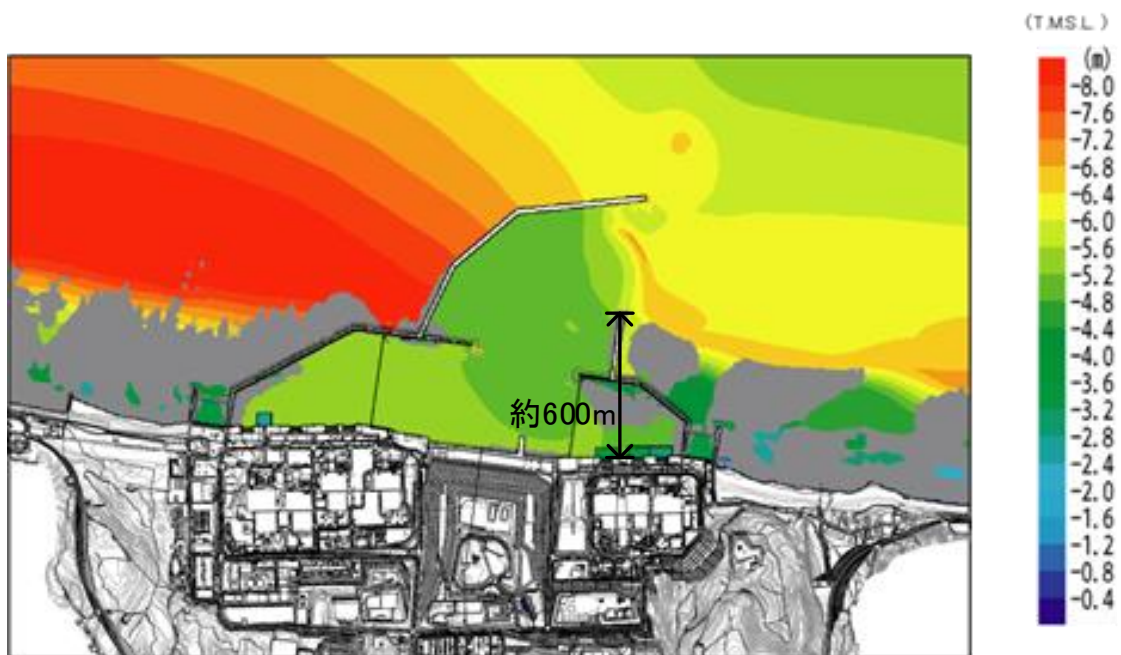


図 4.7-15 基準津波における海底露出範囲(基準津波 2 における最低水位分布)

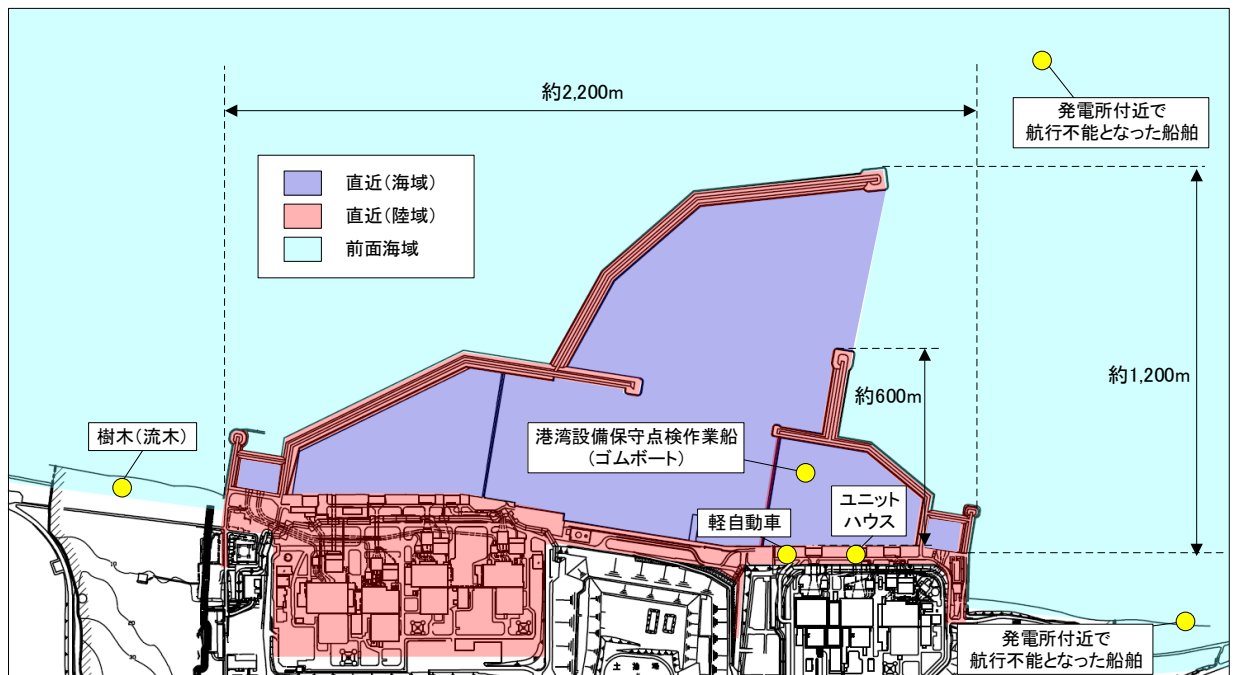
4.7.4.3 衝突荷重を算定する検討対象漂流物(衝突物)の整理

「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 4.7-7 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 4.7-16 に示す。

表 4.7-7 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 4.7-16 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 4.7-8 に示す。

表 4.7-8 規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物の衝突荷重算定式の整理 (1/2)

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

表 4.7-8 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> $F = \gamma_p x^5 \left(\frac{5}{4}\tilde{m}\right)^{\frac{2}{3}} v^{\frac{5}{3}}, x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1+k_2}, k = \frac{(1-v^2)}{mE}, \tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}$ <p>a: 衝突面半径の 1/2 (ここではコンテナ衝突面の縦横長さの平均の 1/4), E: ヤング係数, v: ポアソン比, m: 質量, v: 衝突速度, γ_p: 塑性によるエネルギー減衰効果, 添字 1, 2 は衝突体と被衝突体を表す。</p>	<p>「実験に基づく推定式」(縮尺 1/5 の模型実験)</p> <ul style="list-style-type: none"> 使用コンテナ: 長さ 1.21m, 高さ 0.52m, 幅 0.49m 衝突速度: 1.0~2.5m/s 程度 ・材質: 鋼製 <p>水理模型実験では、コンテナを被衝突体の前面 1.21m (現地換算 6.05m) に設置して衝突力を求めた算定式である。</p>

注記*: FEMA: FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY

(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 4.7-9 に示す。

表 4.7-7 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 4.7-9 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 4.7-9 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 4.7-10 に示す。(算出過程については添付資料 4 参照)

表 4.7-10 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
				(参考) FEMA	(参考) 143*3

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。

注記*3：参考として、FEMA を適用した場合の荷重を記載

ソリトン分裂波や砕波発生に関する検討

1. 概要

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

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

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

2. 検討方針

本資料では、図4.7添1-2-1に示す検討フローに従って検討を行う。

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

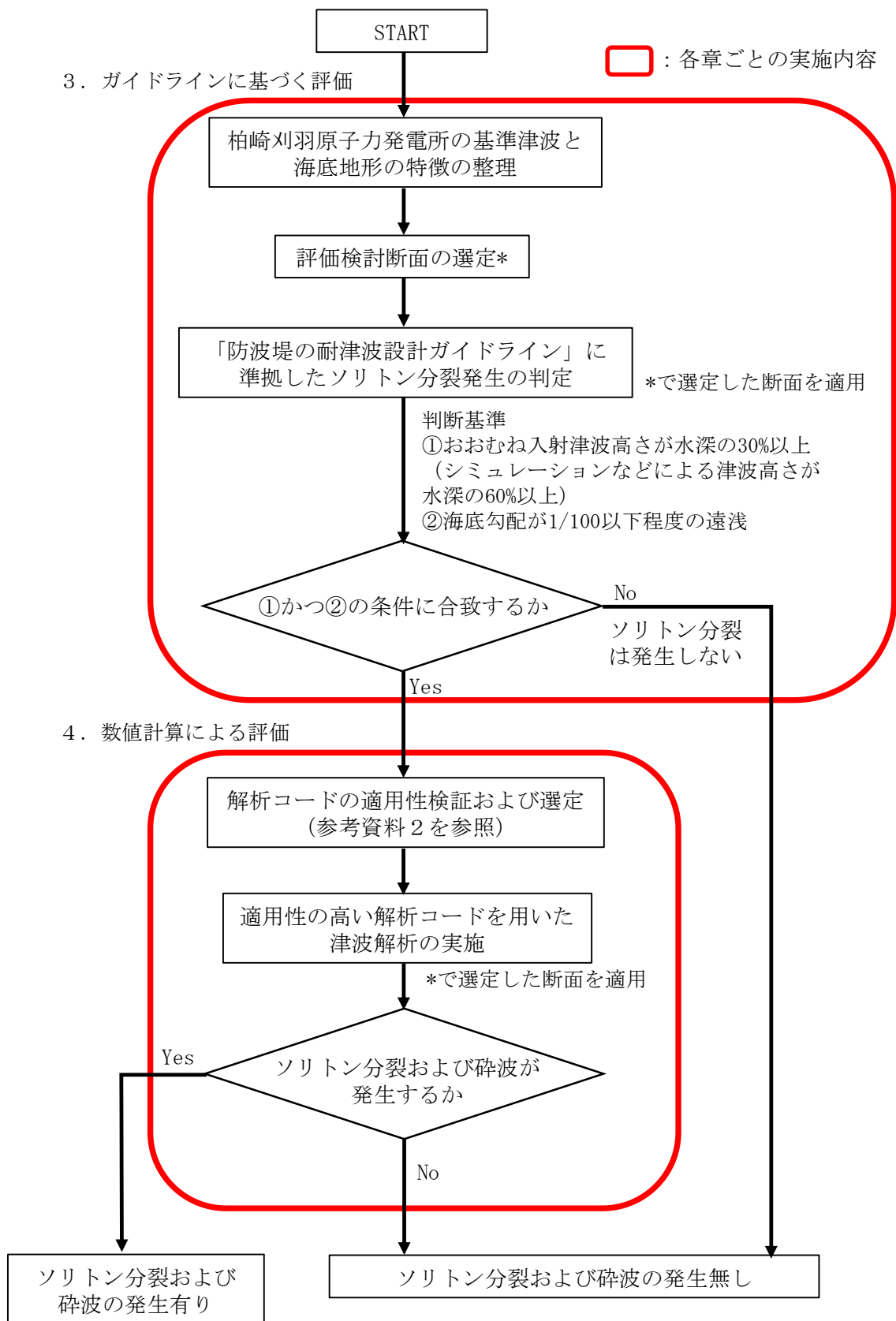


図 4.7 添 1-2-1 検討フロー

3. ガイドラインに基づく評価

3.1 検討概要

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

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

3.2 柏崎刈羽原子力発電所の基準津波の特徴

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

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

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

3.3 柏崎刈羽原子力発電所の海底地形の特徴

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

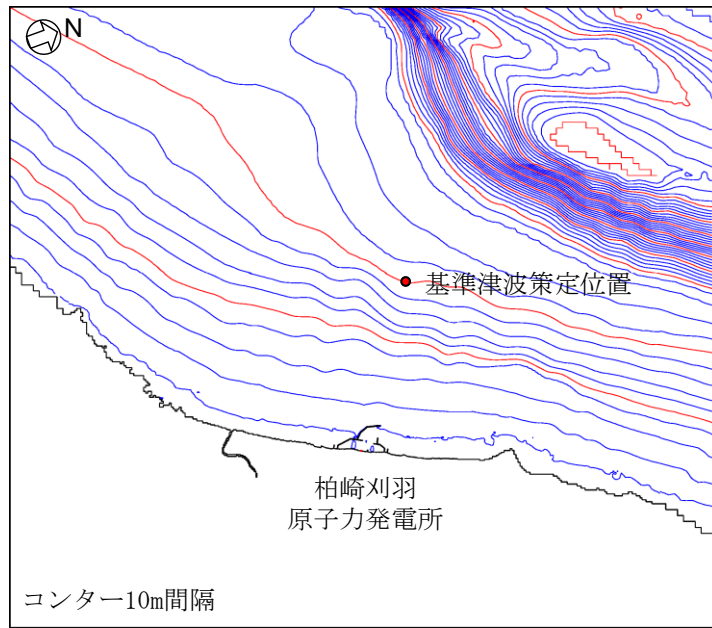


図 4.7 添 1-3.3-1 海底地形平面図

3.4 検討断面の選定

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

3.5 ソリトン分裂発生の判定結果

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

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

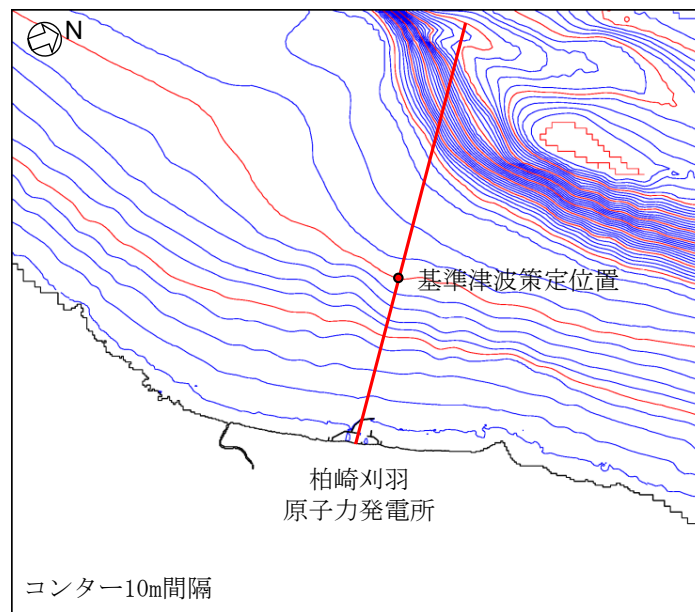
過去の事例や文献では、日本海側では日本海中部地震（1983）時に、秋田県峰浜村の海底勾配 1/200 程度の遠浅海岸で、ソリトン分裂が発生したとされているが、柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺海域では観測されていない。また、安田ほか(2006)⁸⁾は、ソリトン分裂が発達するためには十分な伝播距離が必要であるとしている。

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

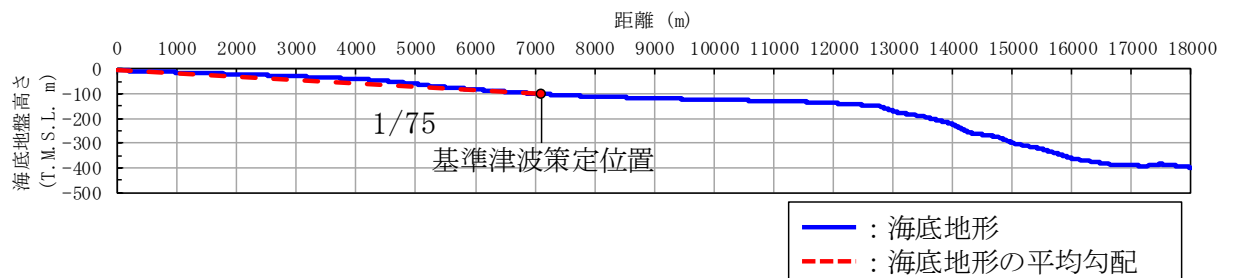
表 4.7 添 1-3.5-1 7号機取水口前面における津波高さと水深の関係

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

注記* : 5条まとめ資料と同様に潮位のばらつきを考慮



(1) 平面図



(2) 断面図

図 4.7 添 1-3.5-1 敷地前面の海底勾配

4. 数値計算による評価

4.1 概要

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

4.2 判断基準

(1) ソリトン分裂の波形

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

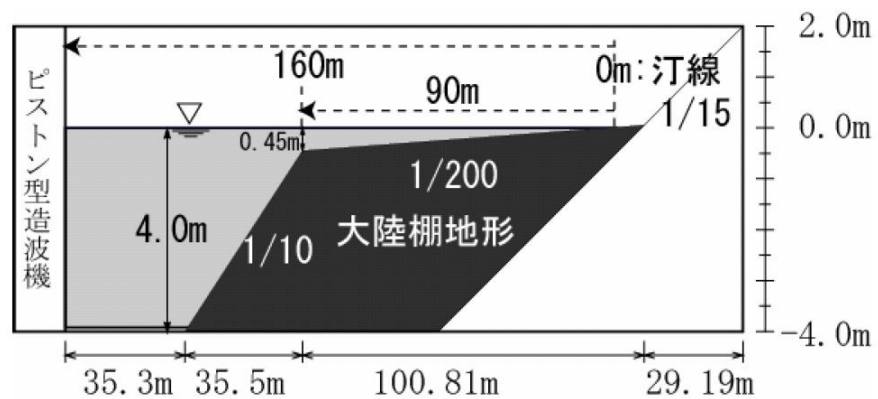


図4.7添1-4.2-2 実験水路の概要(原子力土木委員会 津波評価部会 委員会報告⁴⁾)

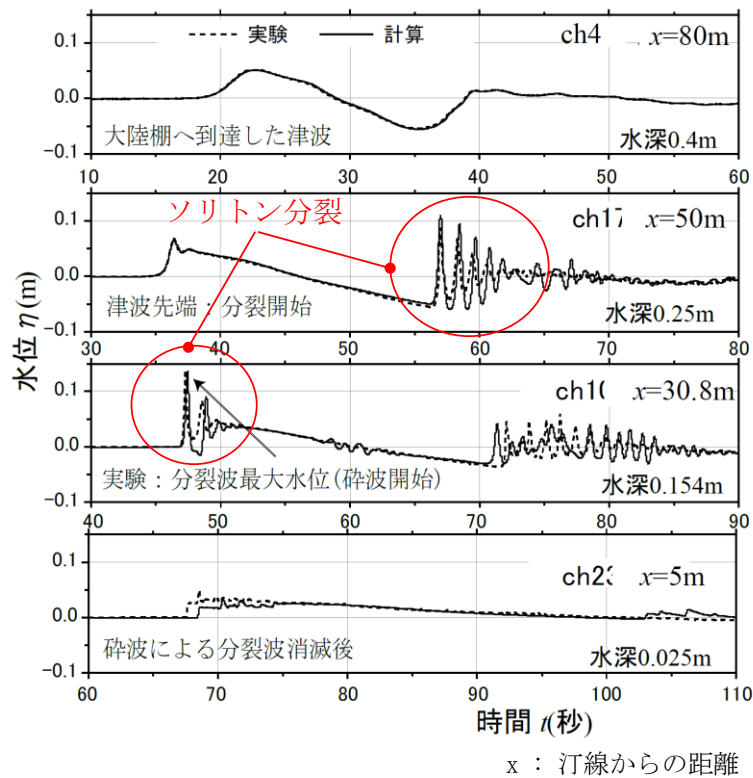


図 4.7 添 1-4.2-3 ソリトン分裂波形の例 (原子力発電所の津波評価技術 2016⁵⁾に加筆)

(2) 砕波発生の有無

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

4.3 検討方針

ソリトン分裂および砕波の発生の有無を確認するにあたっては、1次元モデルや断面2次元モデルを用いた数値計算による検討が有効である。

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

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

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

なお、参考資料4「1次元津波水位解析に用いた解析コード「BSNSQ」の適用性について」に解析コードの検証および妥当性確認結果を示す。

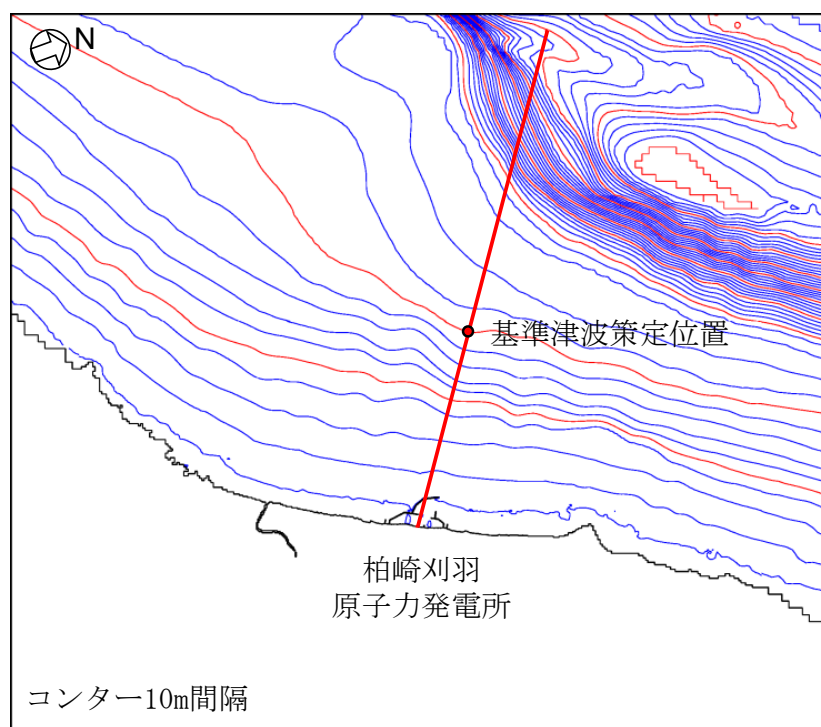
4.4 数値解析による検討

(1) 解析モデル

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

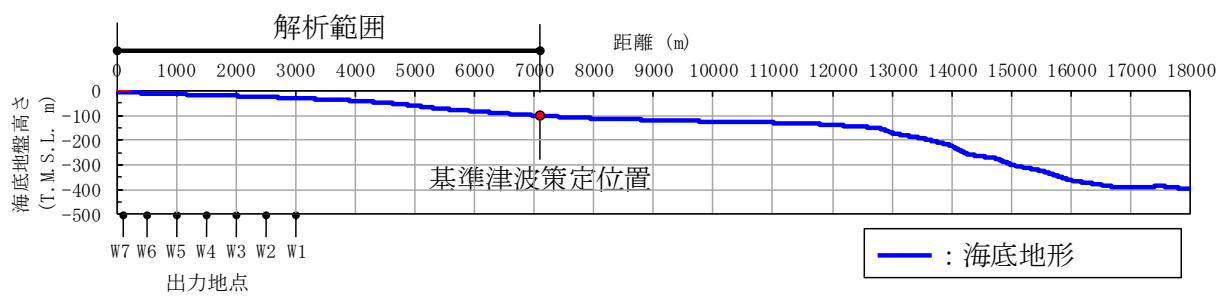
解析モデルにおいては、「3.4 検討断面の選定」で示したとおり、基準津波策定位置を通り等深線と直交する直線の断面をモデル化した。計算格子間隔は「津波浸水想定の設定の手引き⁷⁾」によると「最小計算格子間隔は10m程度より小さくすることを目安とする」との記載があることから、5条まとめ資料の津波シミュレーションの最小格子サイズと同じ5mとした。なお、基準津波策定位置から護岸までのモデル化においては、一様に最小格子サイズ5mとした。

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

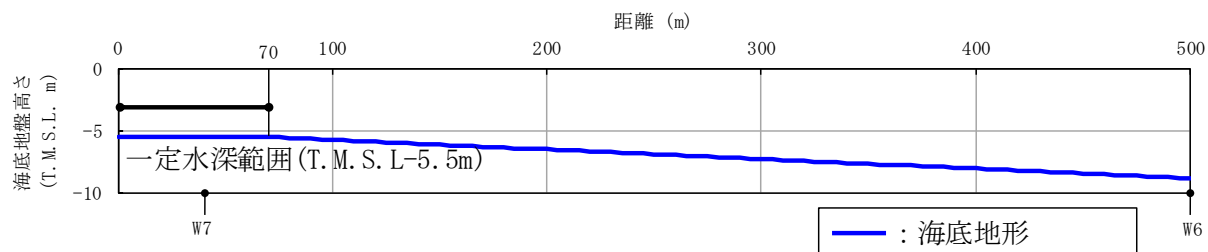


広域

図 4.7 添 1-4.4-1 検討断面の位置



全範囲



拡大

図 4.7 添 1-4.4-2 解析モデル

表 4.7 添 1-4.4-1 津波波形の出力位置

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

(2) 解析条件

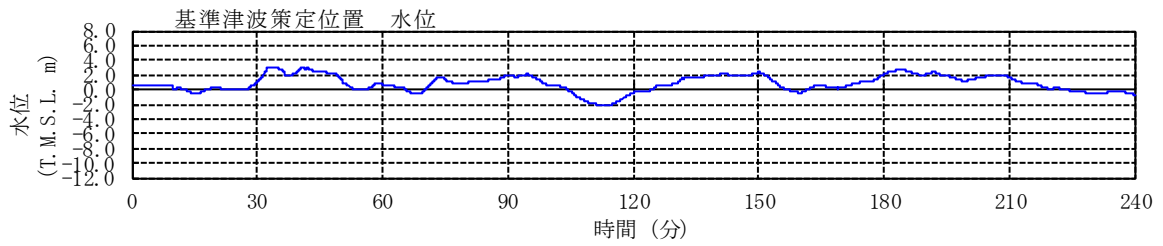
解析条件を表 4.7 添 1-4.4-2 に示す。

表 4.7 添 1-4.4-2 解析条件

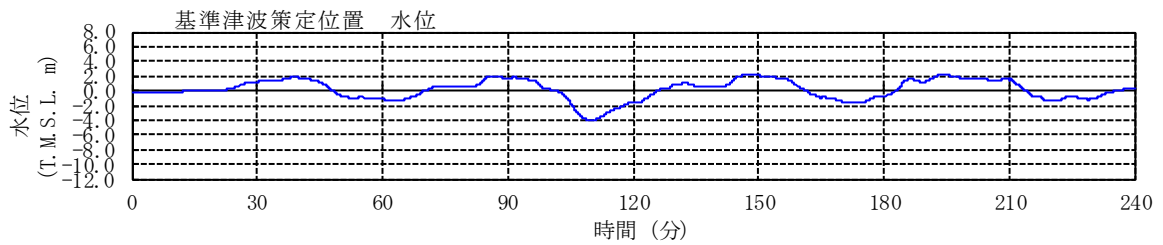
モデル化	基準津波策定位置～護岸 (防波堤はモデル化せず, 港湾内の T.M.S.L. -5.5m 以浅は, 一定水深)
計算格子間隔	5m
計算時間間隔	0.05 秒
潮位条件	朔望平均満潮位・干潮位に潮位のばらつきを考慮 基準津波 1 : T.M.S.L. 0.65m 基準津波 2 : T.M.S.L. -0.12m 基準津波 3 : T.M.S.L. 0.65m
境界条件	ソリトン分裂および砕波の発生有無を検討する上では, 海域での水位変動量が重要となることや, 陸域での護岸, 大湊側防潮堤や中央土捨場等の敷地内の現地地形を踏まえ, 護岸で完全反射とした。
摩擦係数	マンニングの粗度係数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

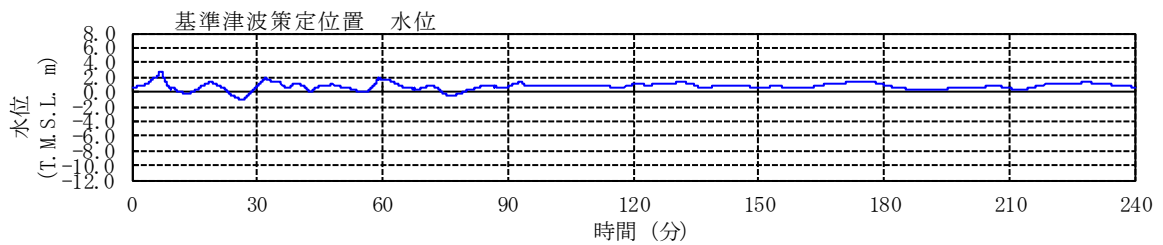
入力波形は設置変更許可申請書に示した基準津波 1 から 3 を対象とした。また、基準津波策定位置を入力位置とした。基準津波策定位置における入力波形を図 4.7 添 1-4.4-3 に示す。



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で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。

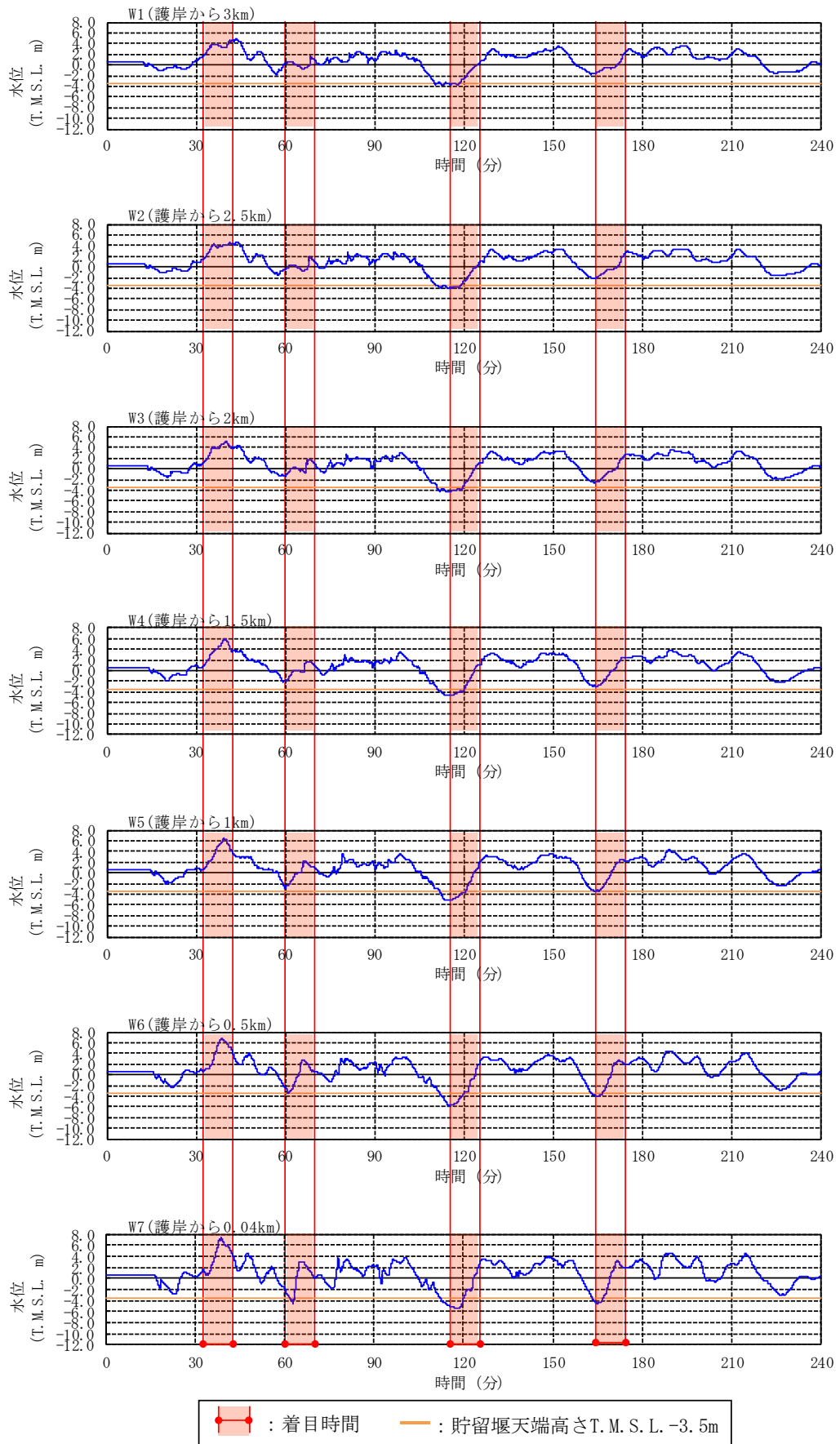


図 4.7 添 1-4.4-4 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [0-240 分]

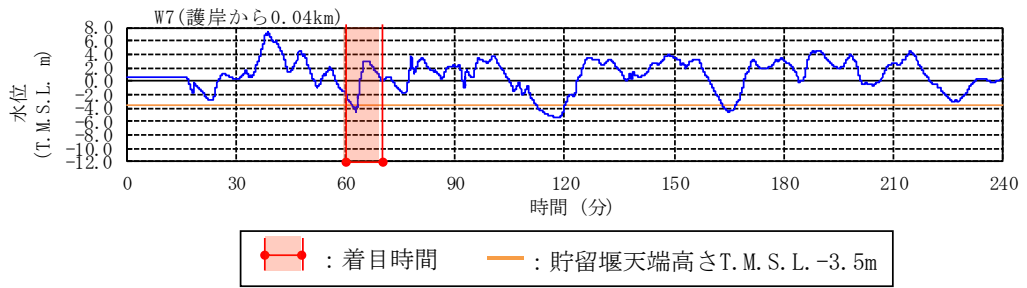


図 4.7 添 1-4.4-5 水位時刻歴波形の着目時間範囲 (基準津波 1)

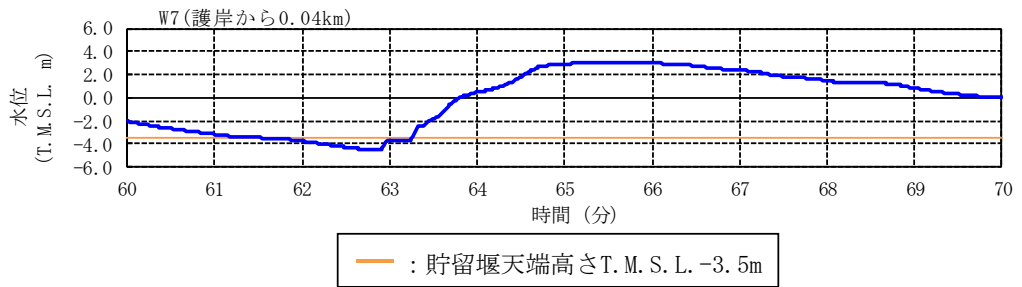


図 4.7 添 1-4.4-6 水位時刻歴波形 (基準津波 1) [60-70 分を拡大]

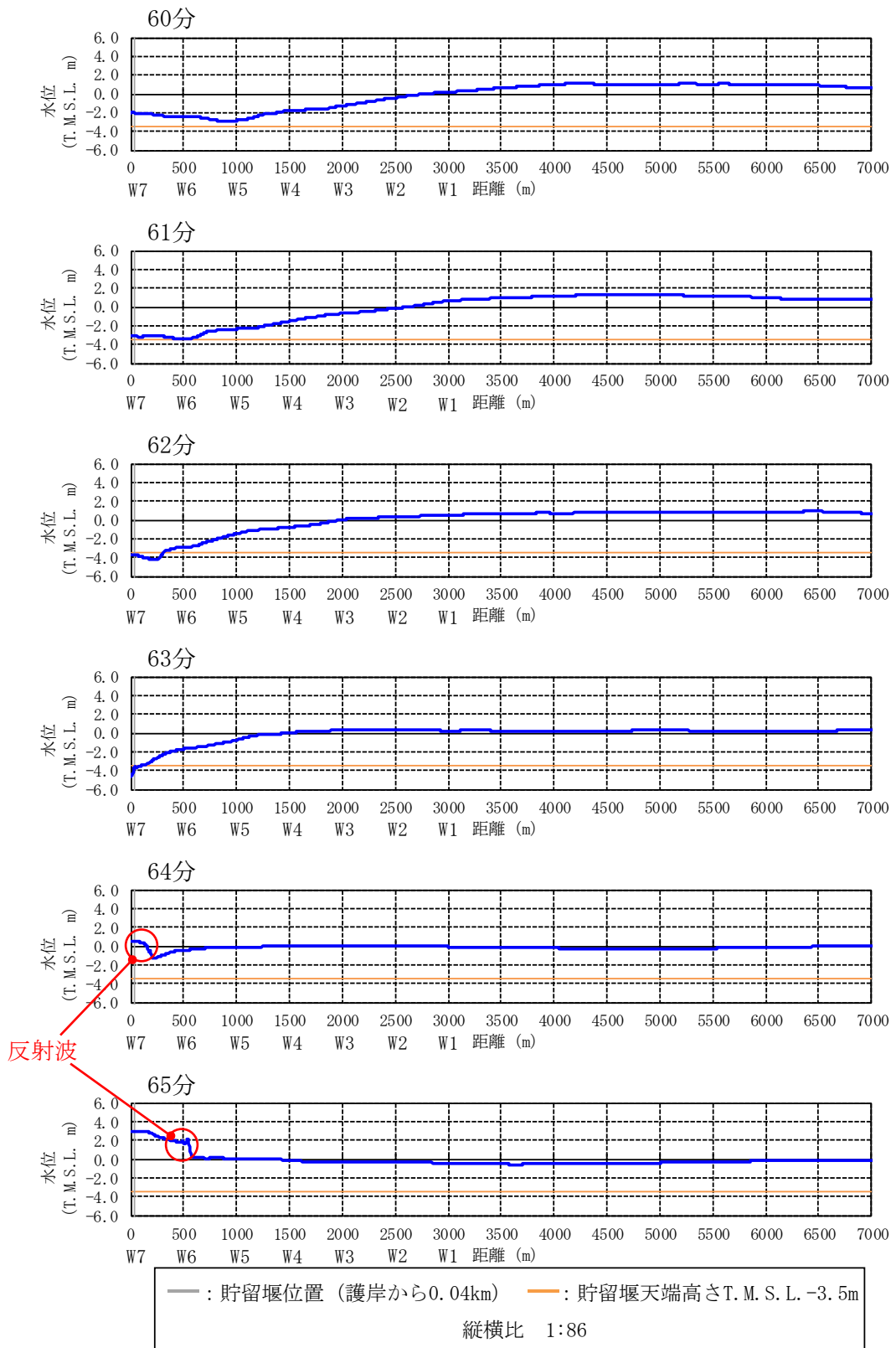


図 4.7 添 1-4.4-7 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [60-65 分]

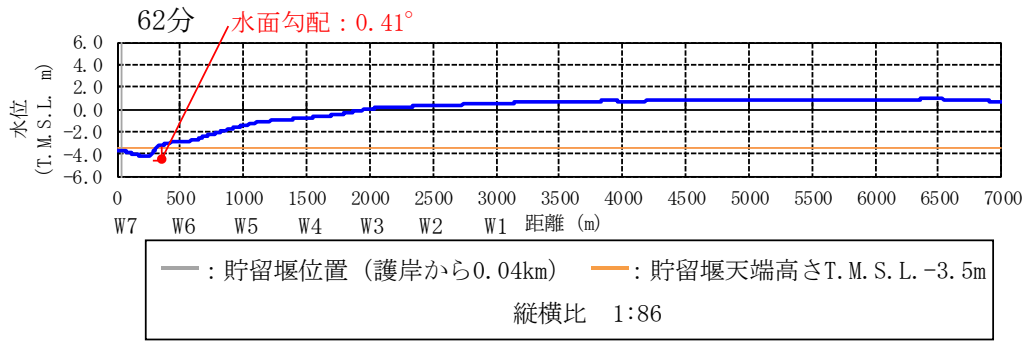


図 4.7 添 1-4.4-8 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 1, 62 分時点)

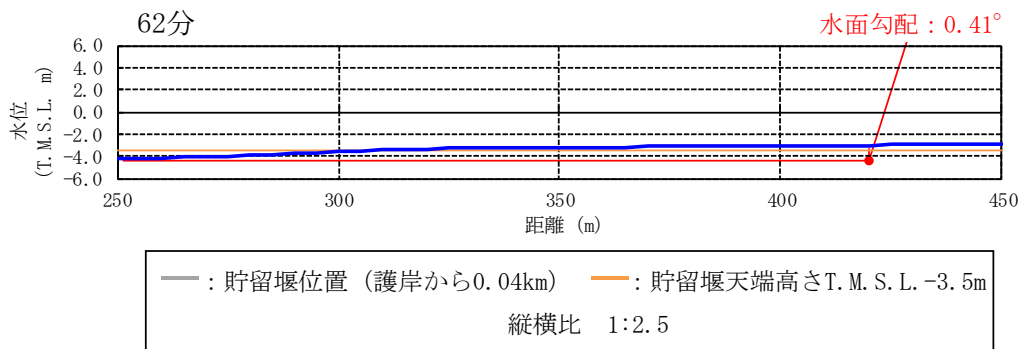


図 4.7 添 1-4.4-9 水位の空間分布 (基準津波 1, 62 分時点) [250-450m を拡大]

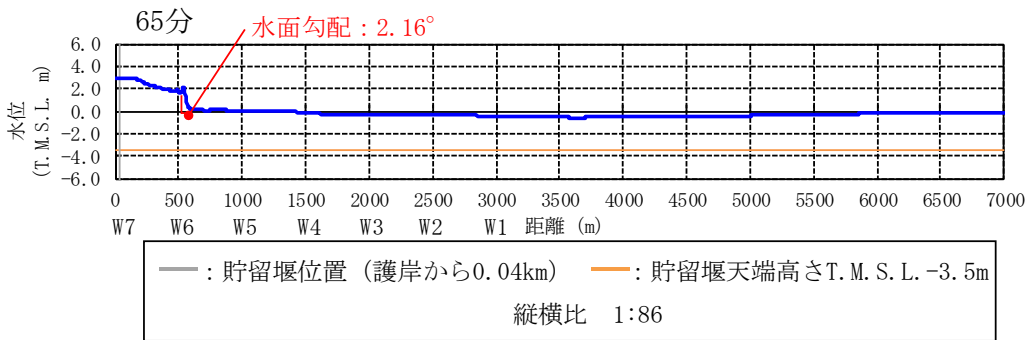


図 4.7 添 1-4.4-10 水位の空間分布と水面勾配 (基準津波 1, 65 分時点)

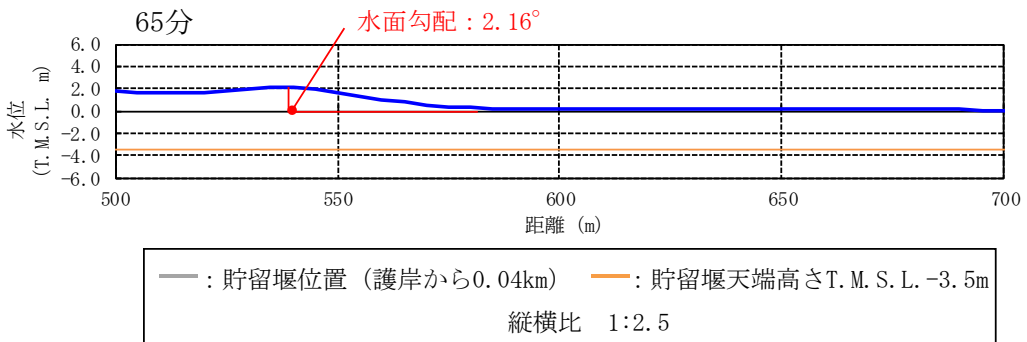


図 4.7 添 1-4.4-11 水位の空間分布 (基準津波 1, 65 分時点) [500-700m を拡大]

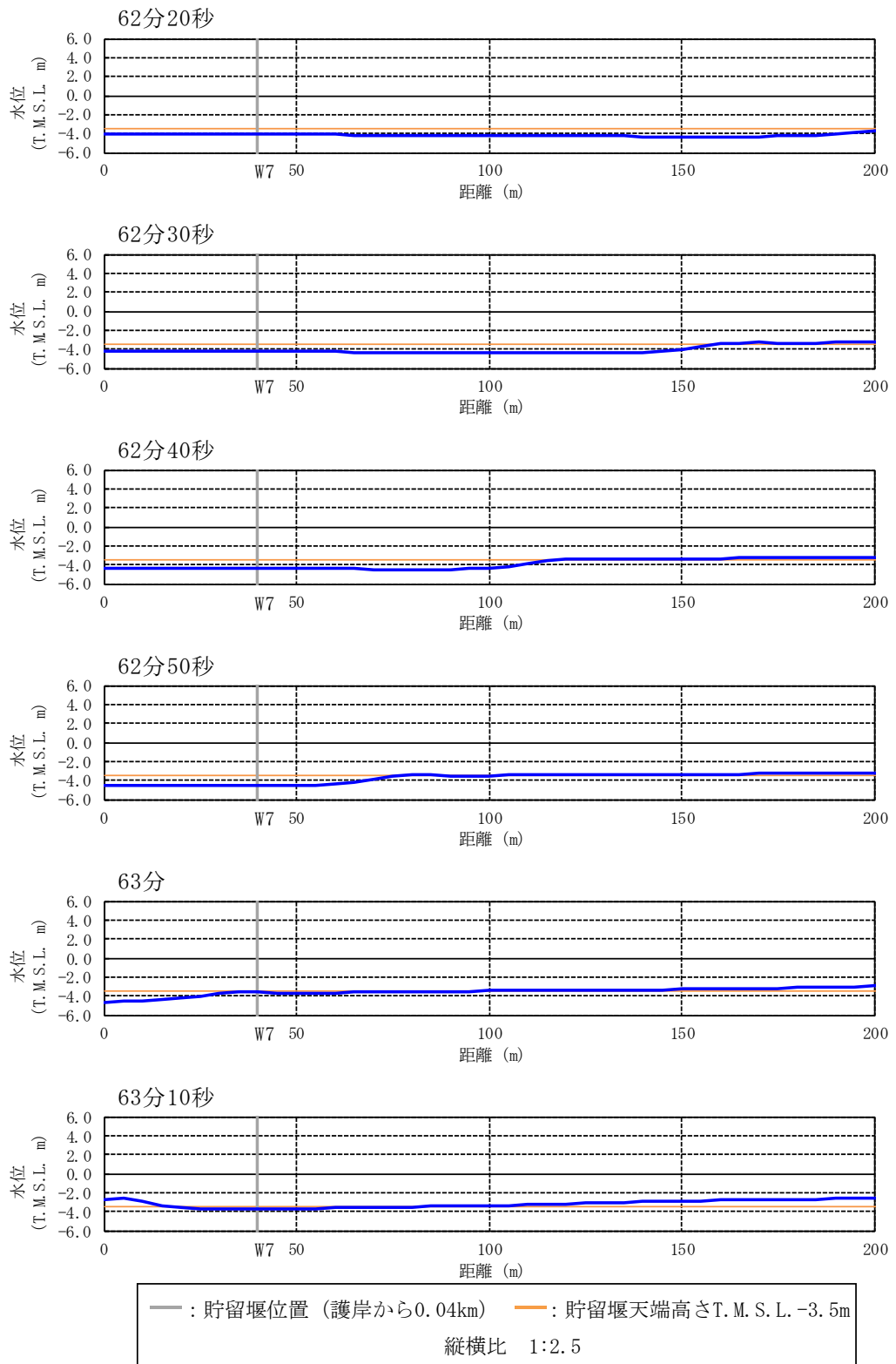


図 4.7 添 1-4.4-12 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1)

[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。

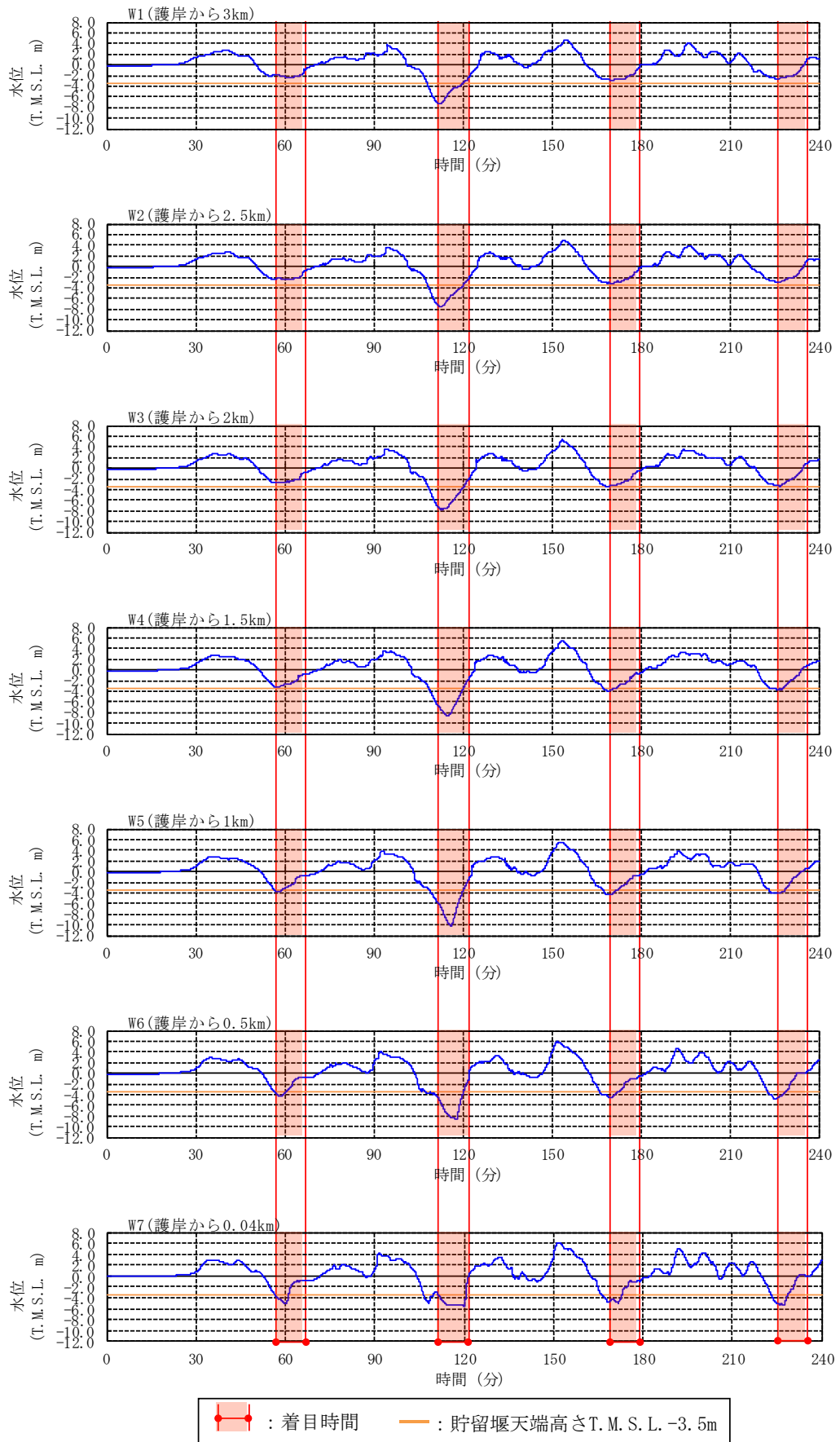


図 4.7 添 1-4.4-13 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [0-240 分]

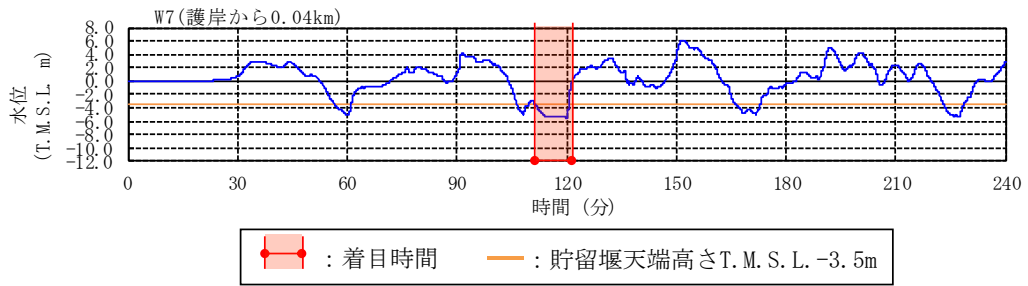


図 4.7 添 1-4.4-14 水位時刻歴波形の着目時間範囲（基準津波 2）

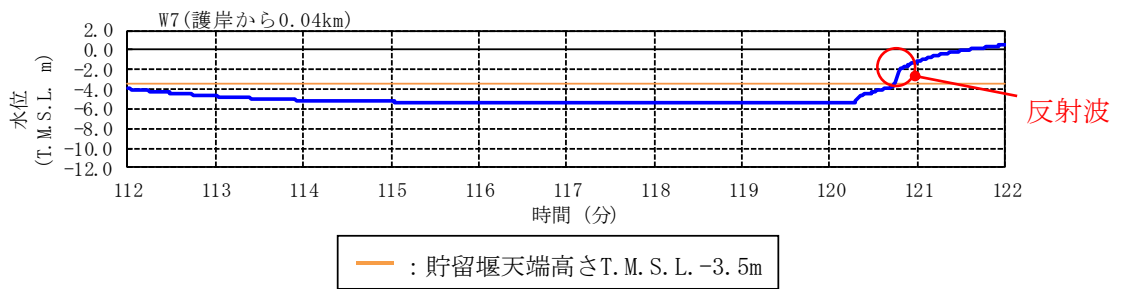


図 4.7 添 1-4.4-15 水位時刻歴波形（基準津波 2） [112-122 分を拡大]

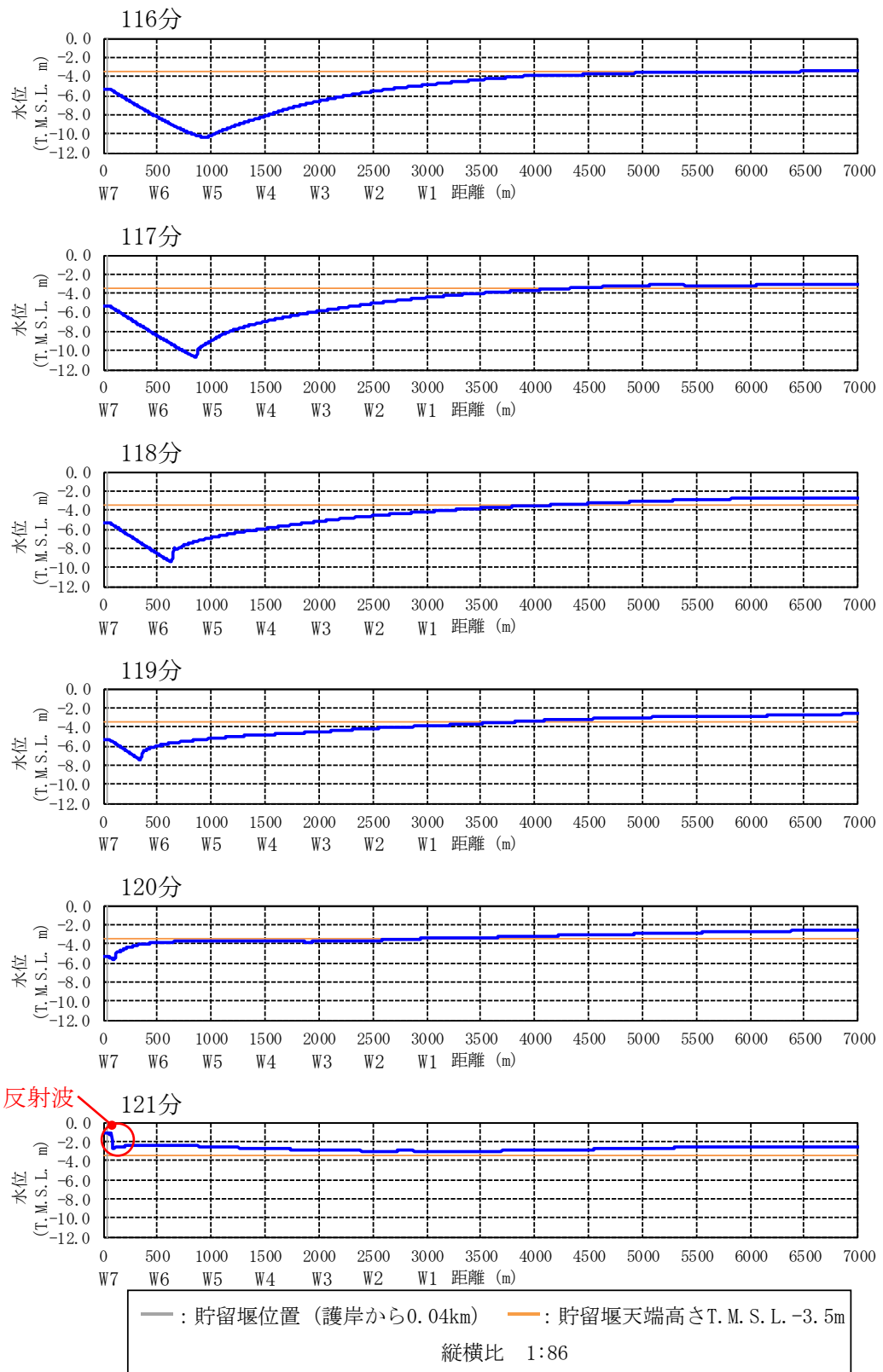


図 4.7 添 1-4.4-16 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [116-121 分]

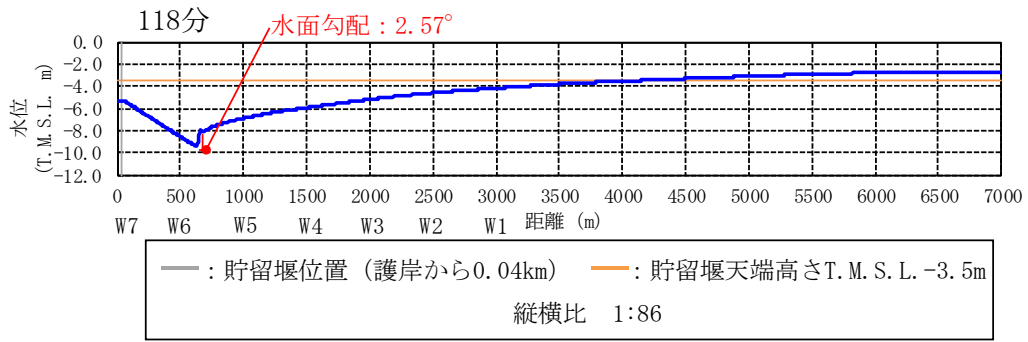


図 4.7 添 1-4.4-17 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 2, 118 分時点)

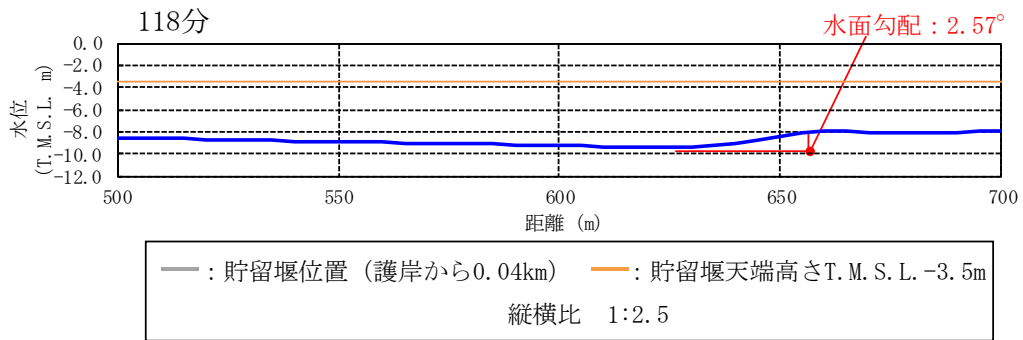


図 4.7 添 1-4.4-18 水位の空間分布と最大水面勾配 (基準津波 2, 118 分時点)
[500-700m を拡大]

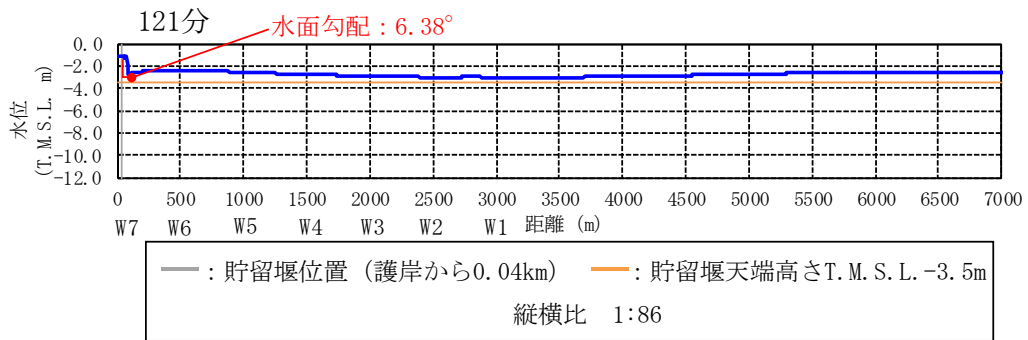


図 4.7 添 1-4.4-19 水位の空間分布と水面勾配 (基準津波 2, 121 分時点)

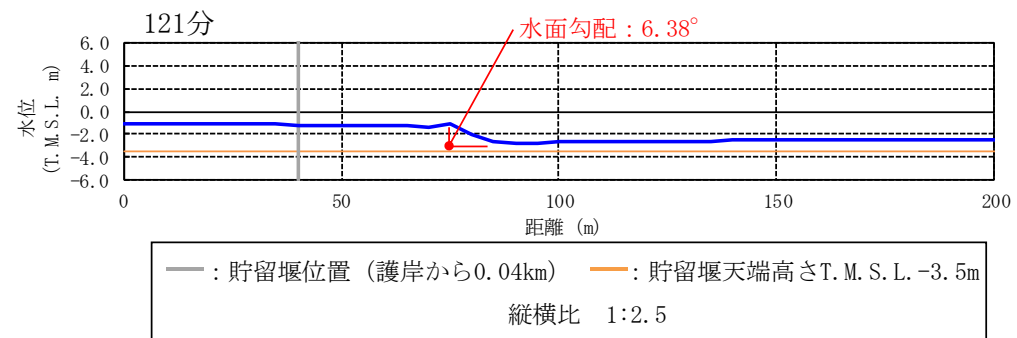


図 4.7 添 1-4.4-20 水位の空間分布 (基準津波 2, 121 分時点) [0-200m を拡大]

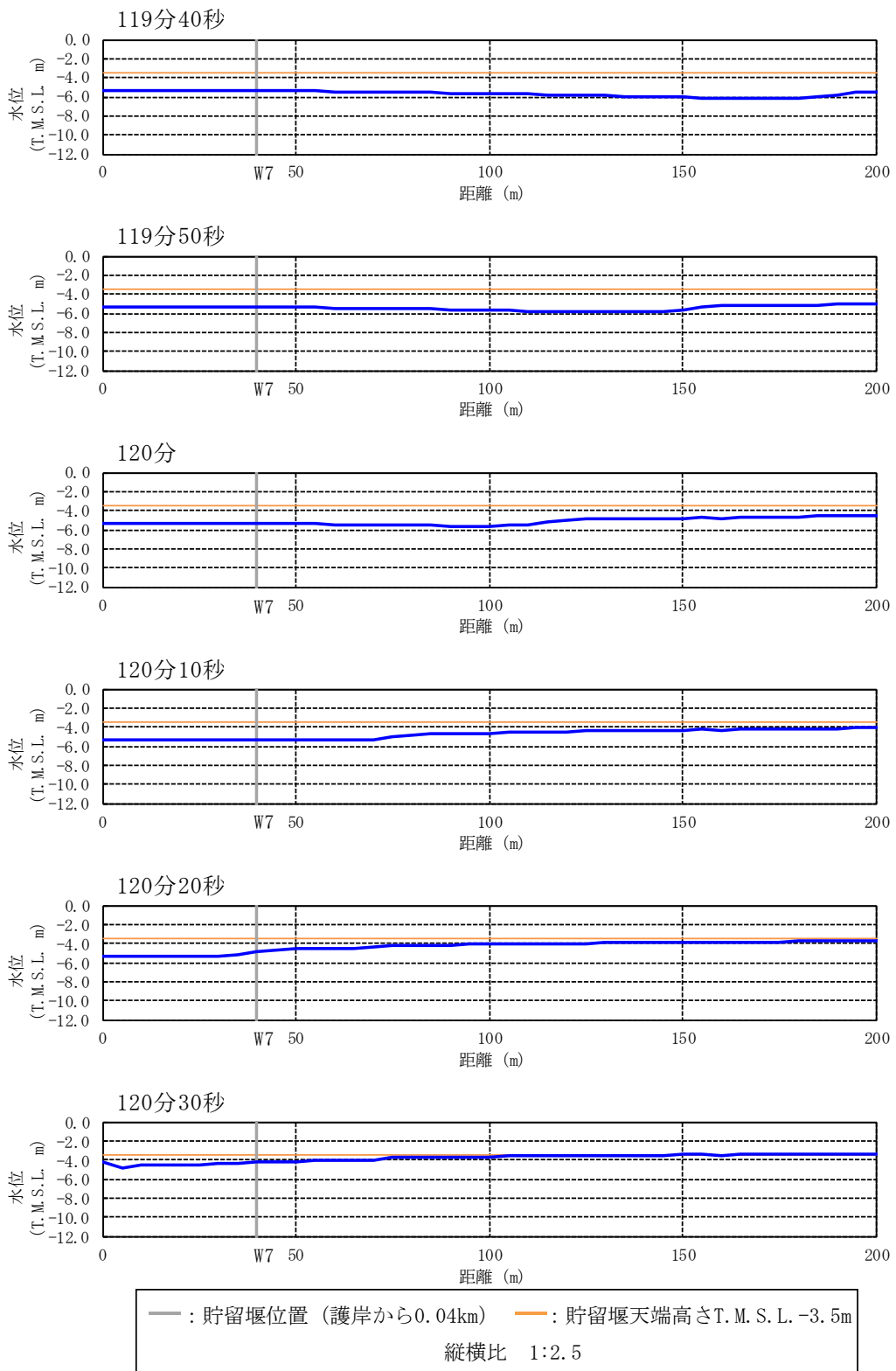


図 4.7 添 1-4.4-21 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2)
[119 分 40 秒-120 分 30 秒, 0-200m を拡大]

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。

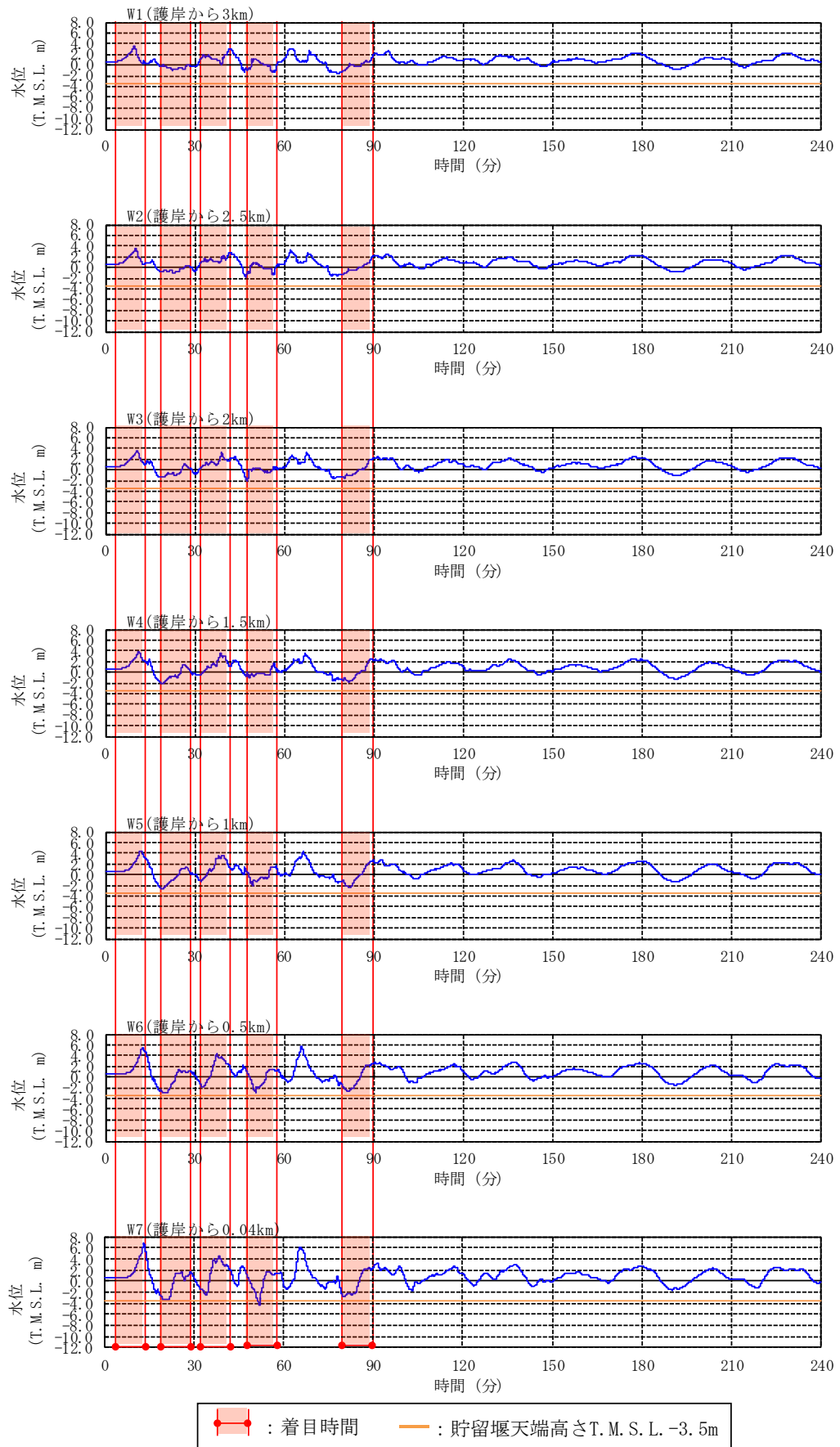


図 4.7 添 1-4.4-22 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [0-240 分]

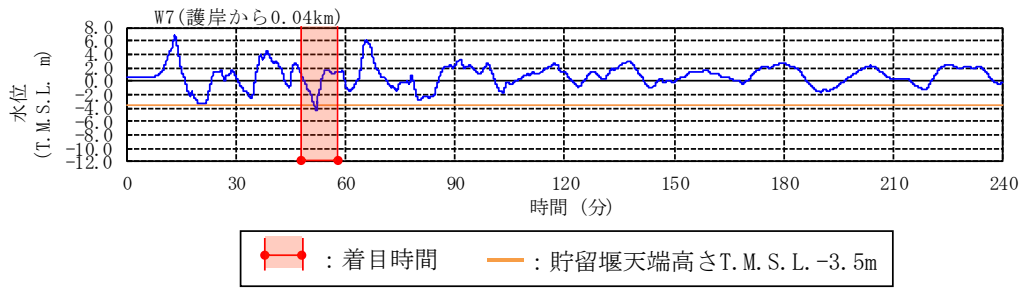


図 4.7 添 1-4.4-23 水位時刻歴波形の着目時間範囲 (基準津波 3)

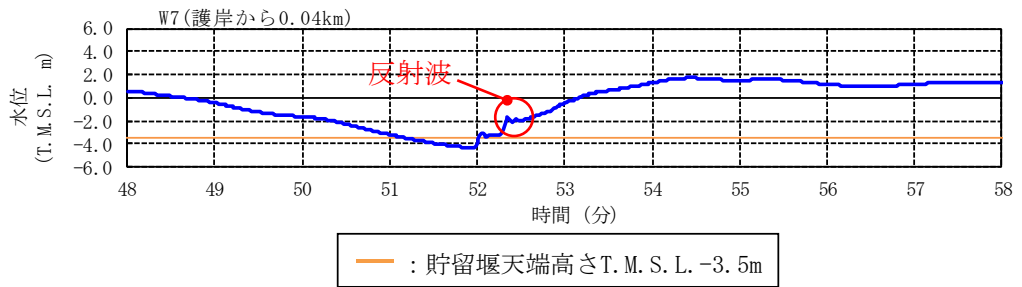


図 4.7 添 1-4.4-24 水位時刻歴波形 (基準津波 3) [48-58 分を拡大]

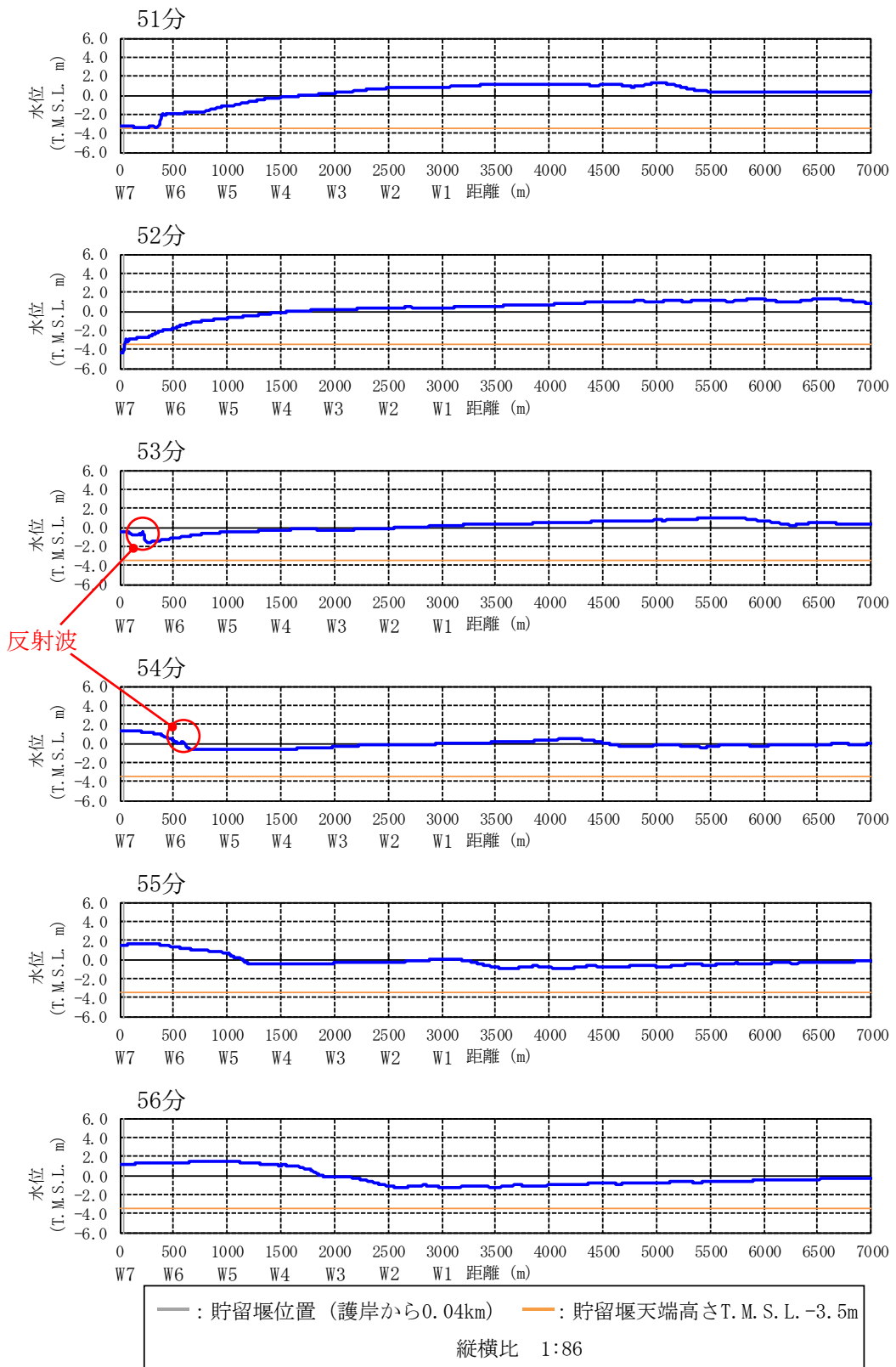


図 4.7 添 1-4.4-25 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分]

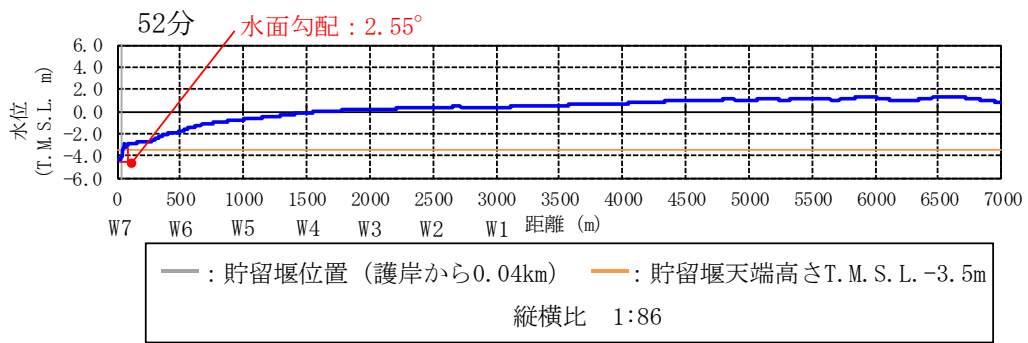


図 4.7 添 1-4.4-26 水位の空間分布と最大水面勾配（基準津波 3，52 分時点）

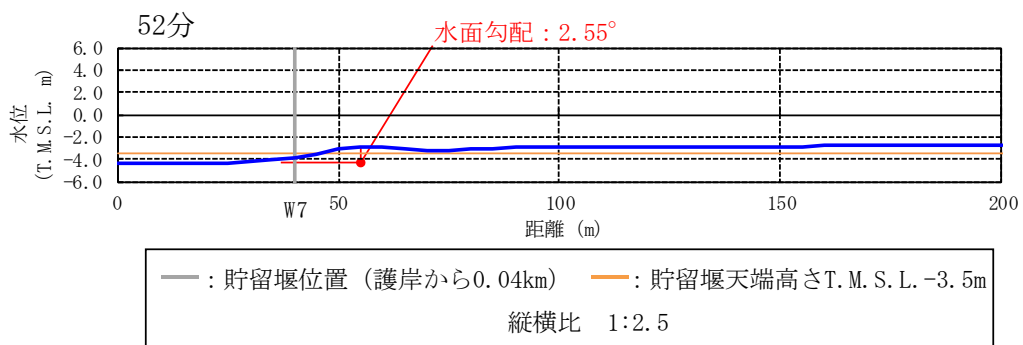


図 4.7 添 1-4.4-27 水位の空間分布（基準津波 3，52 分時点）[0-200m を拡大]

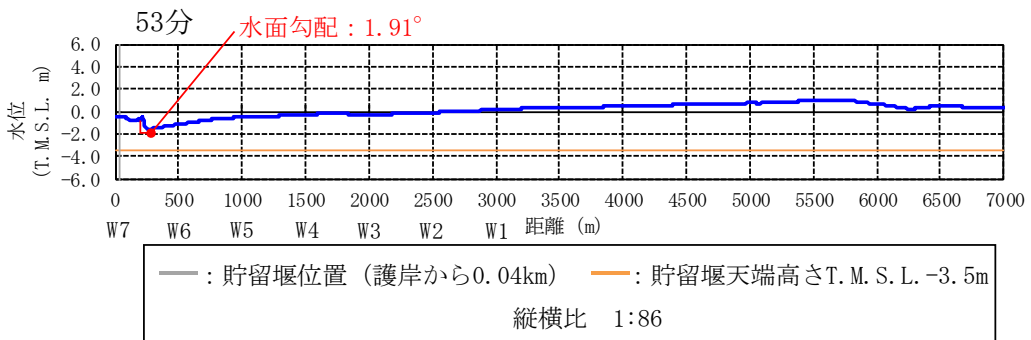


図 4.7 添 1-4.4-28 水位の空間分布と最大水面勾配（基準津波 3，53 分時点）

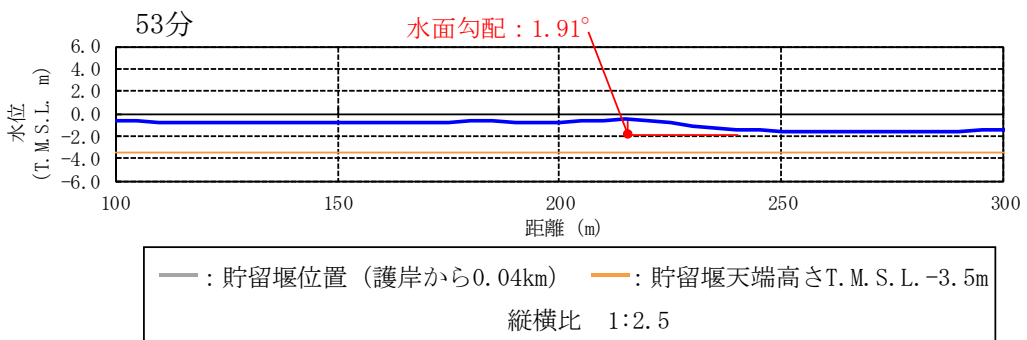


図 4.7 添 1-4.4-29 水位の空間分布（基準津波 3，53 分時点）[100-300m を拡大]

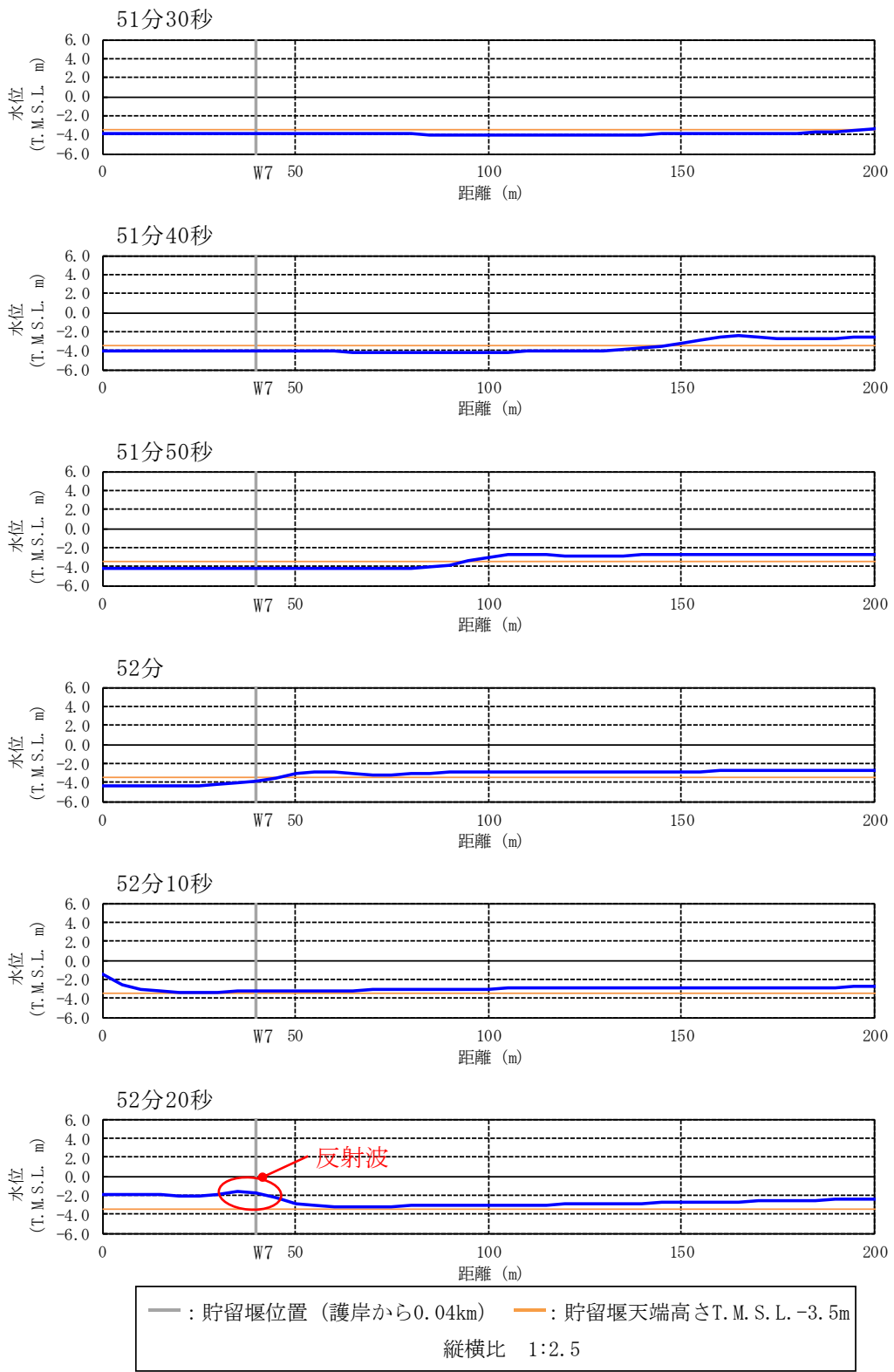


図 4.7 添 1-4.4-30 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3)
[51 分 30 秒-52 分 20 秒, 0-200m を拡大]

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

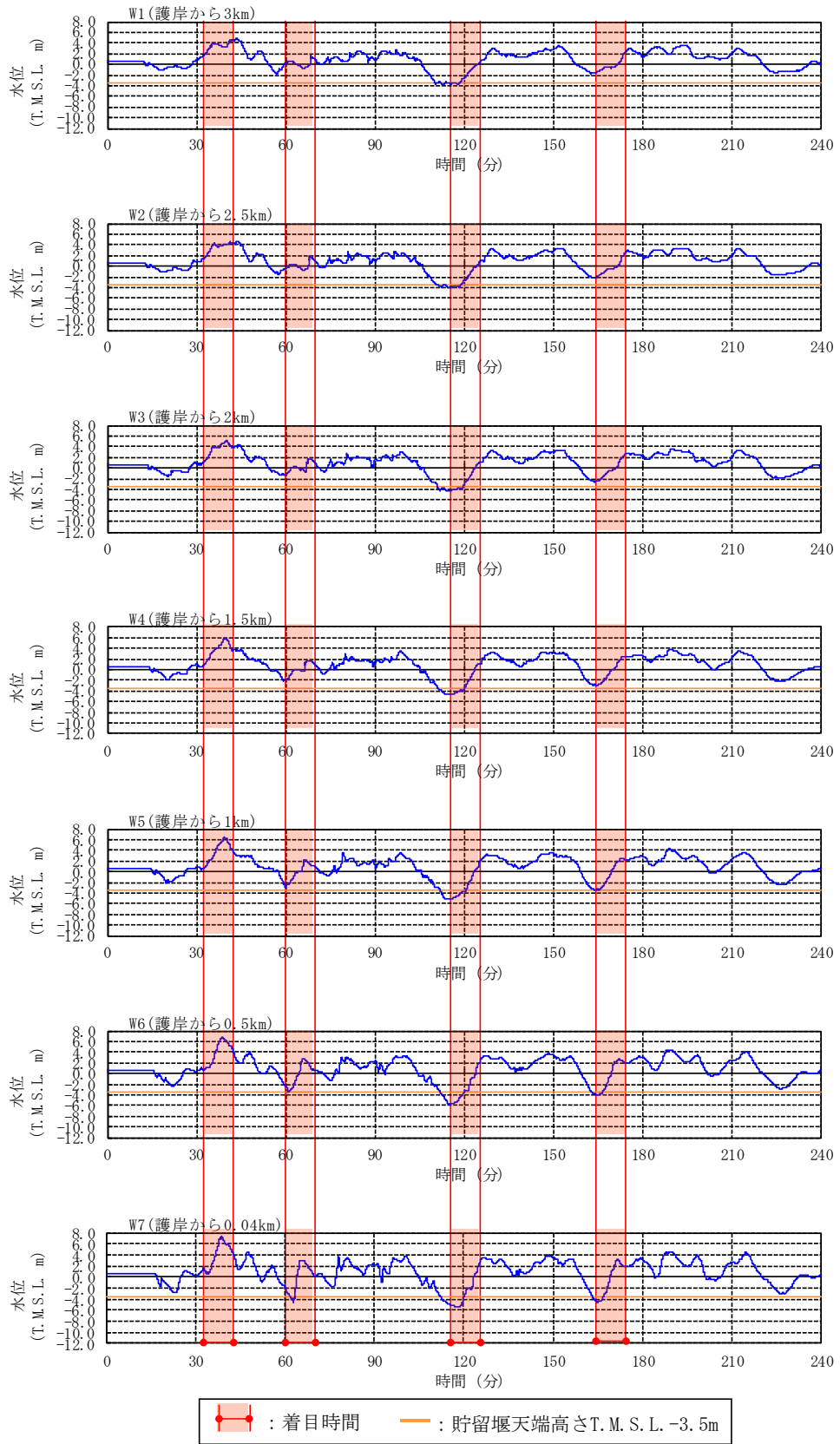


図 4.7 参 1-1 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [0-240 分]

b. 水位時刻歴波形(着目時間の拡大)

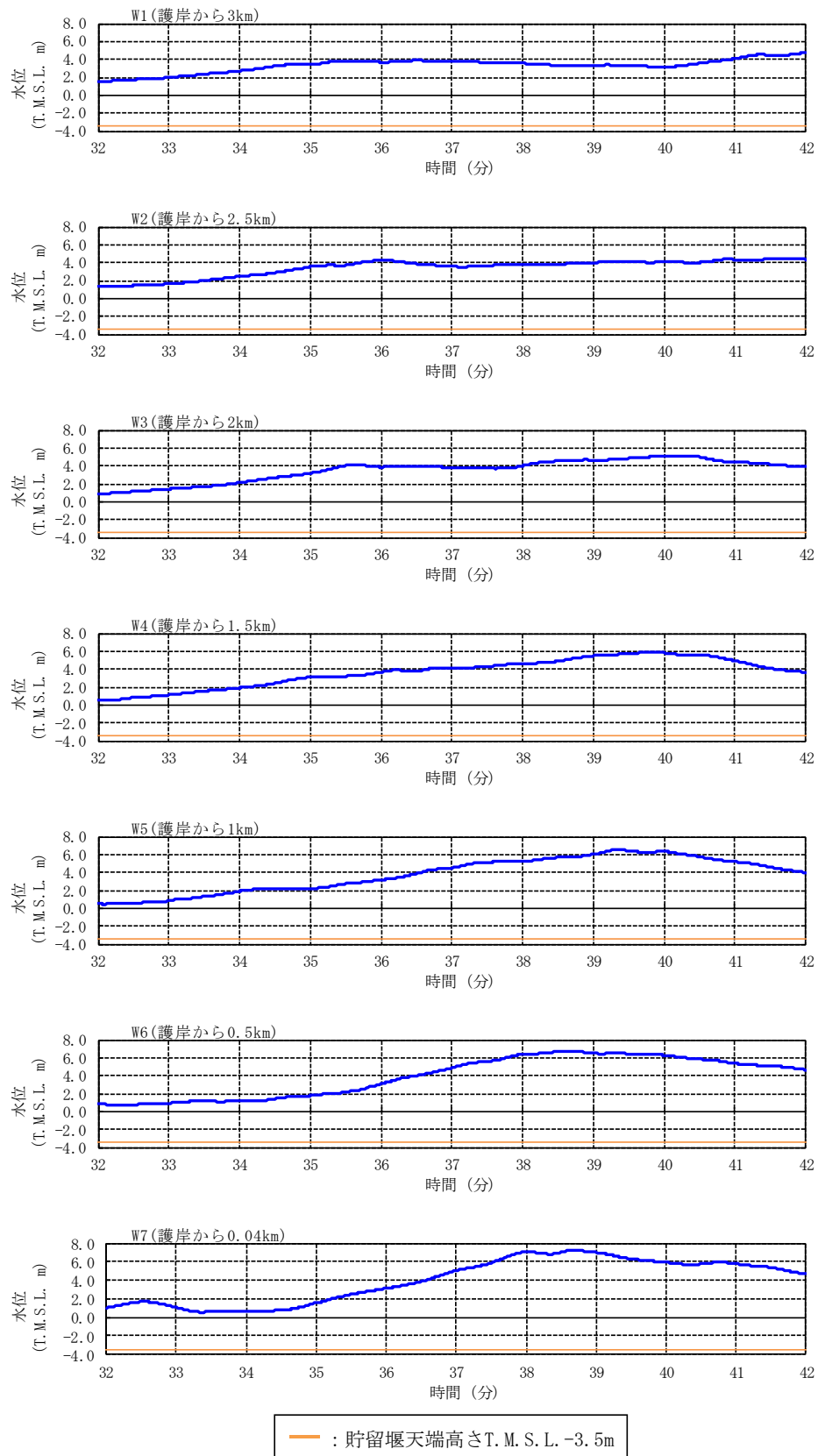


図 4.7 参 1-2 出力点ごとの水位時刻歴波形(基準津波 1) [32-42 分を拡大]

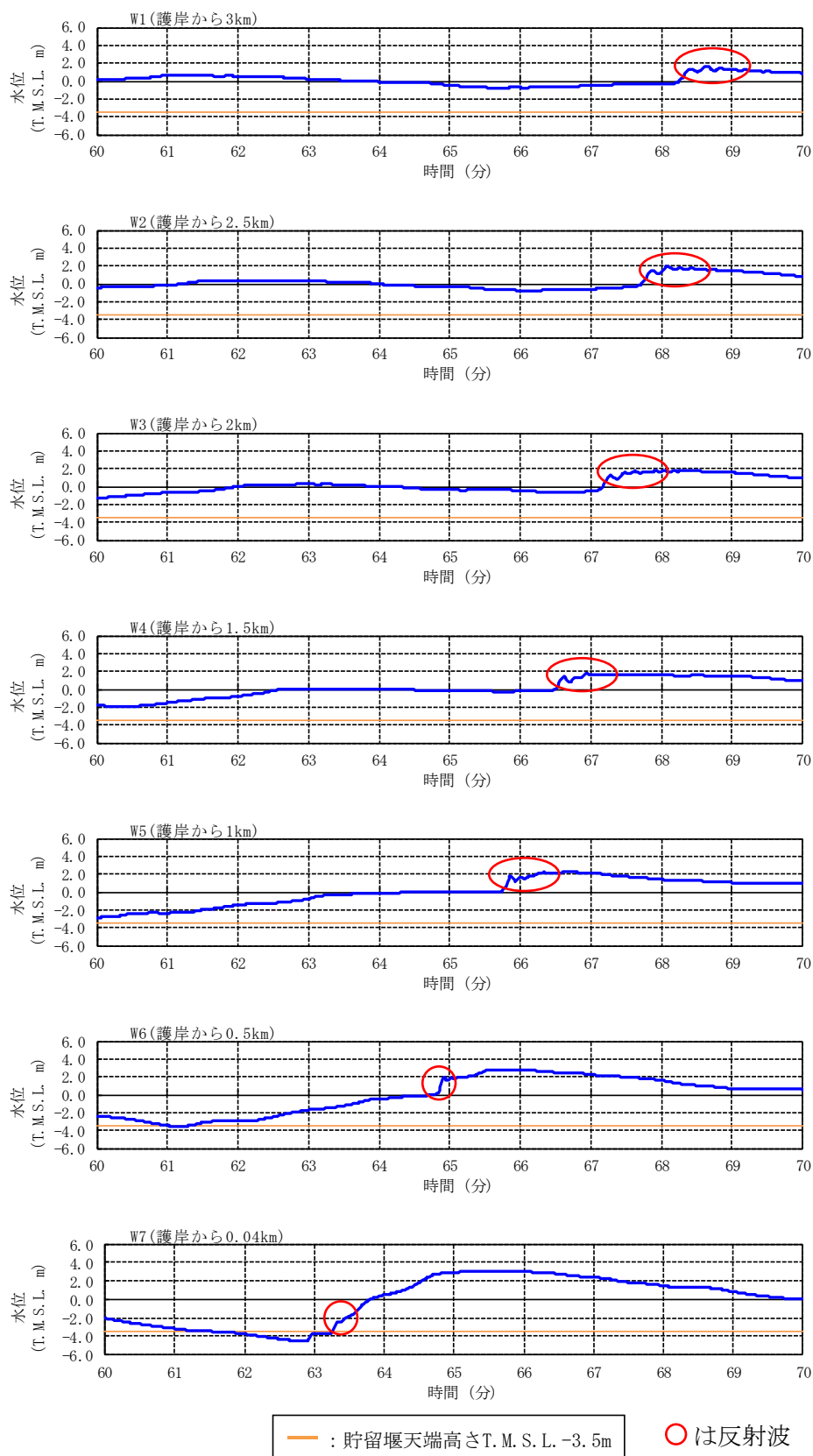


図 4.7 参 1-3 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [60-70 分を拡大]

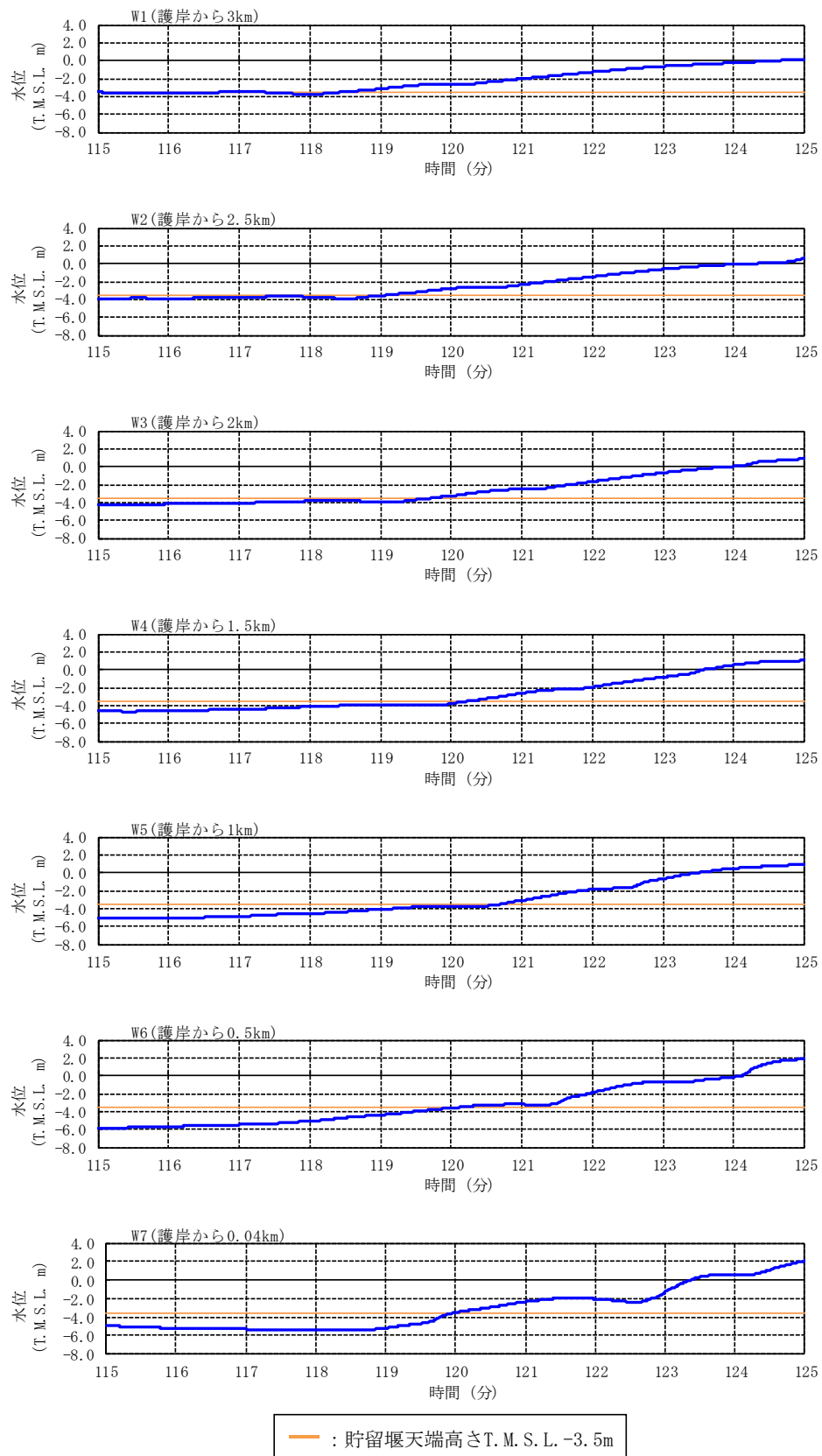


図 4.7 参 1-4 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [115-125 分を拡大]

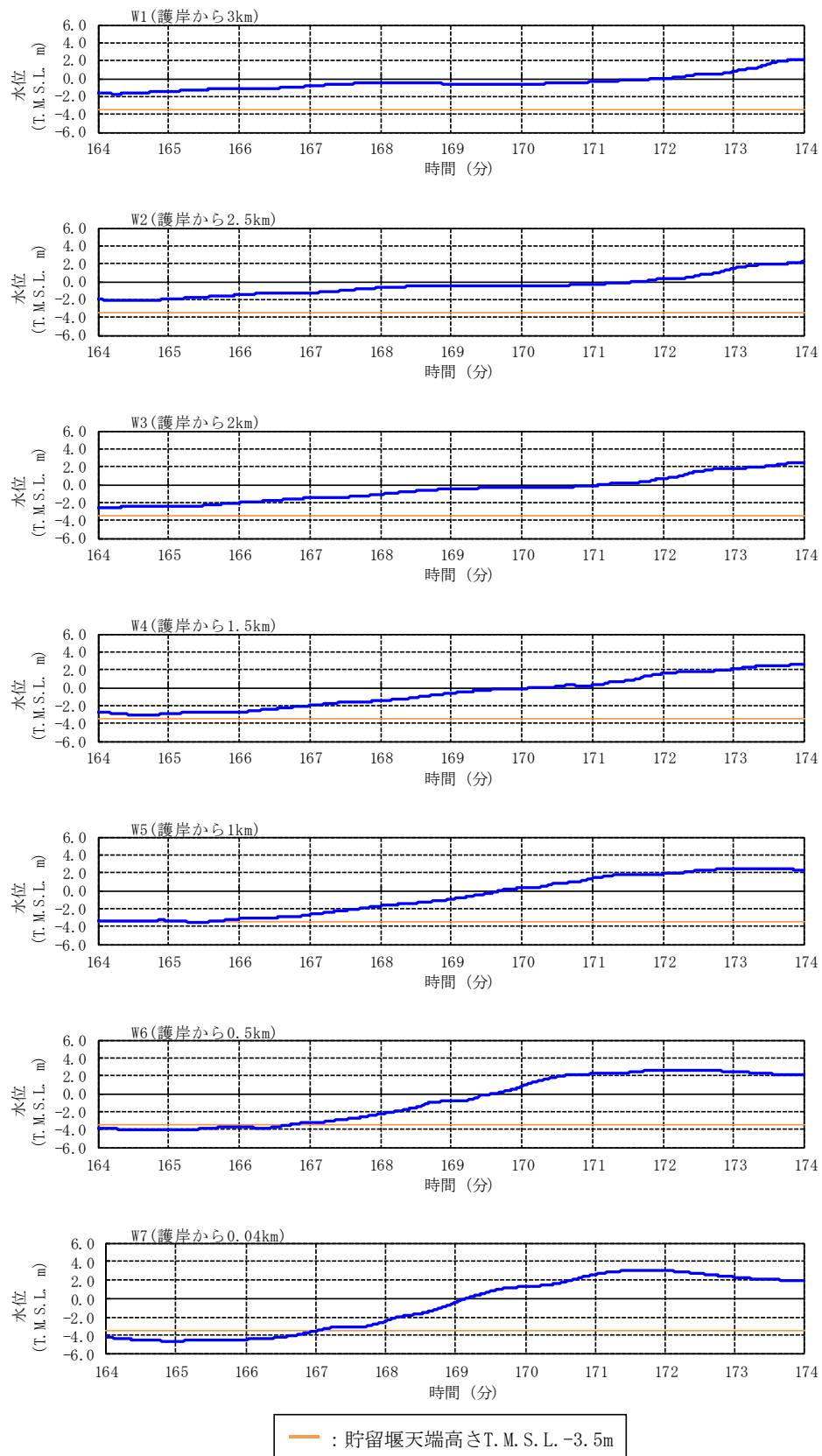


図 4.7 参 1-5 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 1) [164-174 分を拡大]

c. 着目時間別の水位の空間分布
 (1) 全景

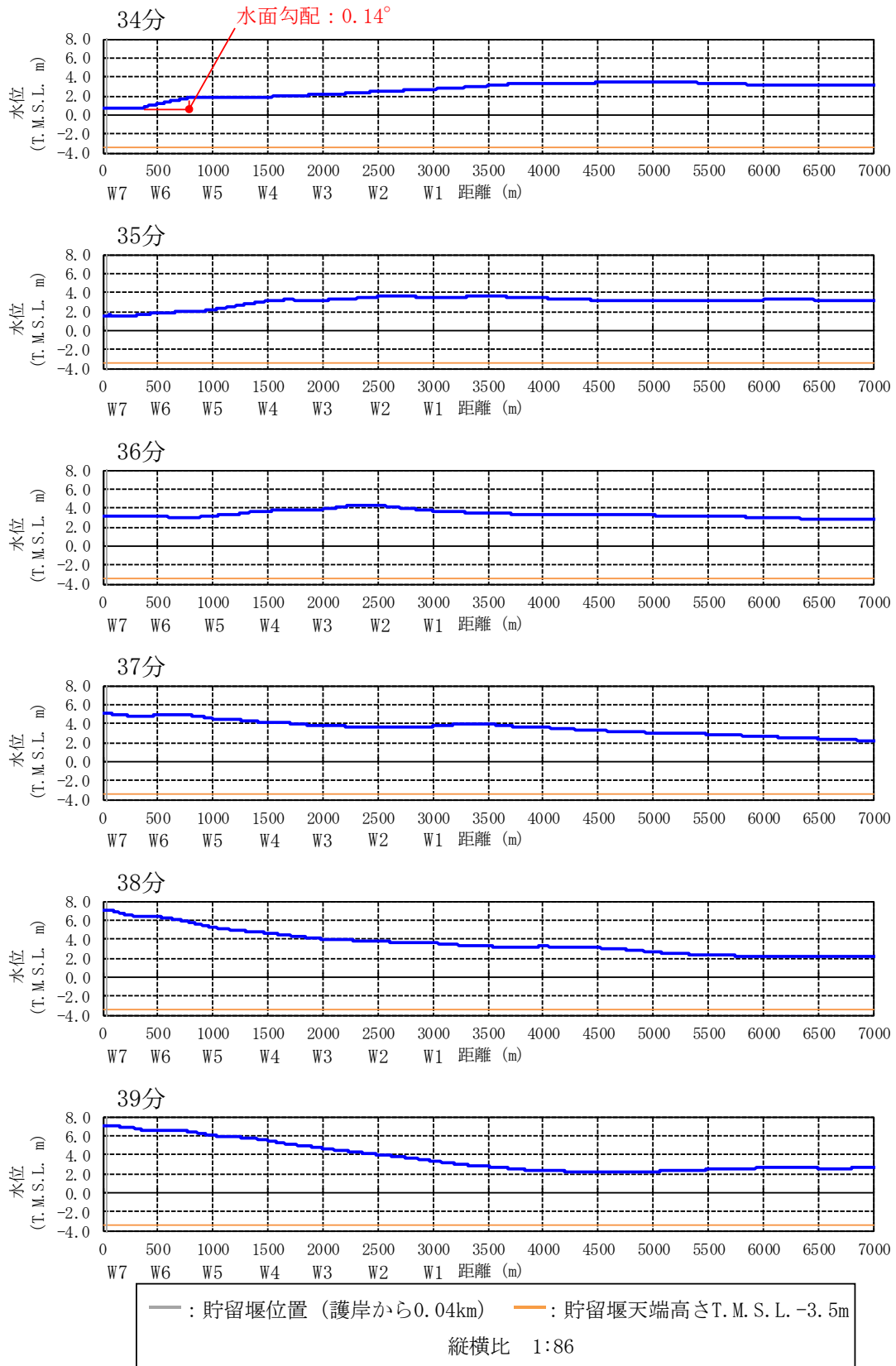


図 4.7 参 1-6 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [34-39 分]

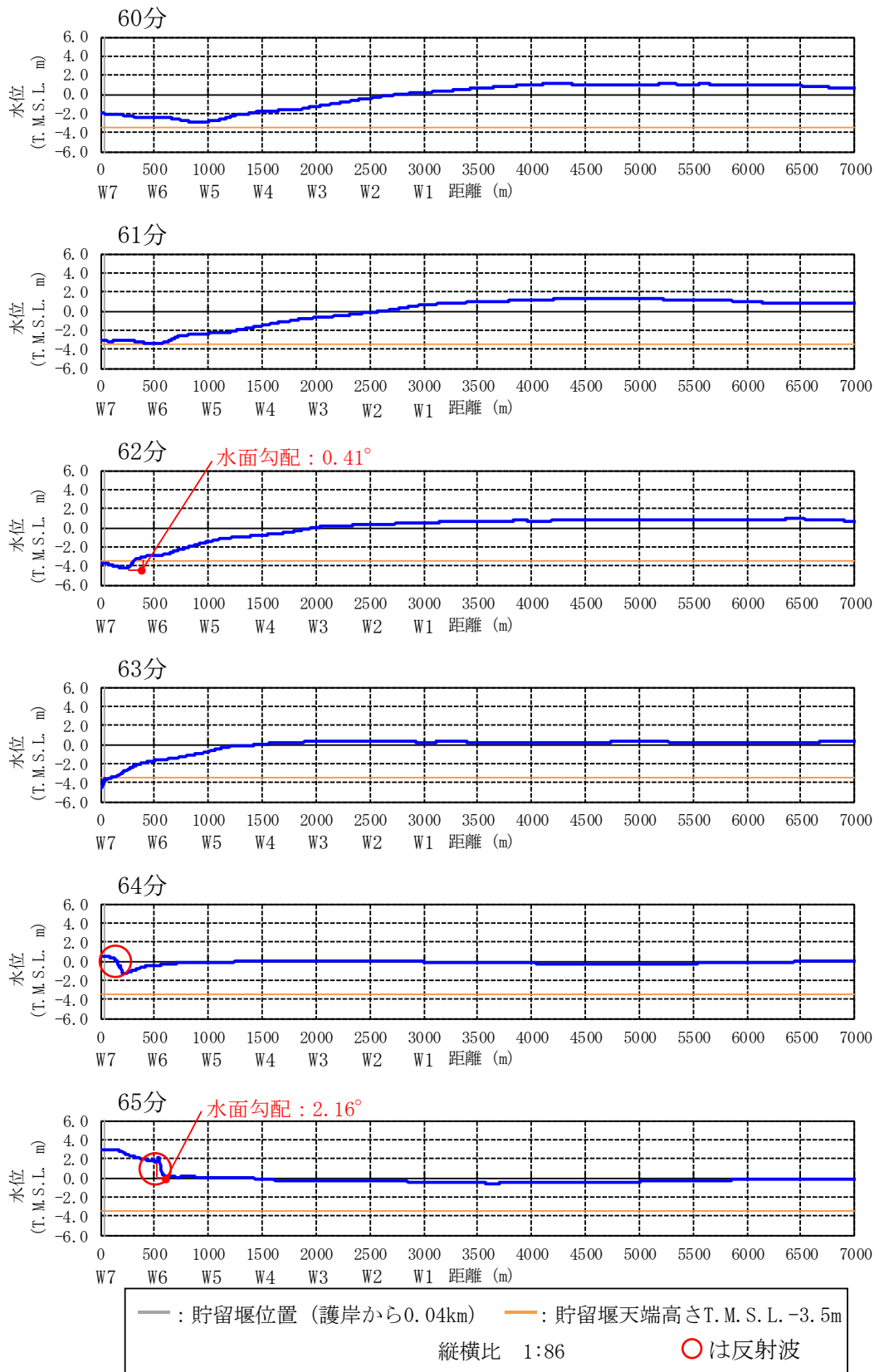


図 4.7 参 1-7 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [60-65 分]

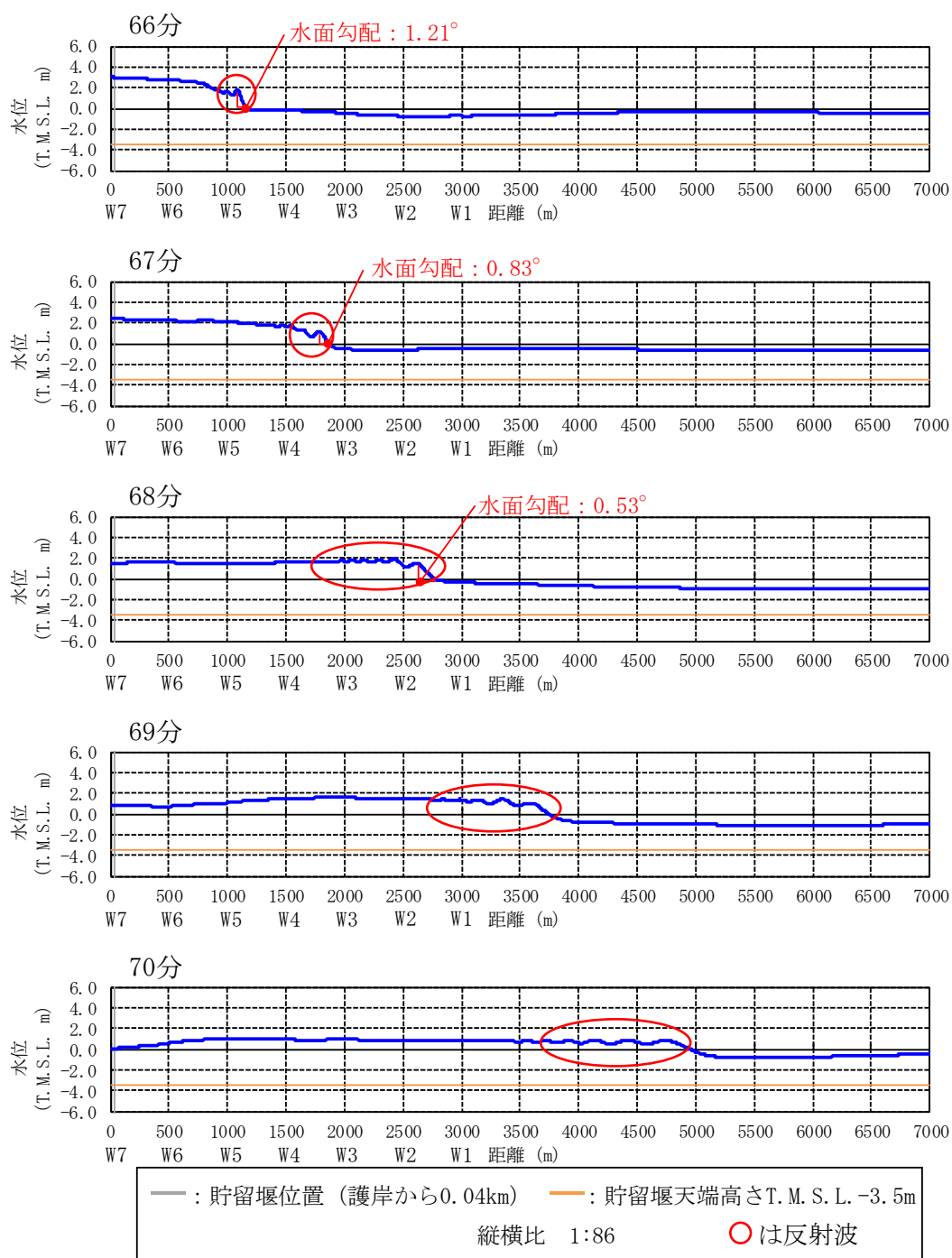


図 4.7 参 1-8 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [66-70 分]

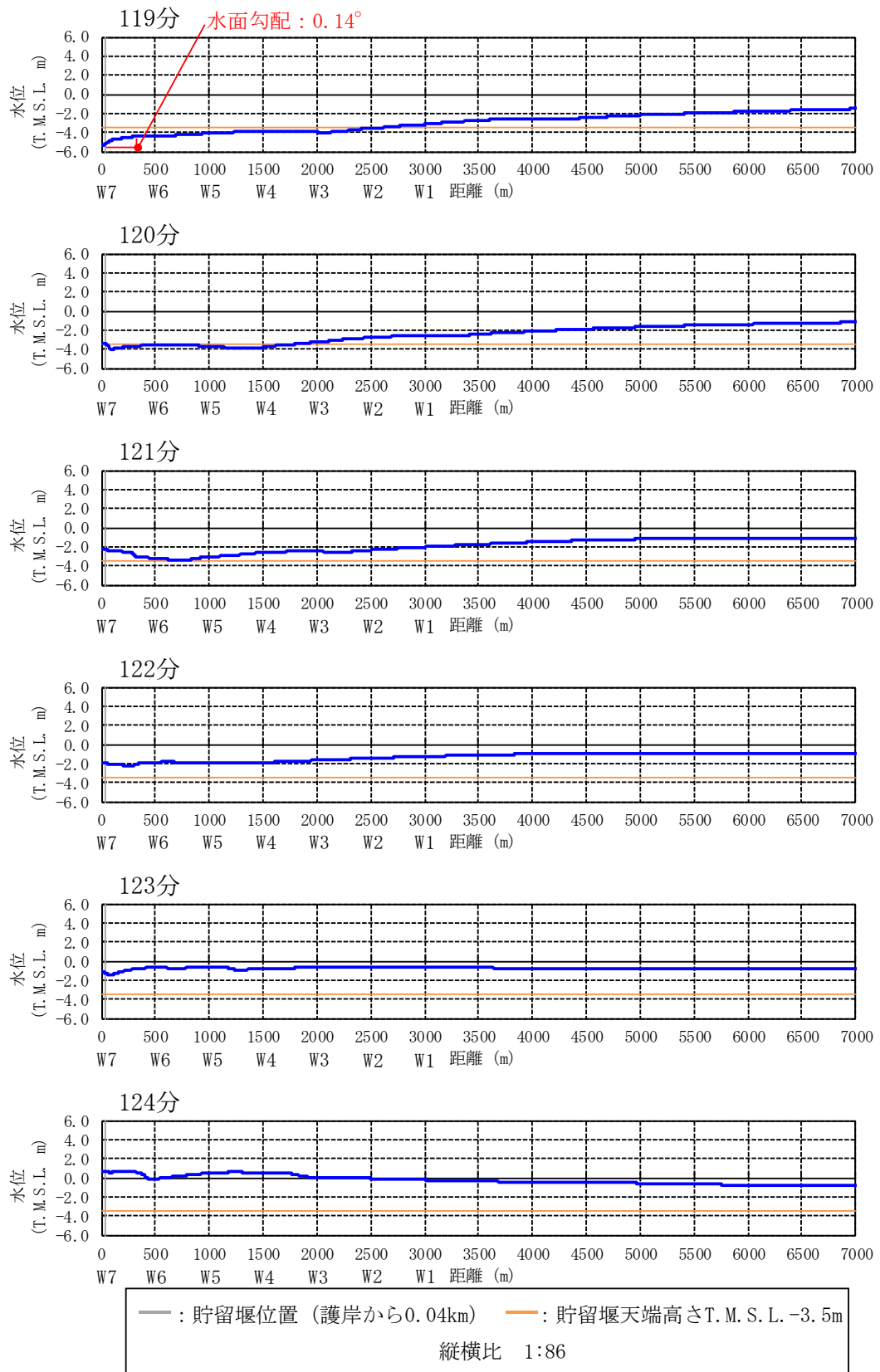


図 4.7 参 1-9 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [119-124 分]

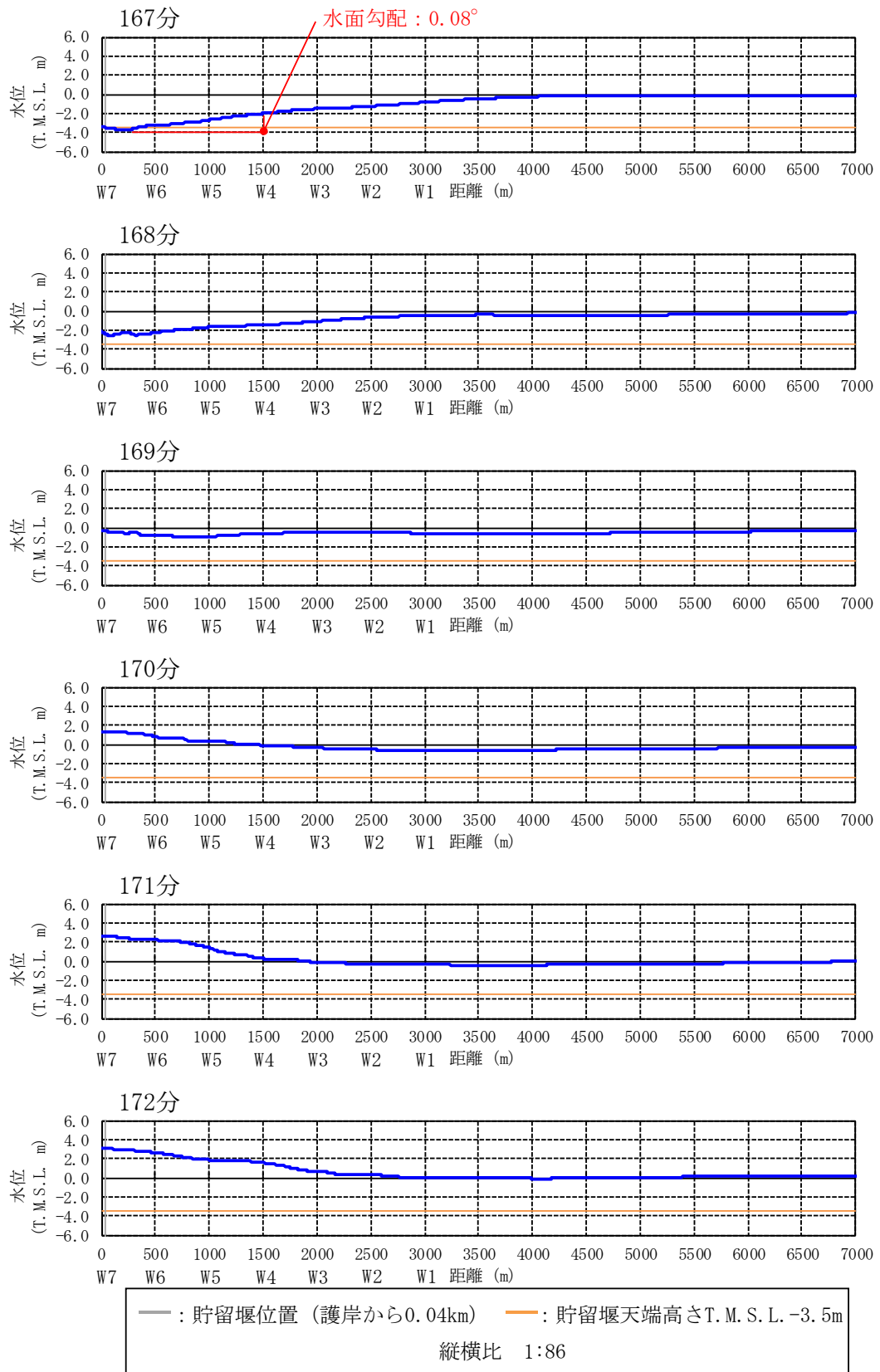


図 4.7 参 1-10 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [167-172 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

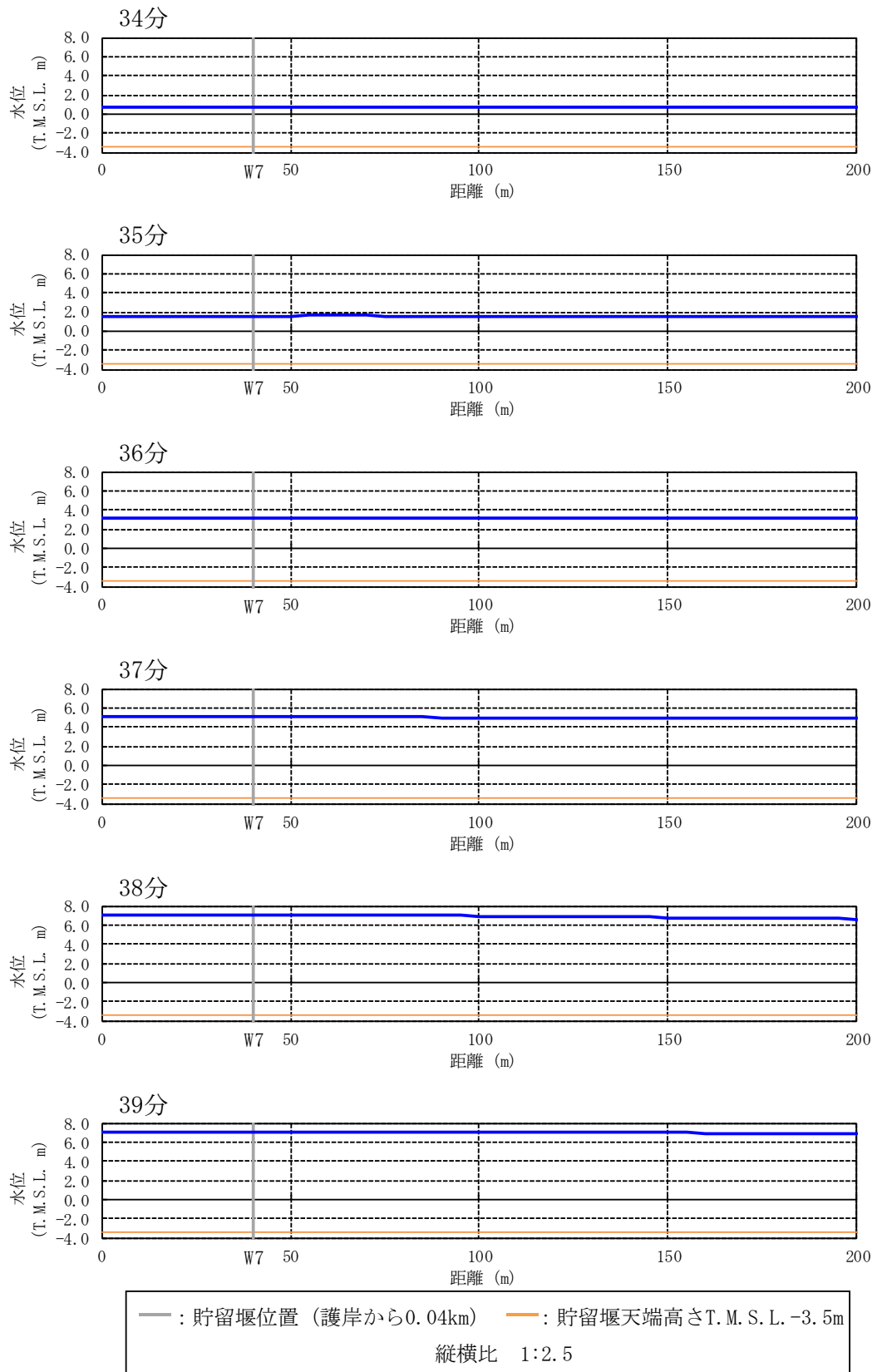


図 4.7 参 1-11 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [34-39 分, 0-200m を拡大]

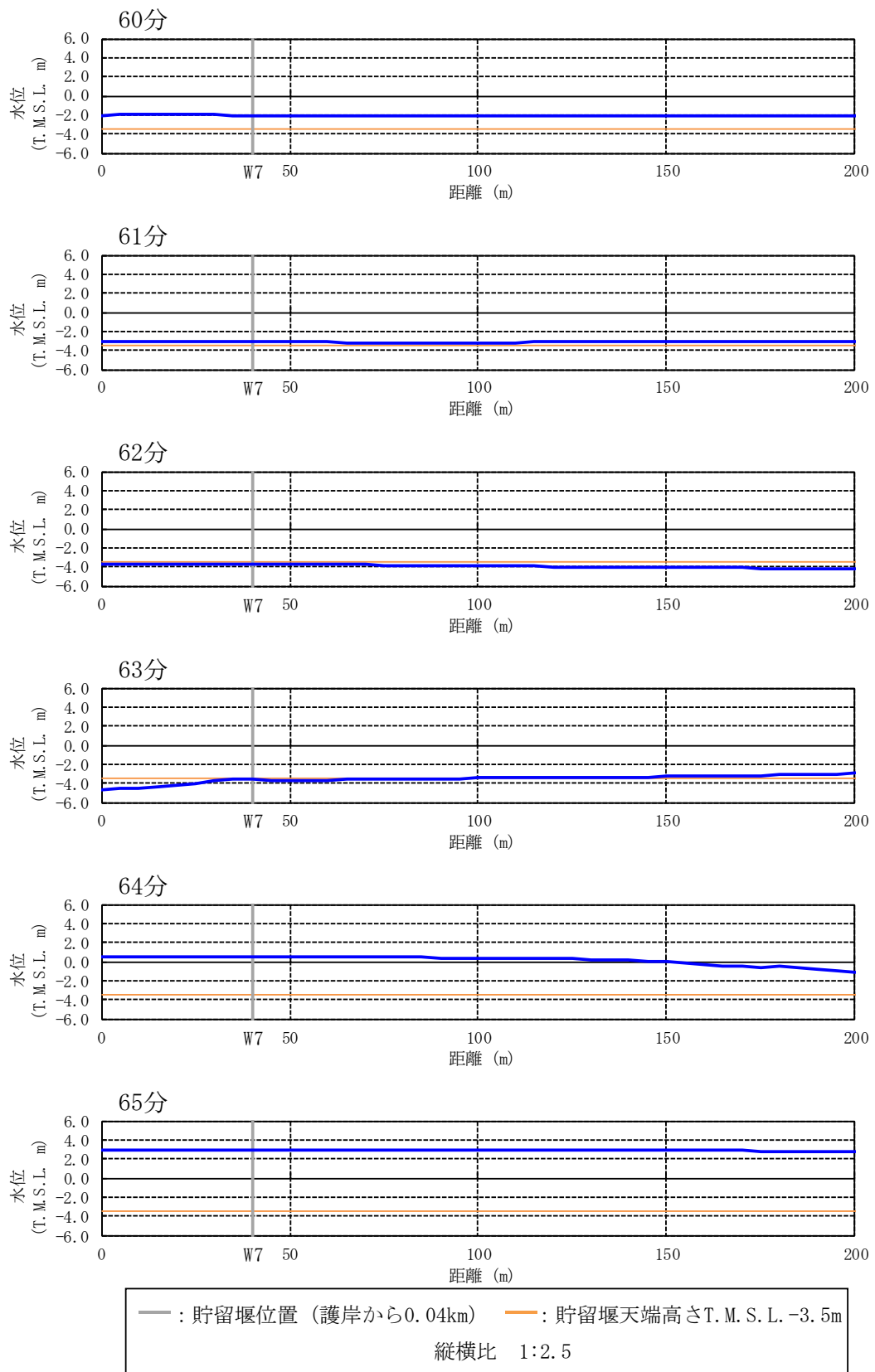


図 4.7 参 1-12 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [60-65 分, 0-200m を拡大]

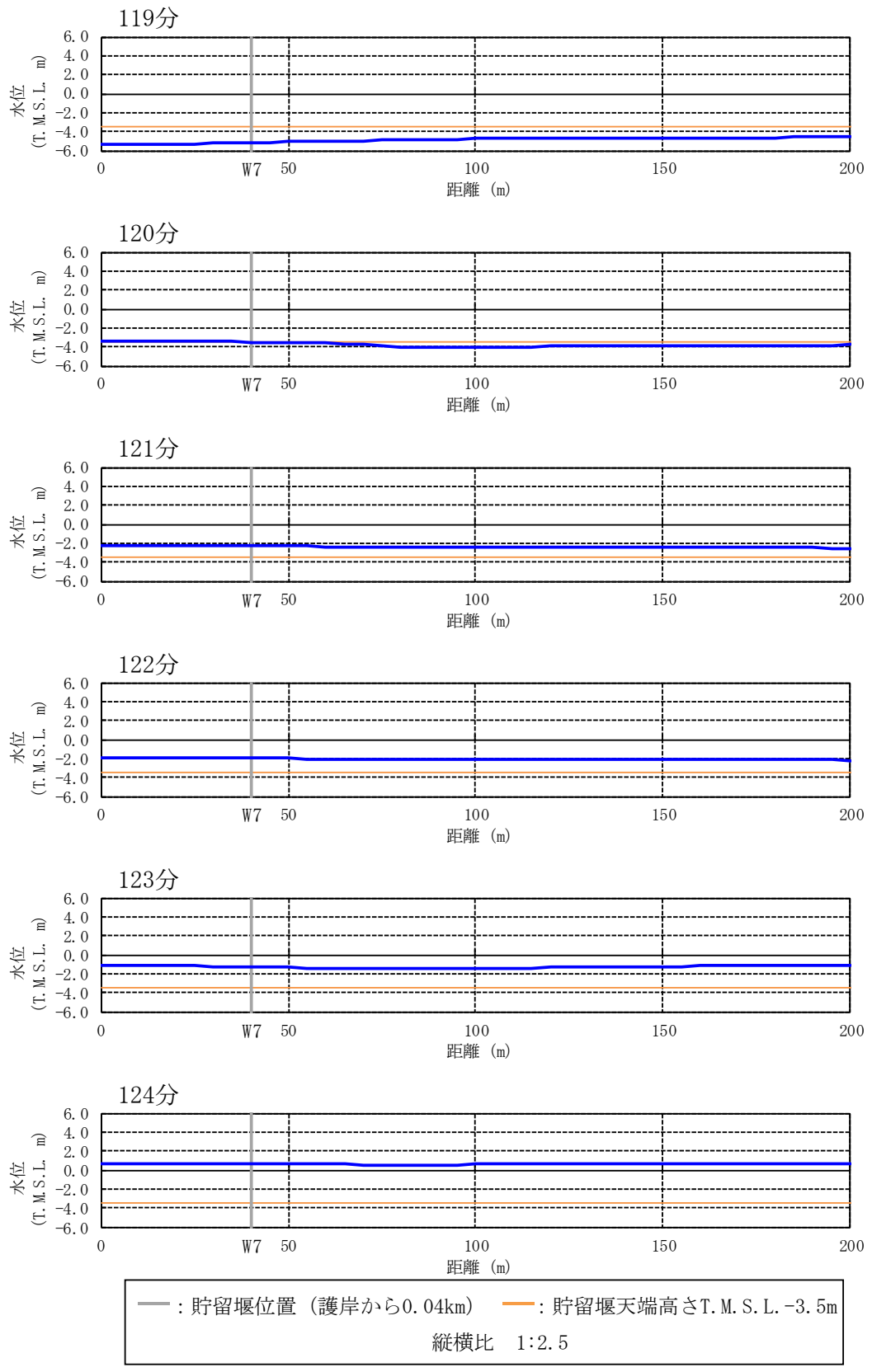


図 4.7 参 1-13 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [119-124 分, 0-200m を拡大]

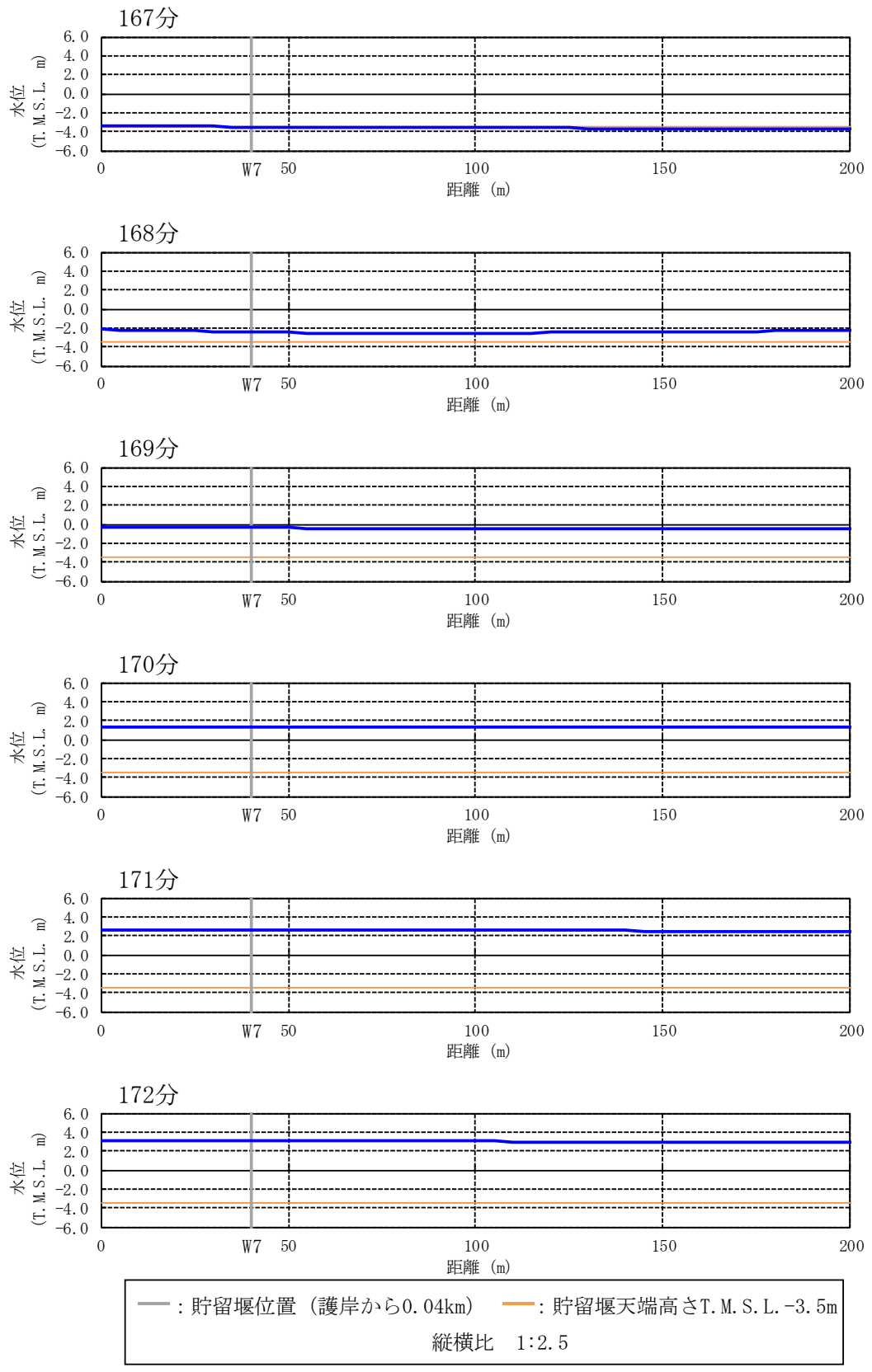


図 4.7 参 1-14 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 1) [167-172 分, 0-200m を拡大]

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

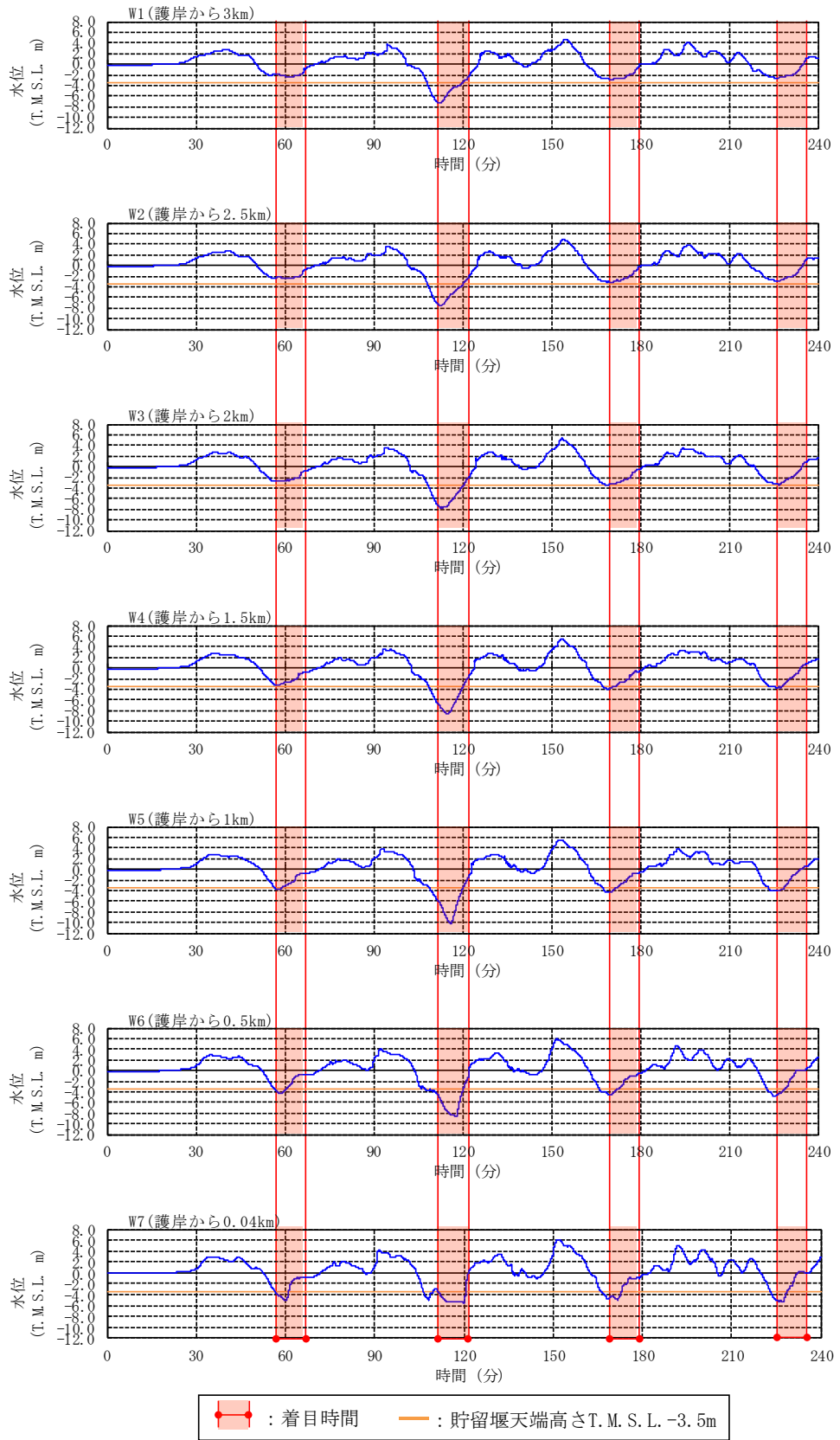


図 4.7 参 1-15 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [0-240 分]

b. 水位時刻歴波形(着目時間の拡大)

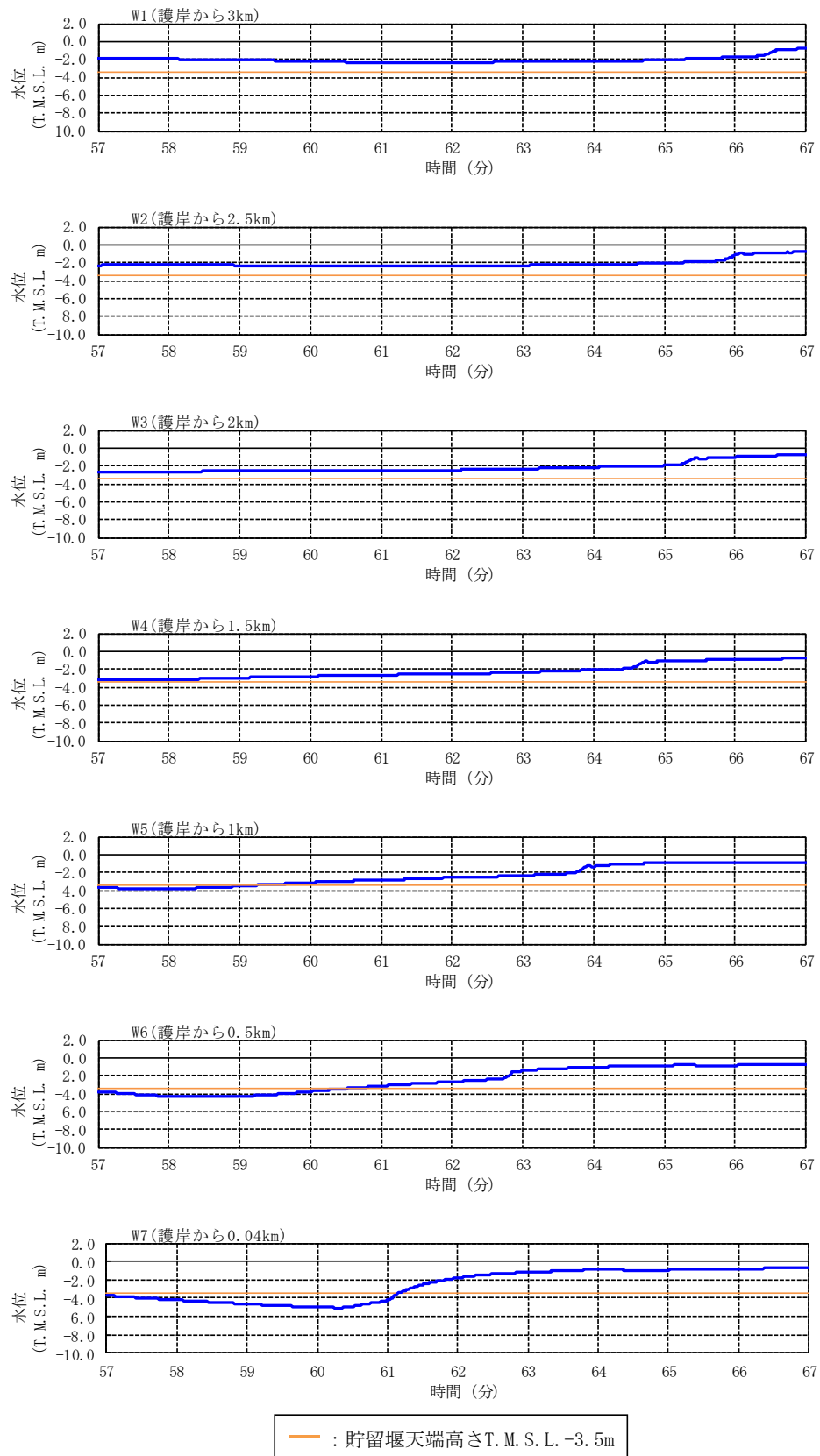


図 4.7 参 1-16 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [57-67 分を拡大]

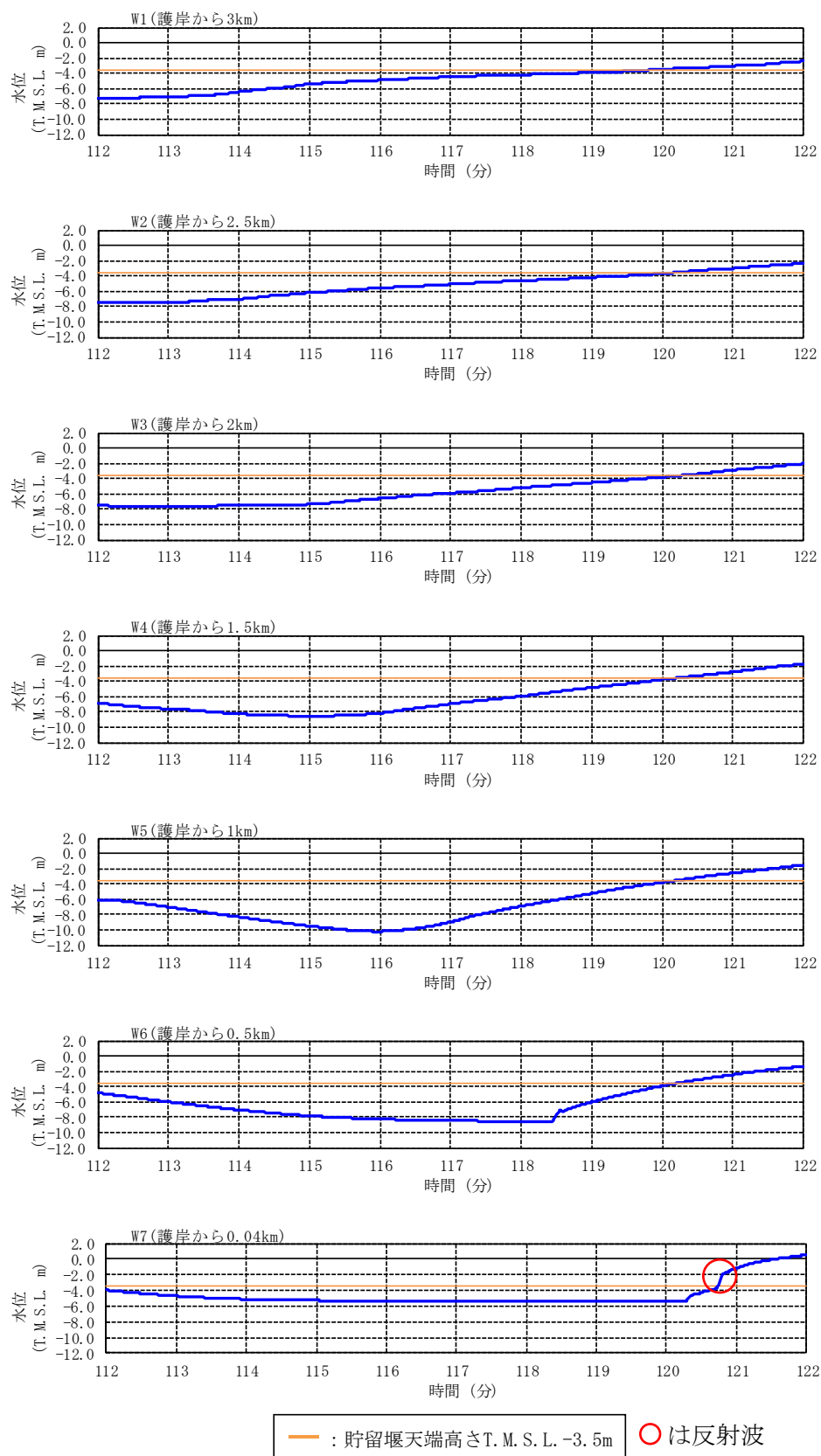


図 4.7 参 1-17 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [112-122 分を拡大]

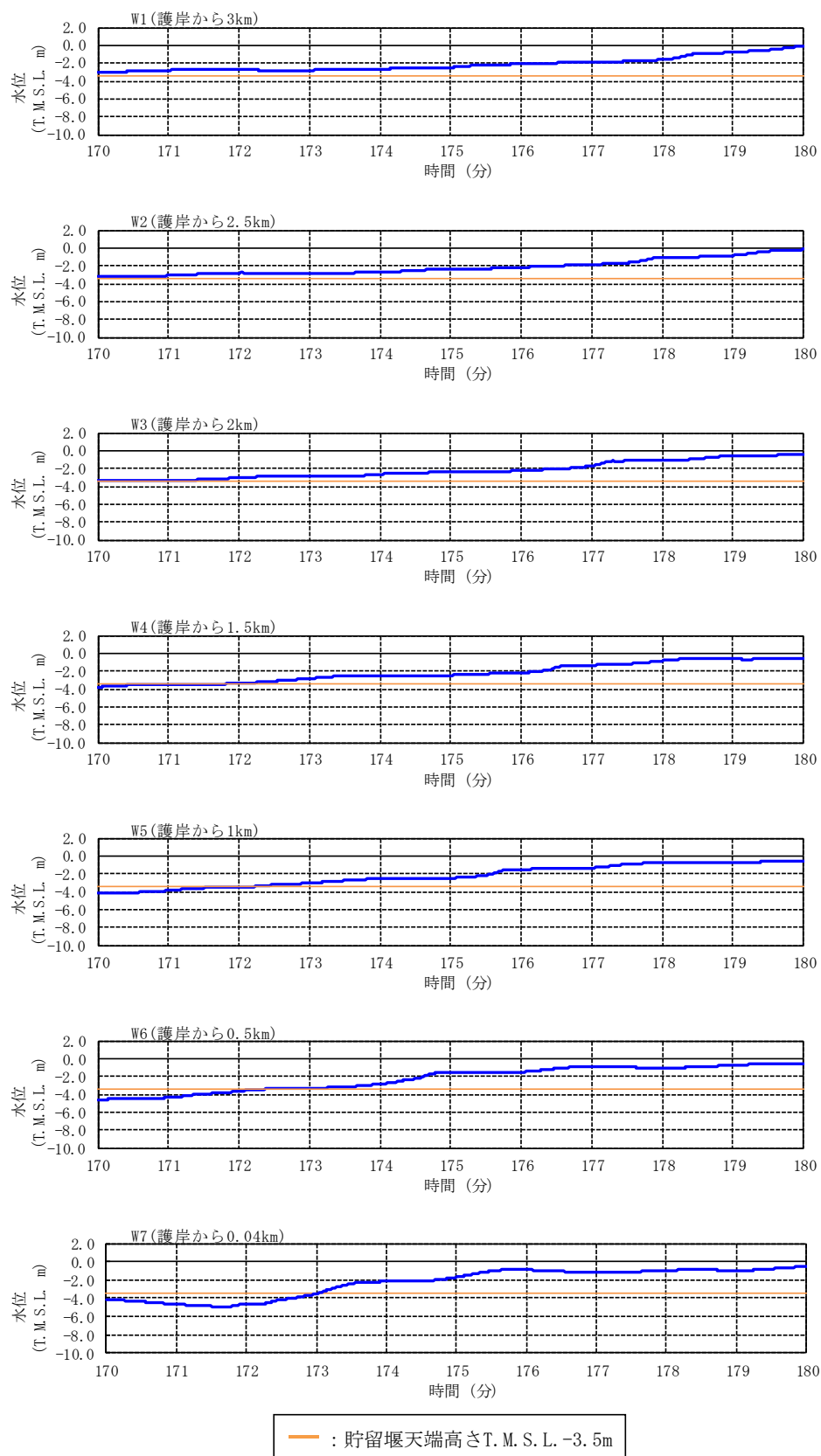


図 4.7 参 1-18 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [170-180 分を拡大]

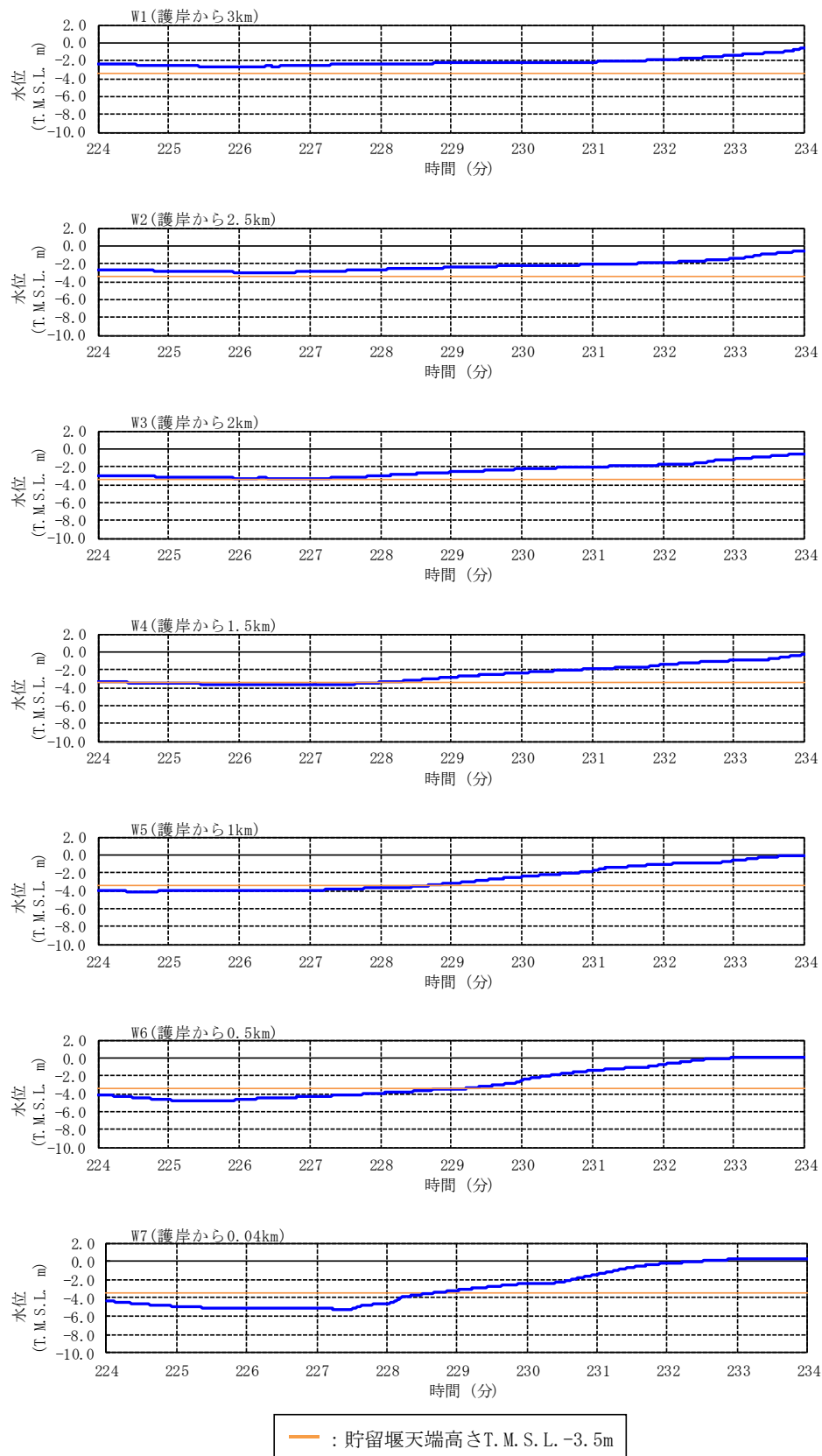


図 4.7 参 1-19 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 2) [224-234 分を拡大]

c. 着目時間別の水位の空間分布

(1) 全景

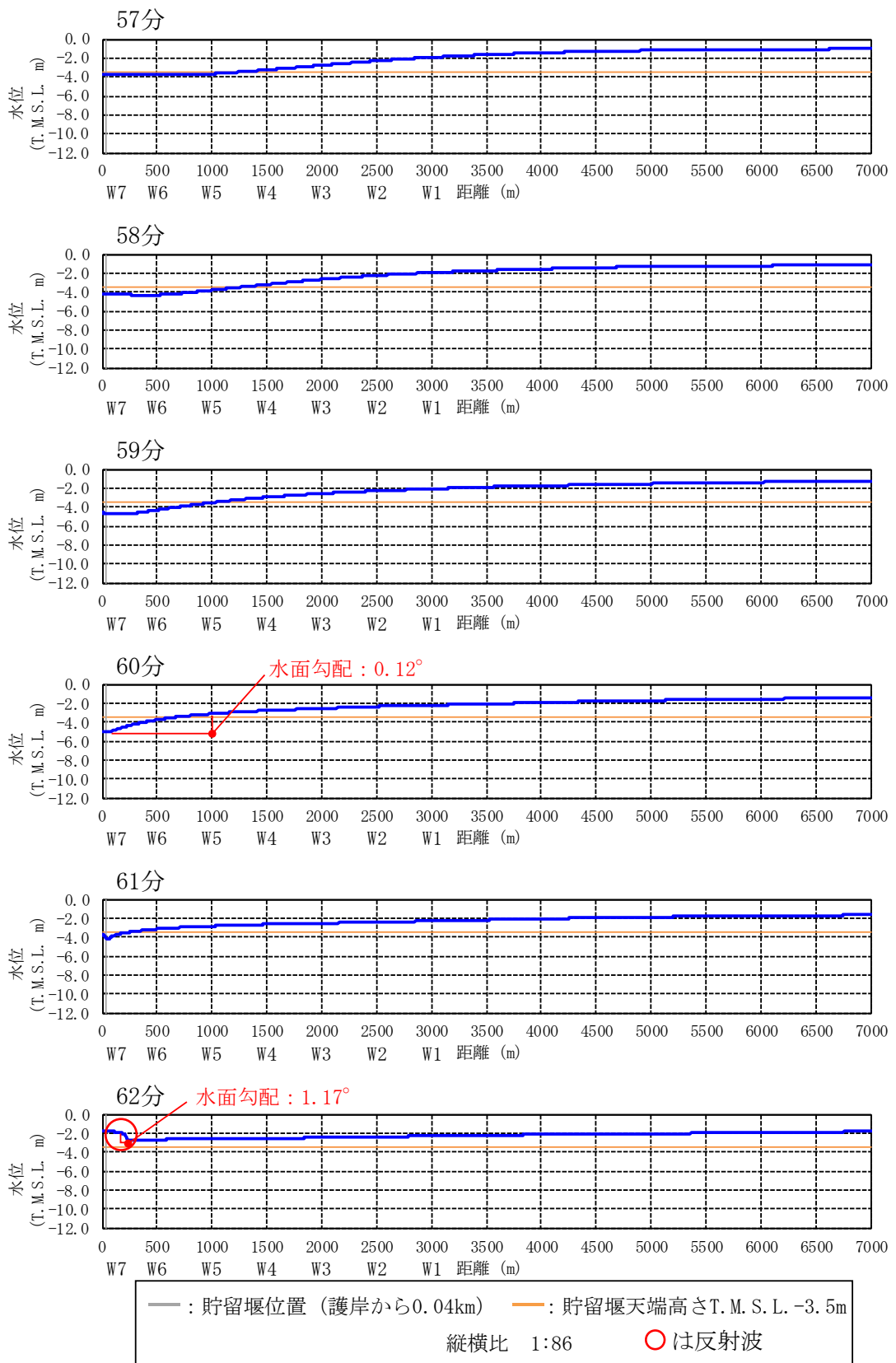


図 4.7 参 1-20 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [57-62 分]

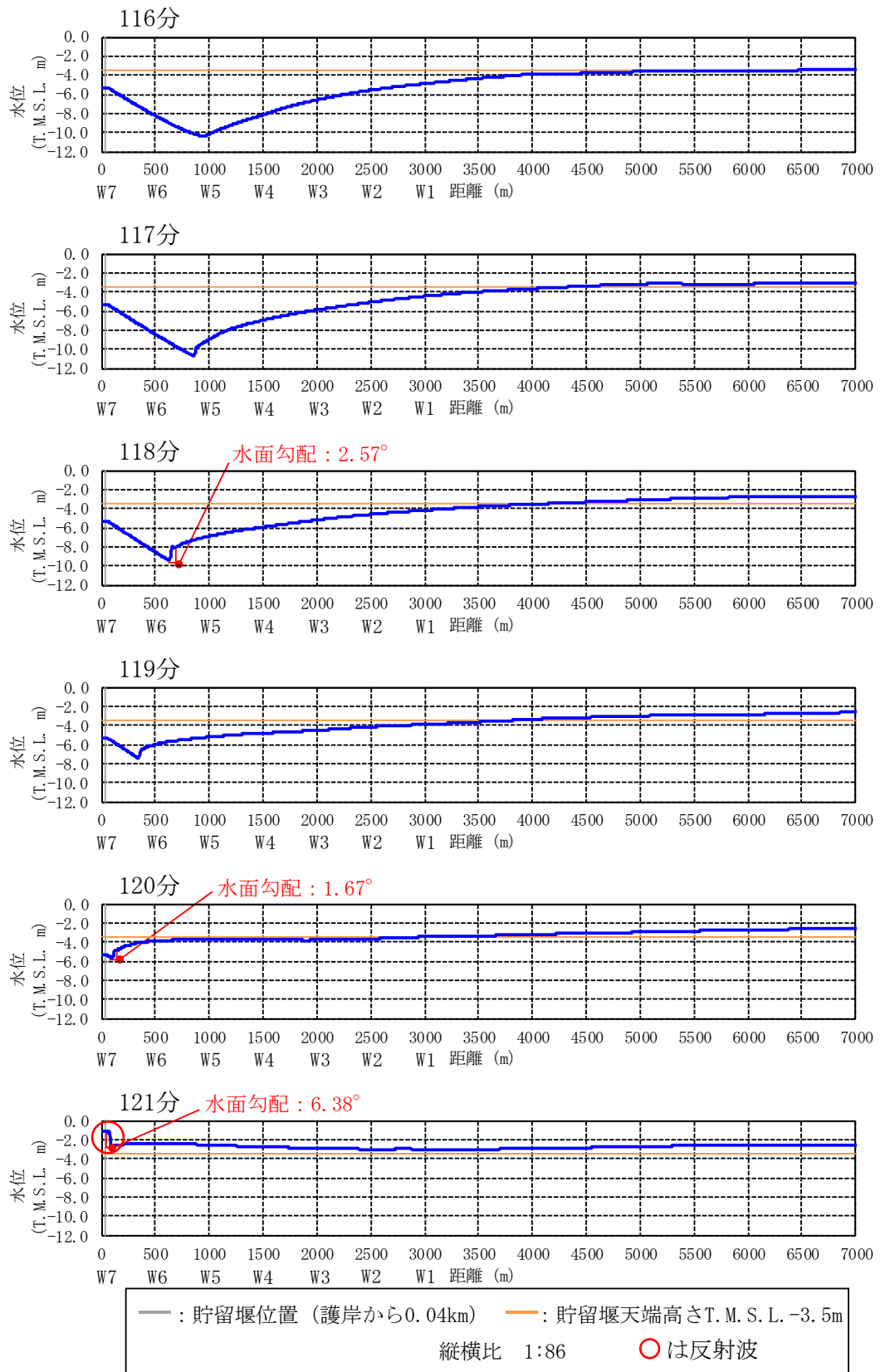


図 4.7 参 1-21 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [115-120 分]

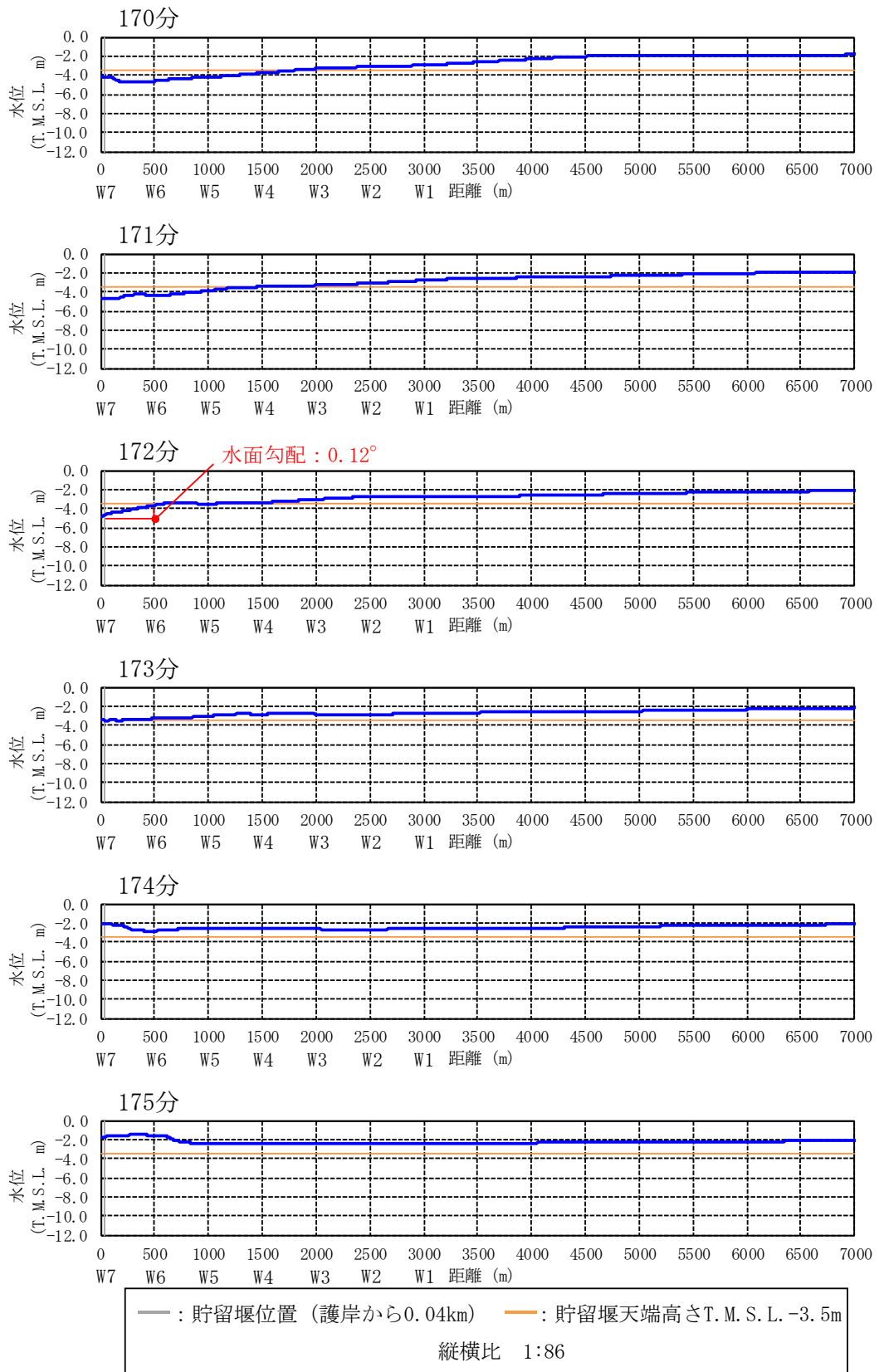


図 4.7 参 1-22 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [170-175 分]

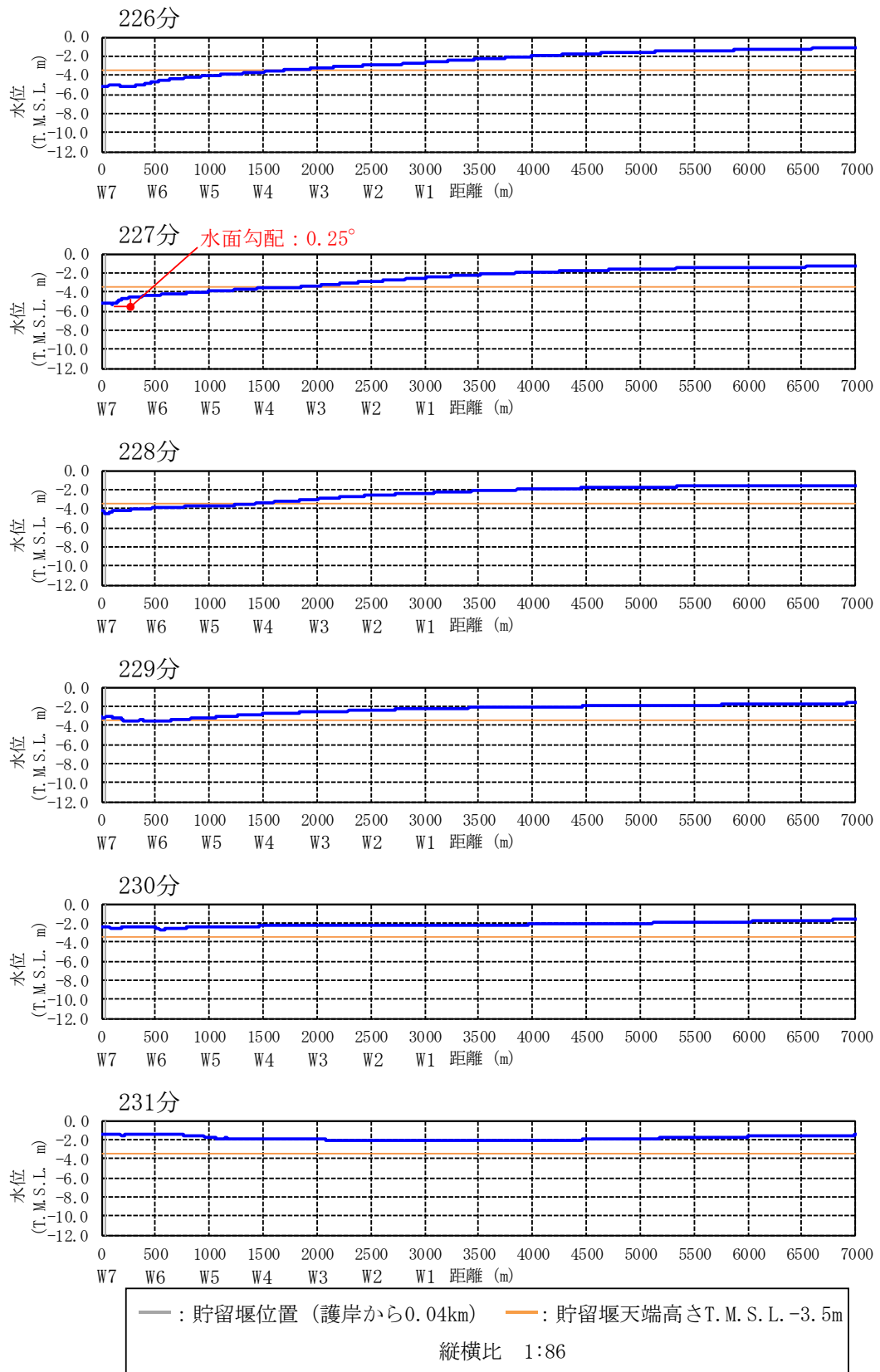


図 4.7 参 1-23 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [226-231 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

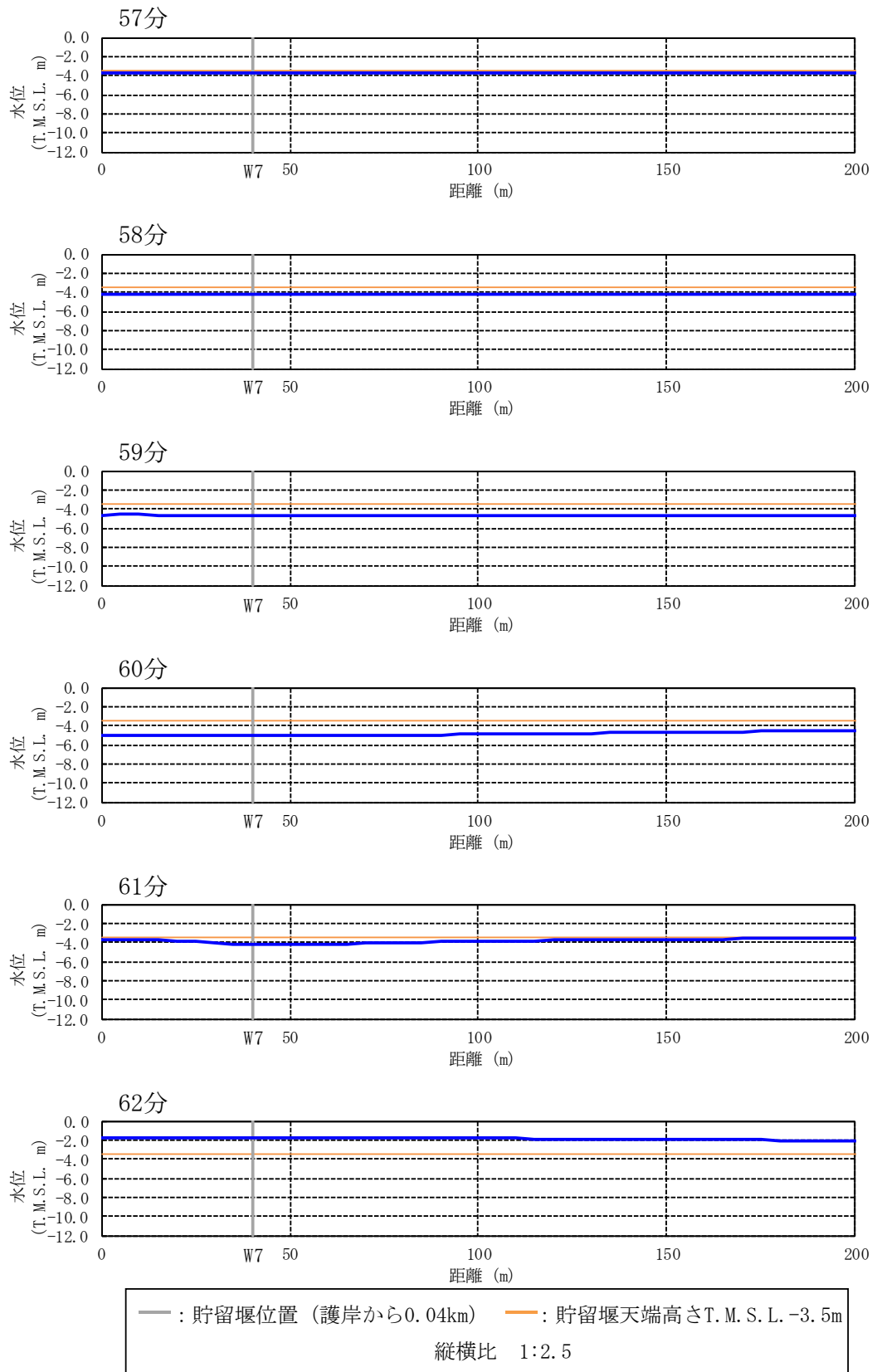


図 4.7 参 1-24 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [57-62 分, 0-200m を拡大]

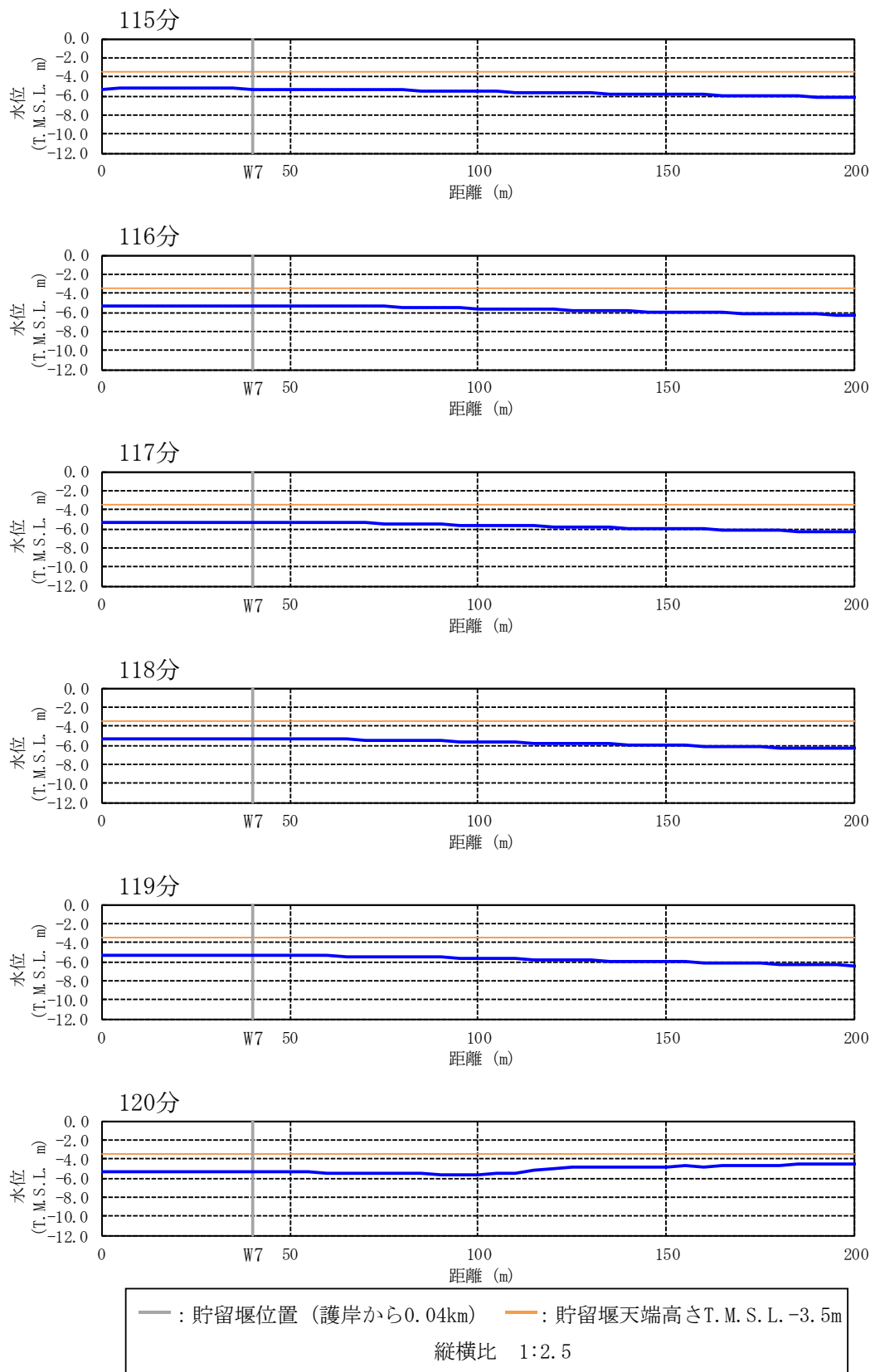


図 4.7 参 1-25 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [115-120 分, 0-200m を拡大]

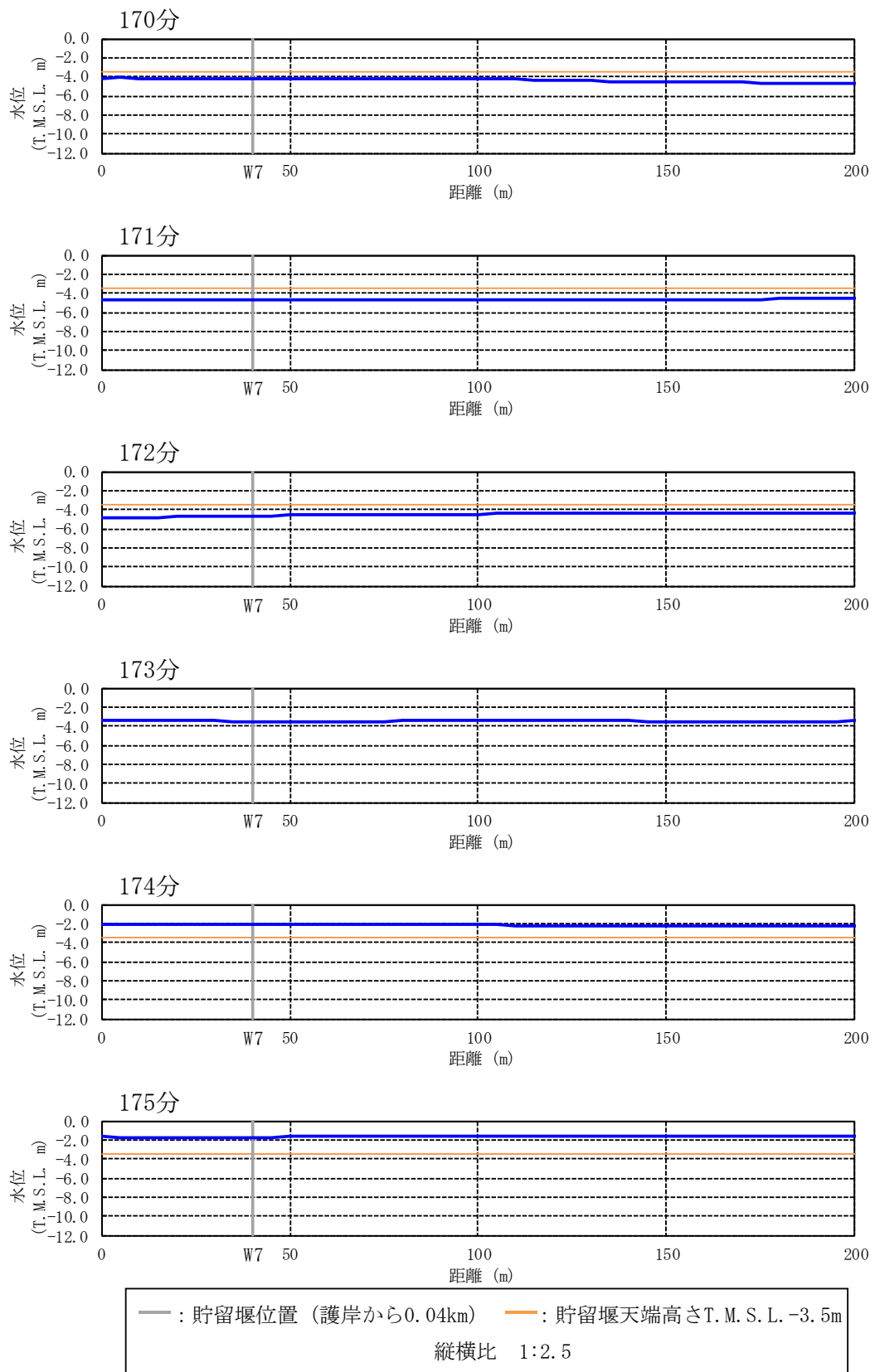


図 4.7 参 1-26 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [170-175 分, 0-200m を拡大]

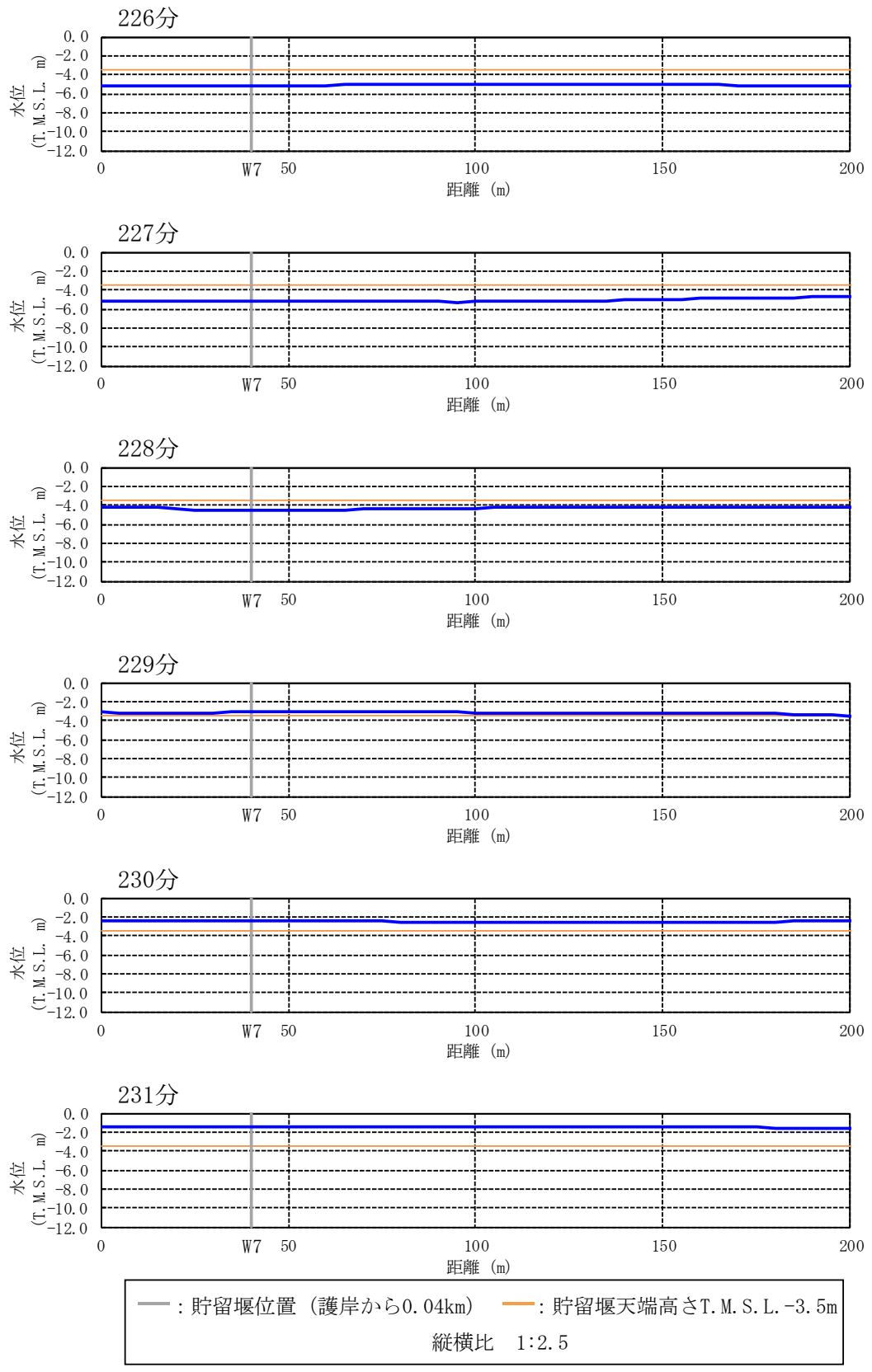


図 4.7 参 1-27 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 2) [226-231 分, 0-200m を拡大]

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

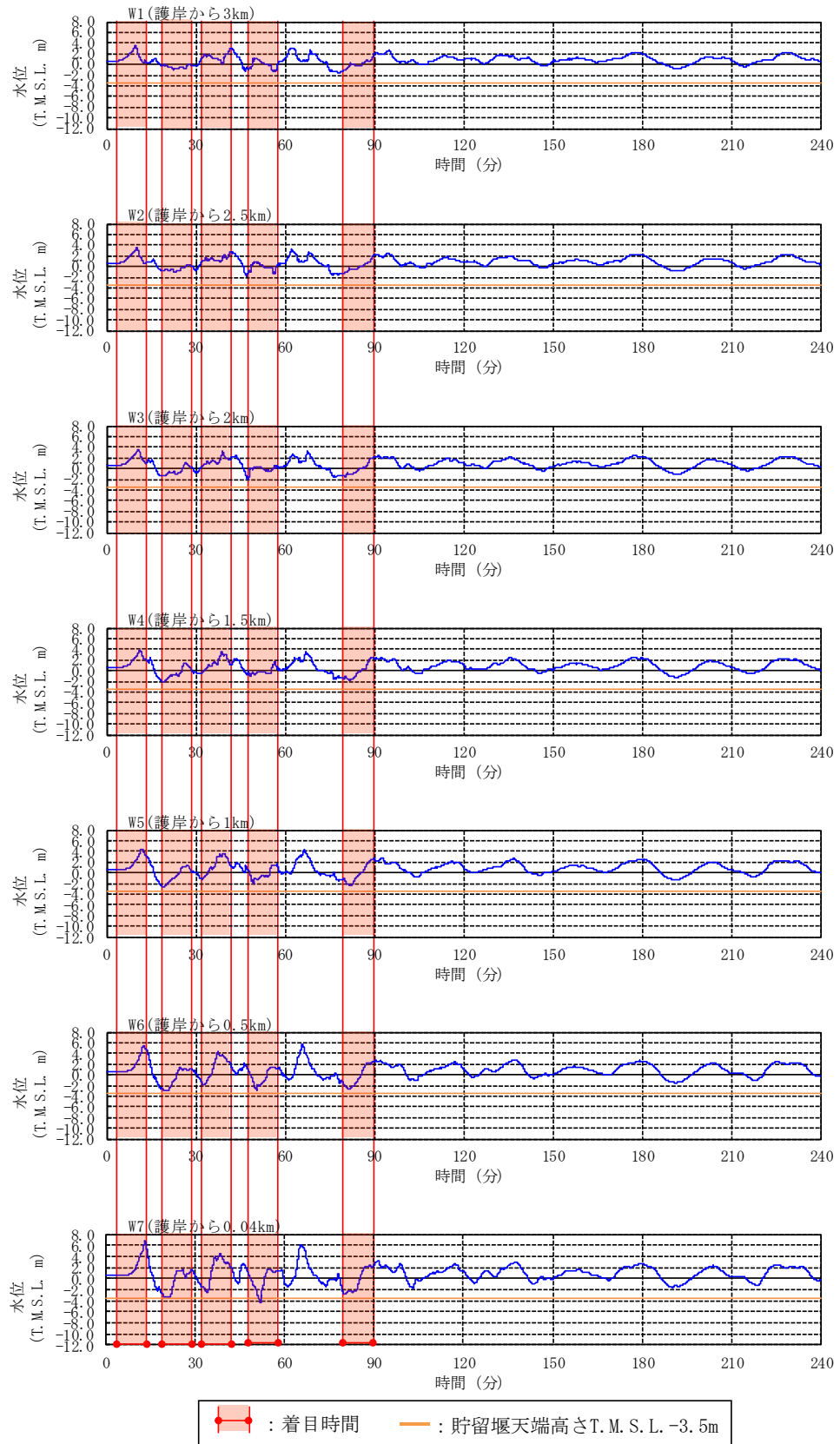


図 4.7 参 1-28 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [0-240 分]

b. 水位時刻歴波形(着目時間の拡大)

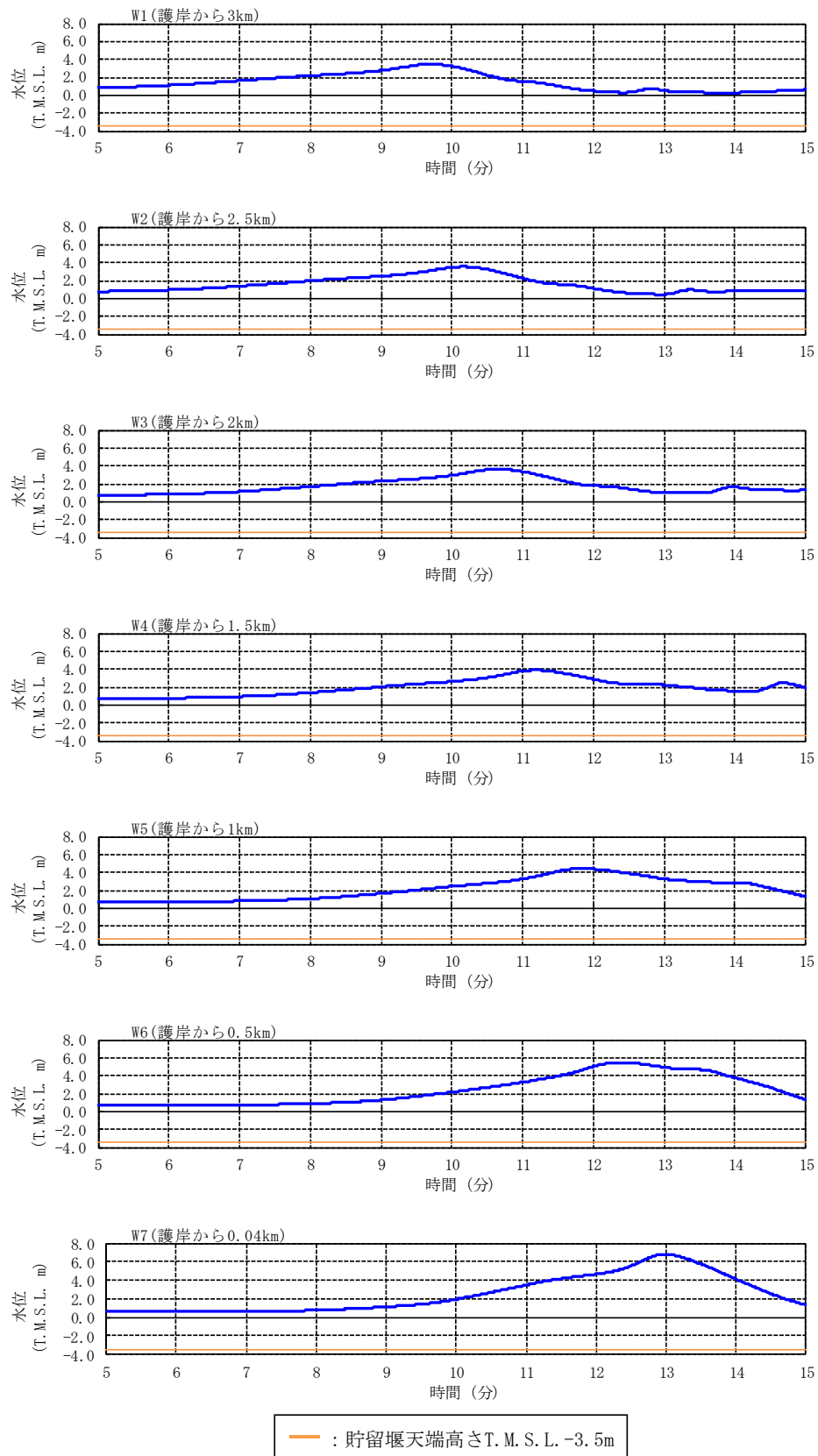


図 4.7 参 1-29 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [5-15 分を拡大]

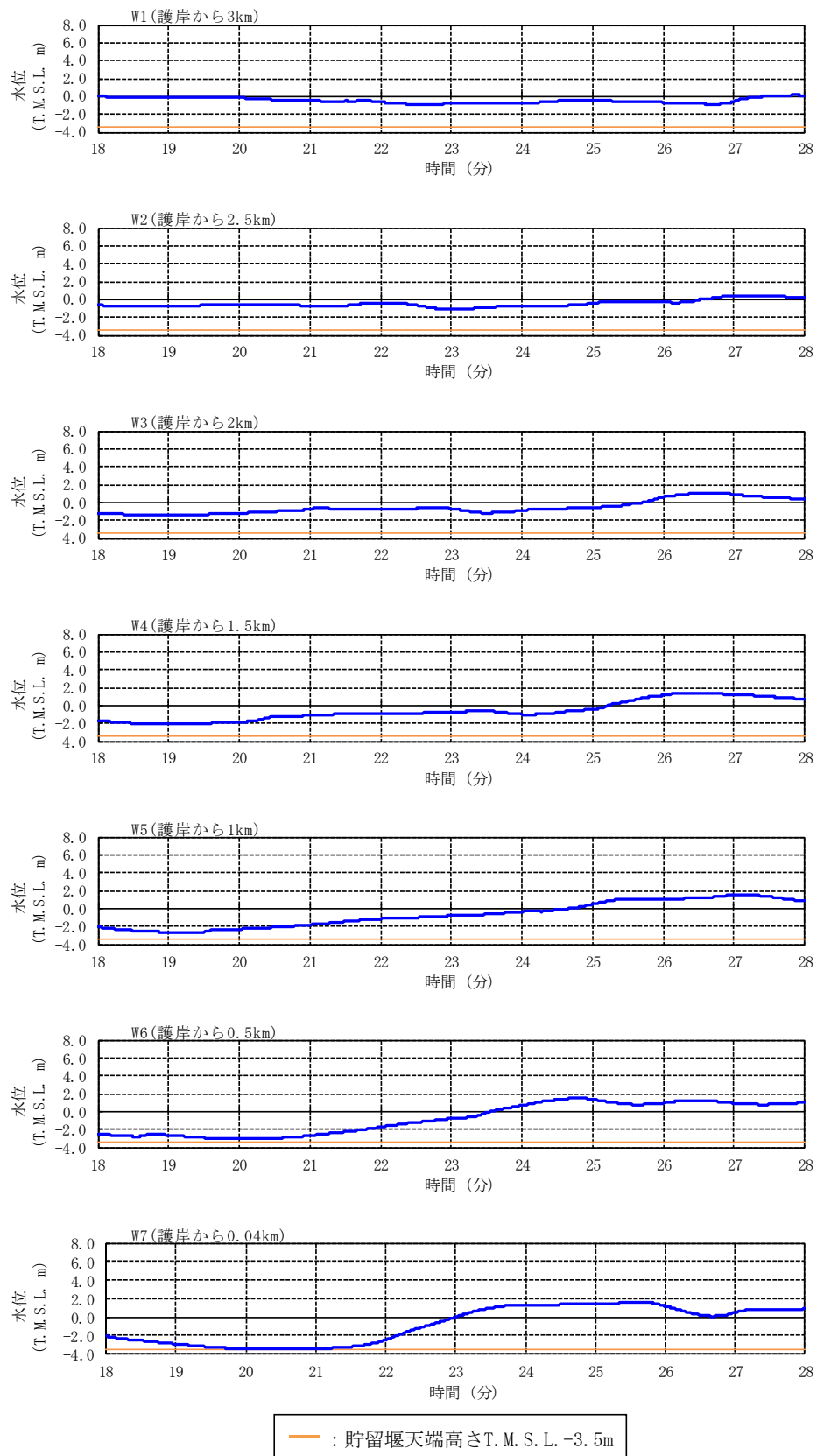


図 4.7 参 1-30 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [18-28 分を拡大]

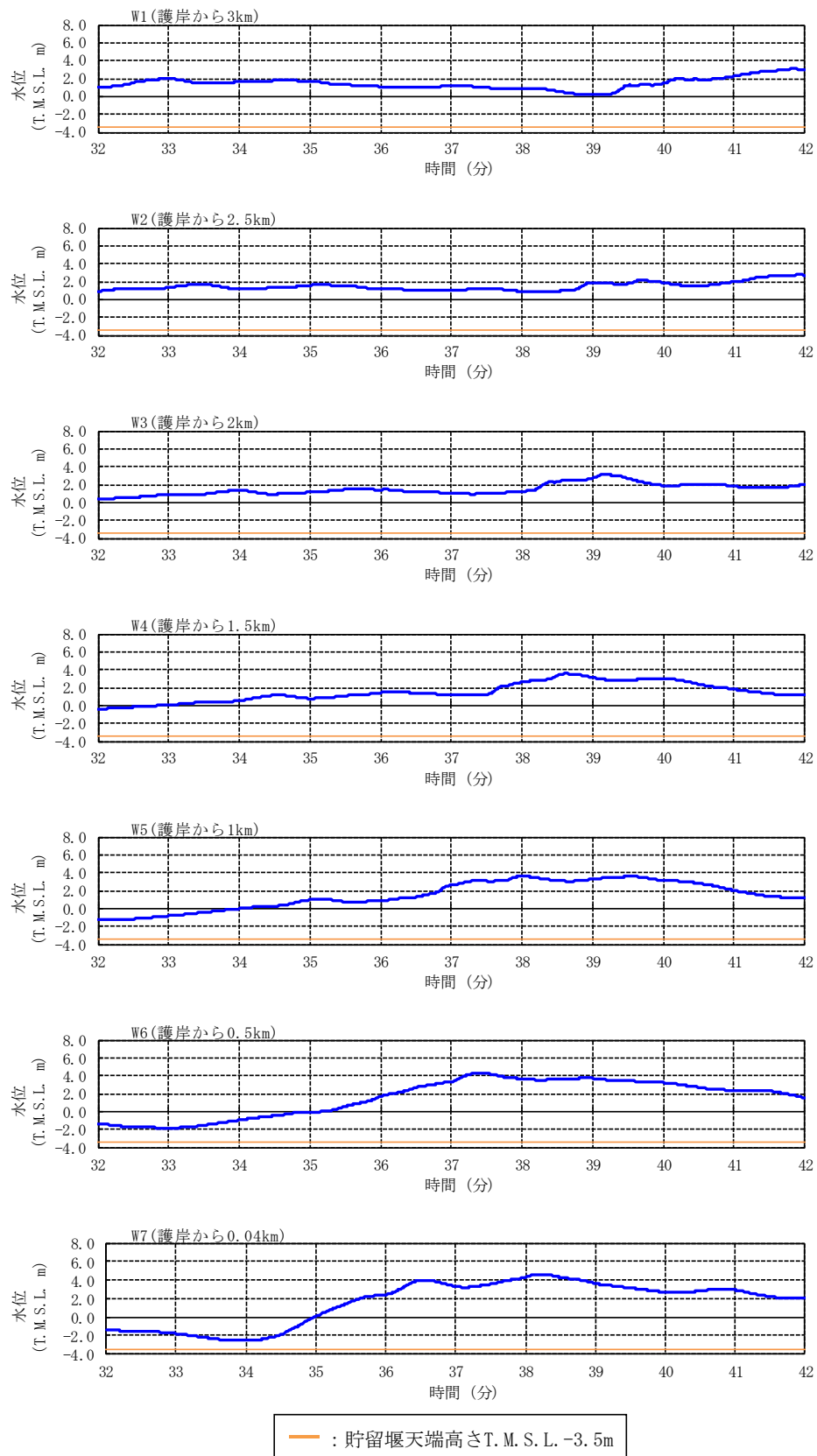


図 4.7 参 1-31 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [32-42 分を拡大]

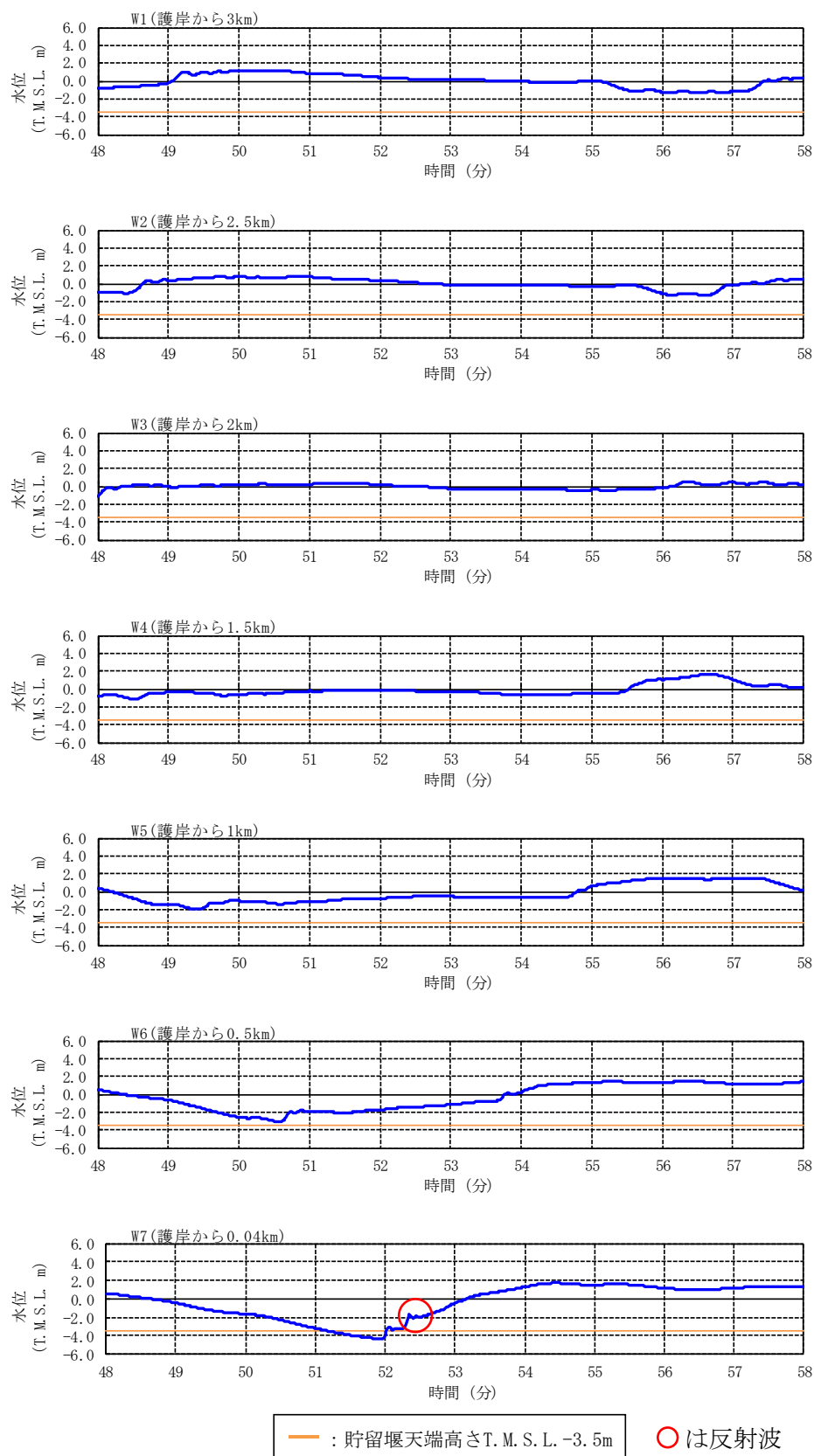


図 4.7 参 1-32 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [48-58 分を拡大]

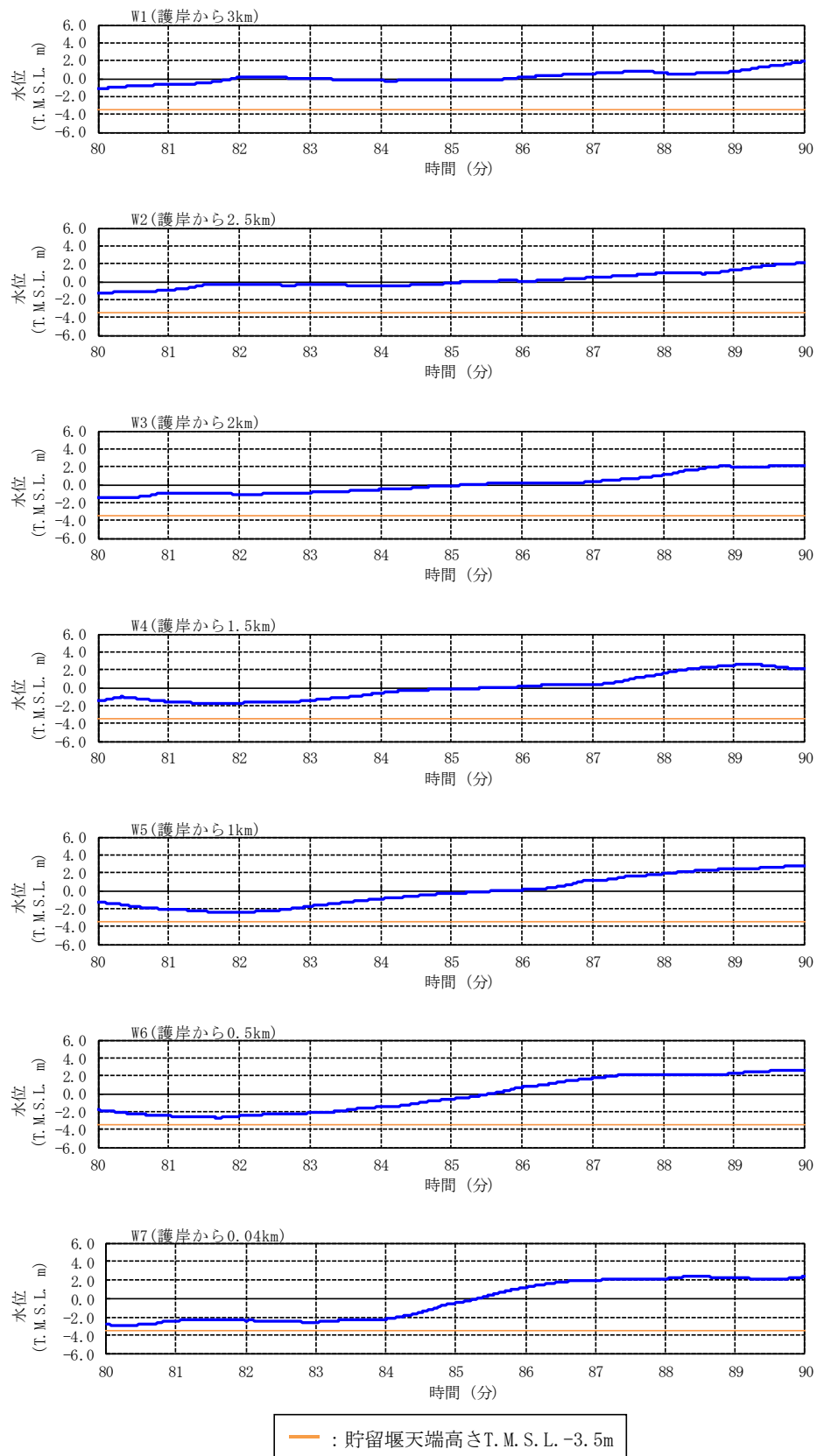


図 4.7 参 1-33 出力点ごとの水位時刻歴波形 (基準津波 3) [80-90 分を拡大]

c. 着目時間別の水位の空間分布

(1) 全景

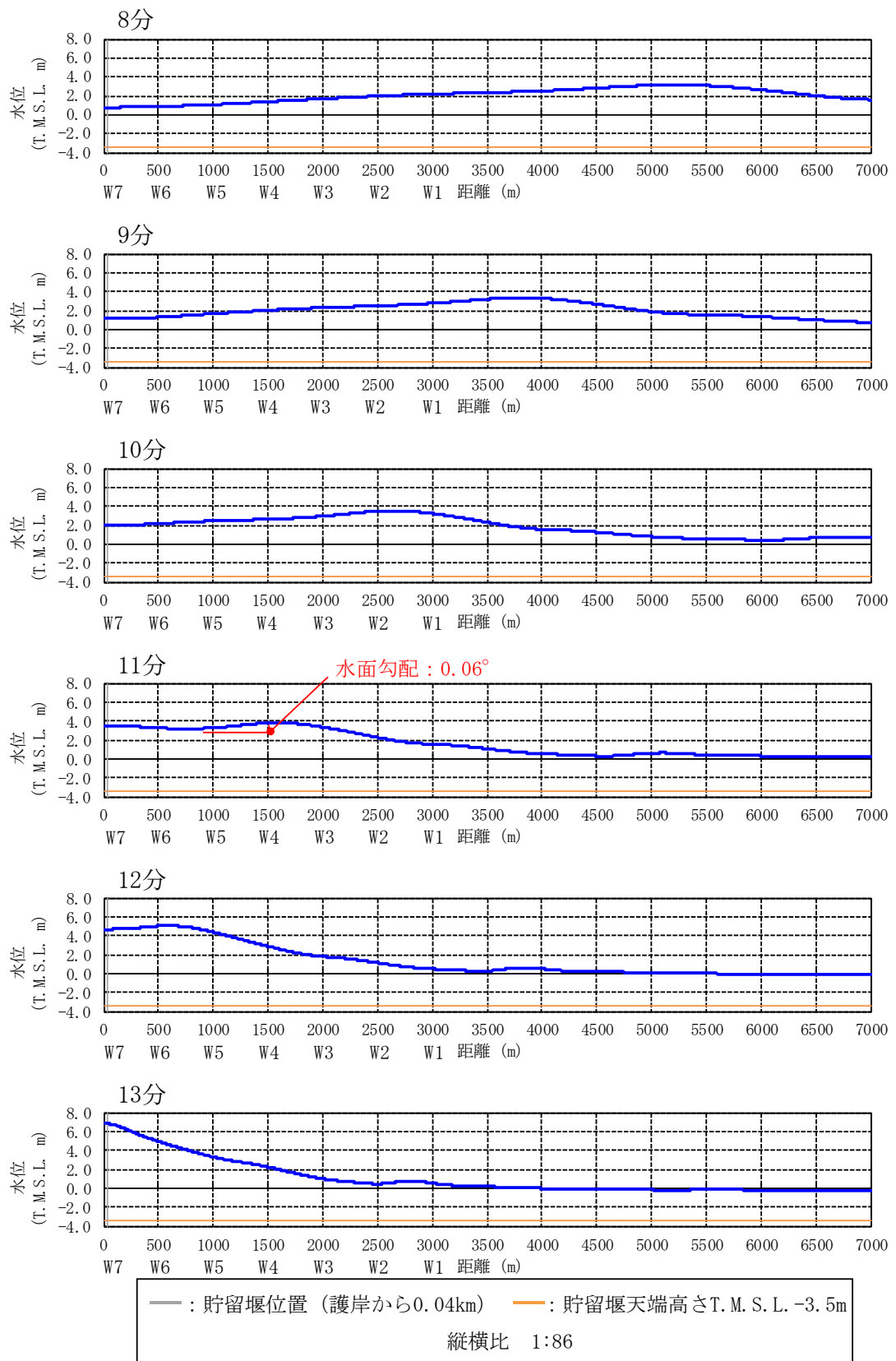


図 4.7 参 1-34 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [8-13 分]

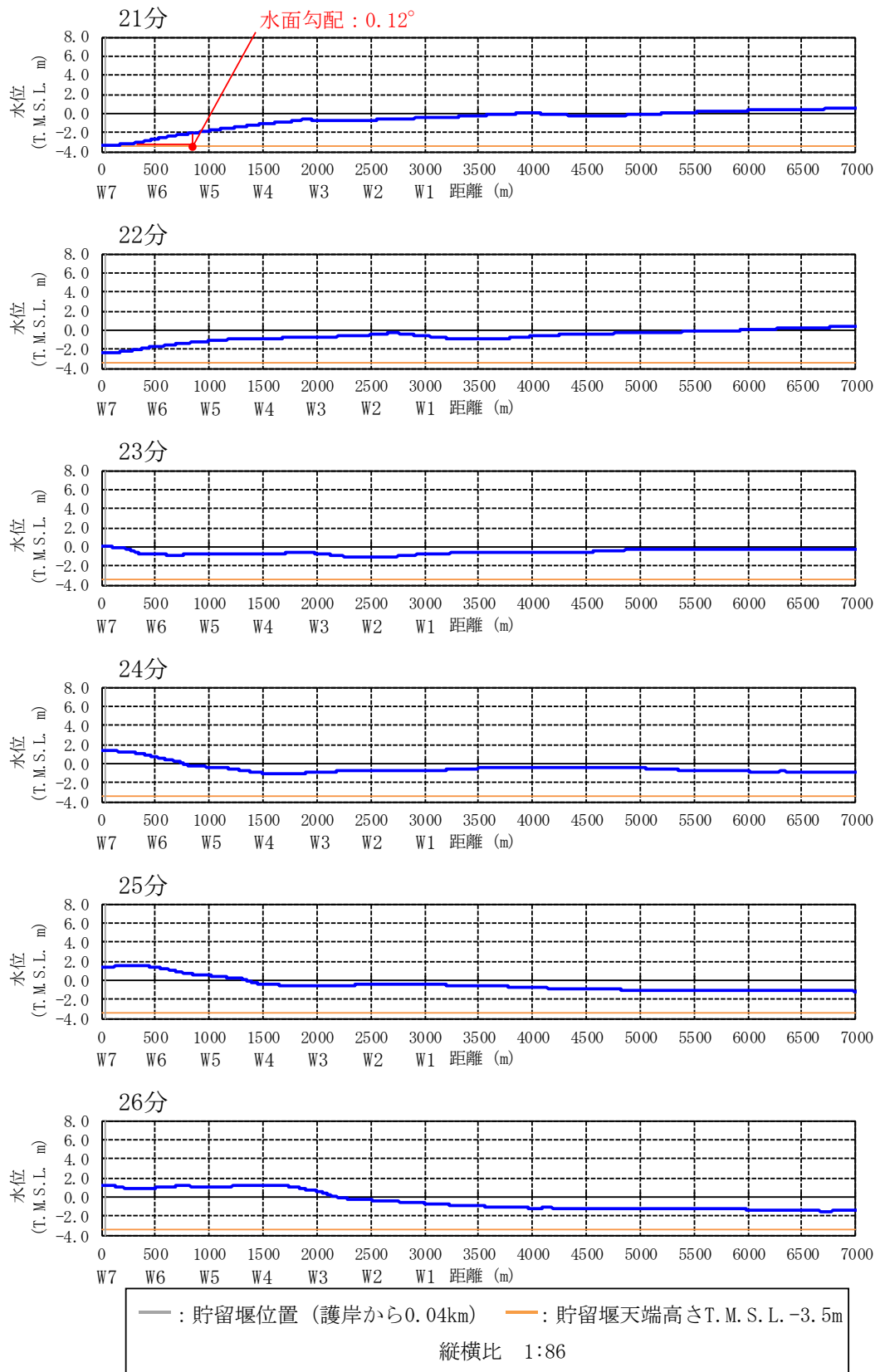


図 4.7 参 1-35 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [21-26 分]

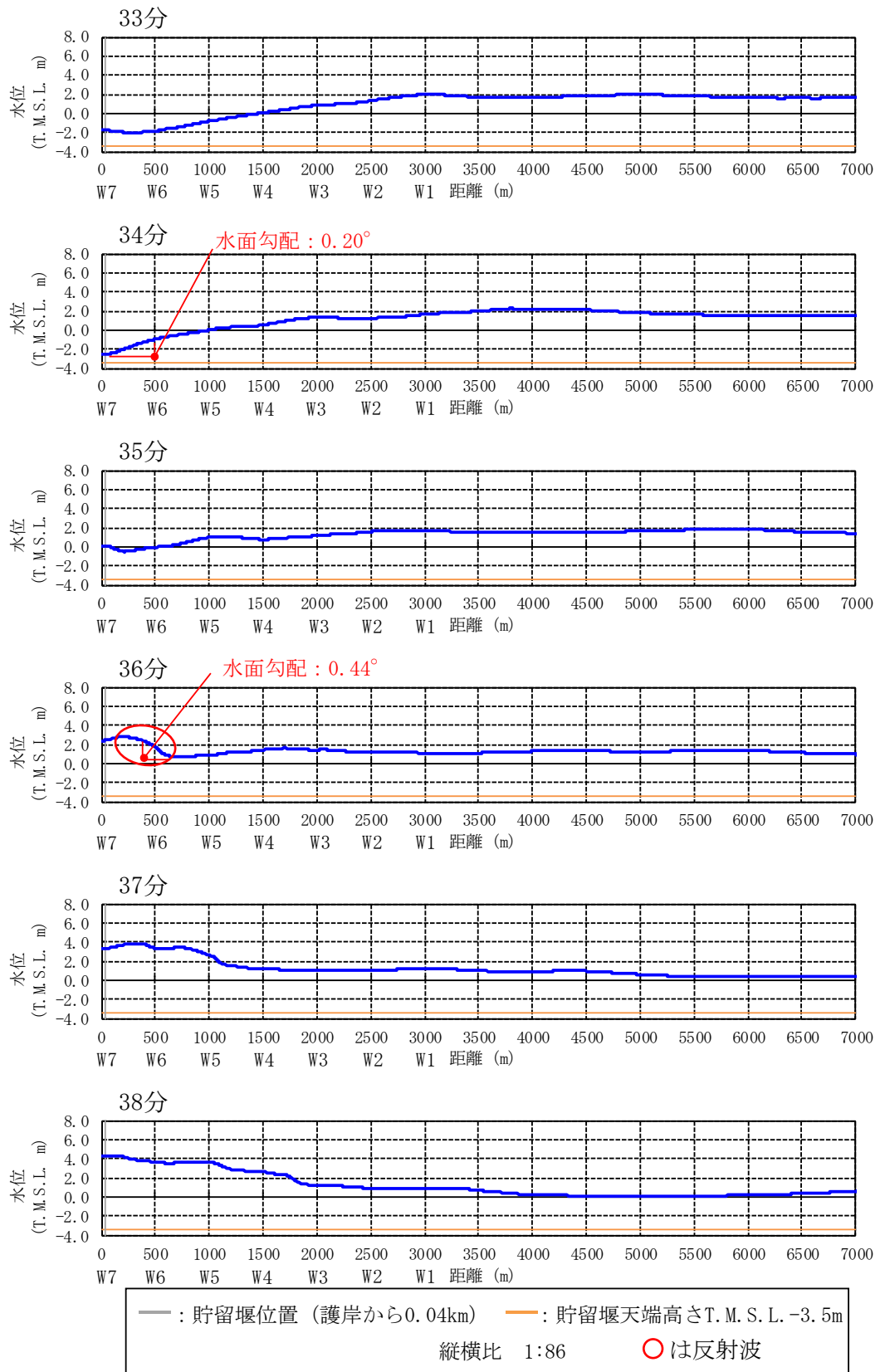


図 4.7 参 1-36 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [33-38 分]

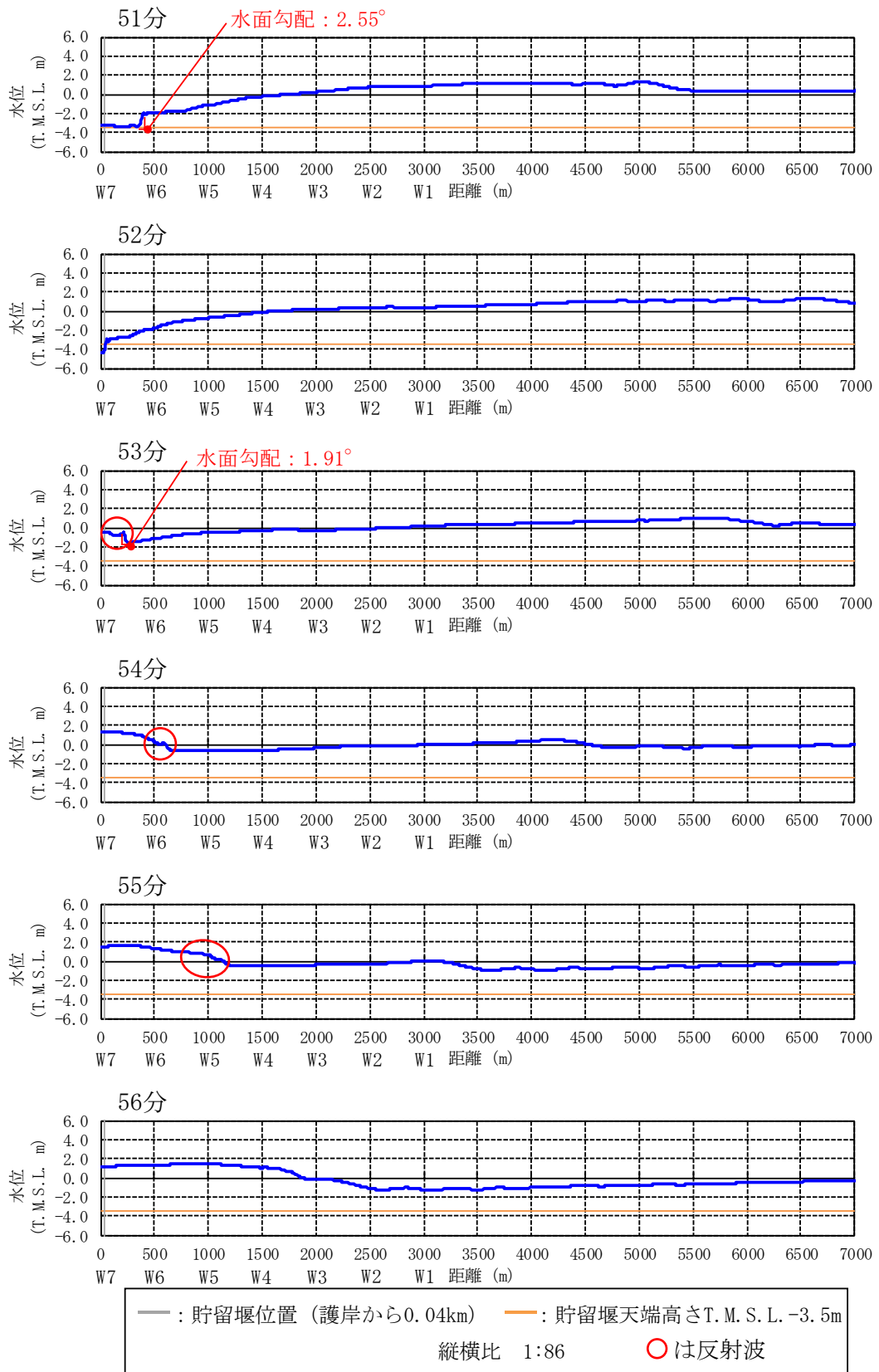


図 4.7 参 1-37 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分]

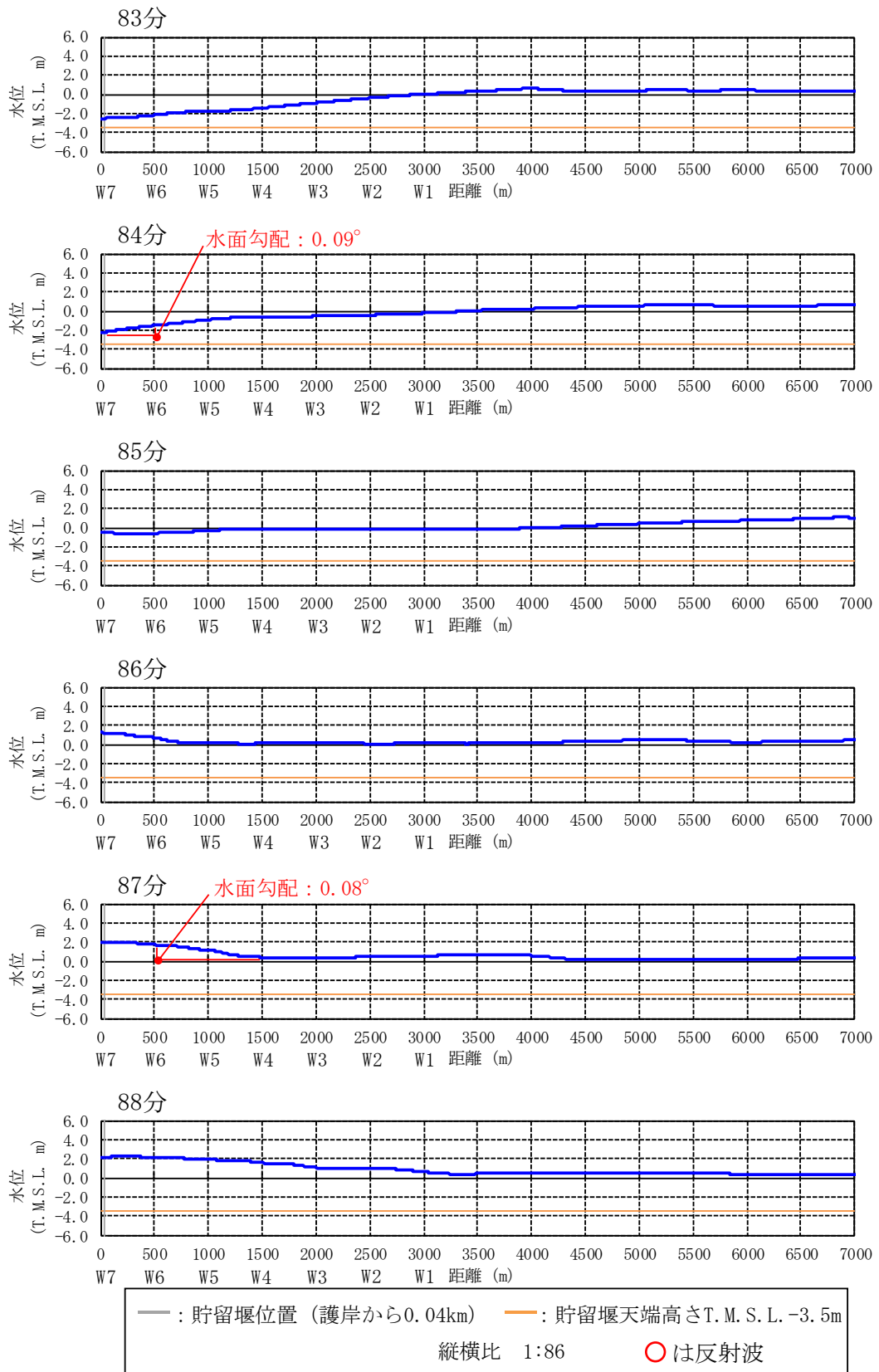


図 4.7 参 1-38 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [83-88 分]

(2) 貯留堰設置位置近景

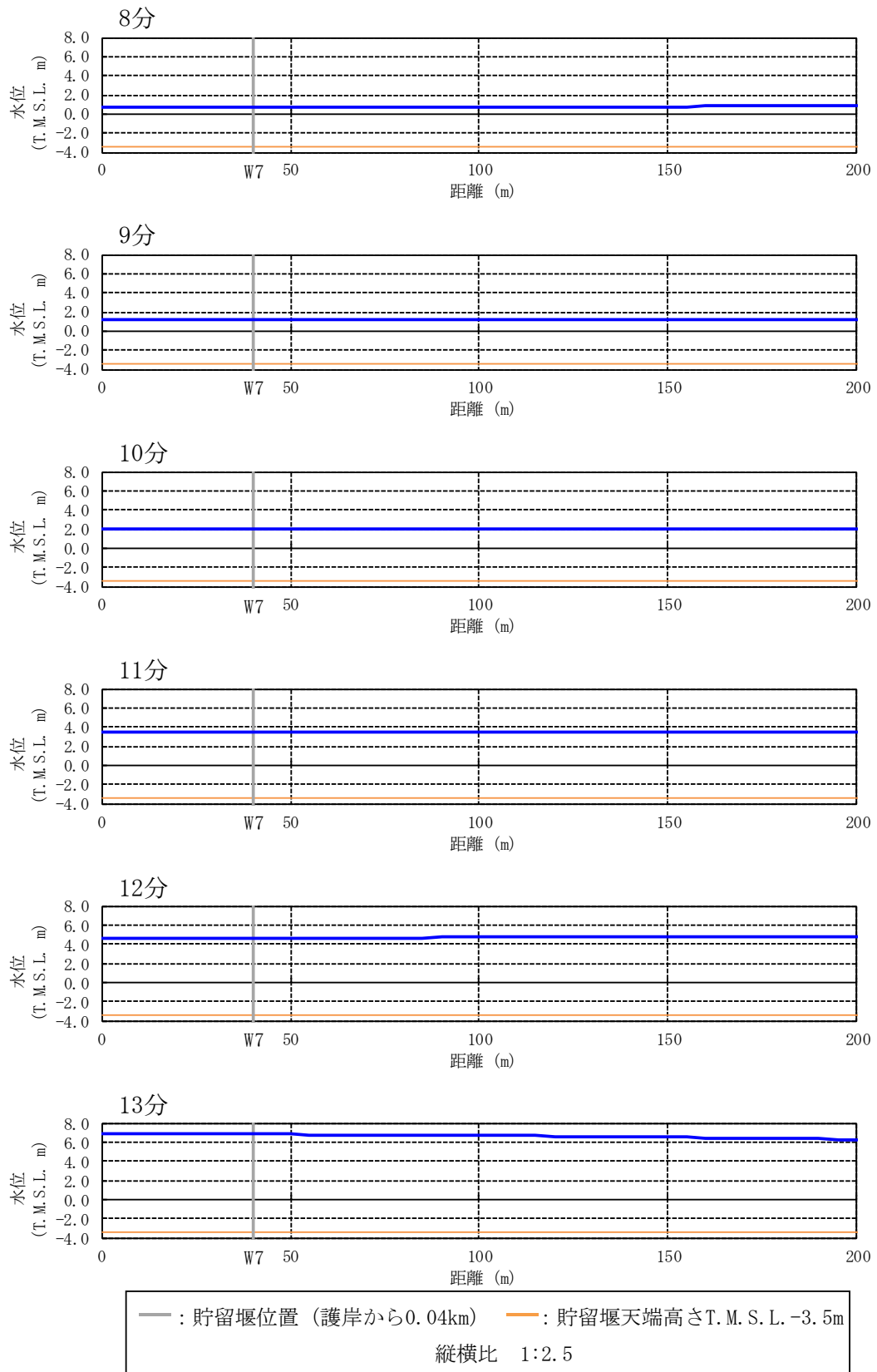


図 4.7 参 1-39 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [8-13 分, 0-200m を拡大]

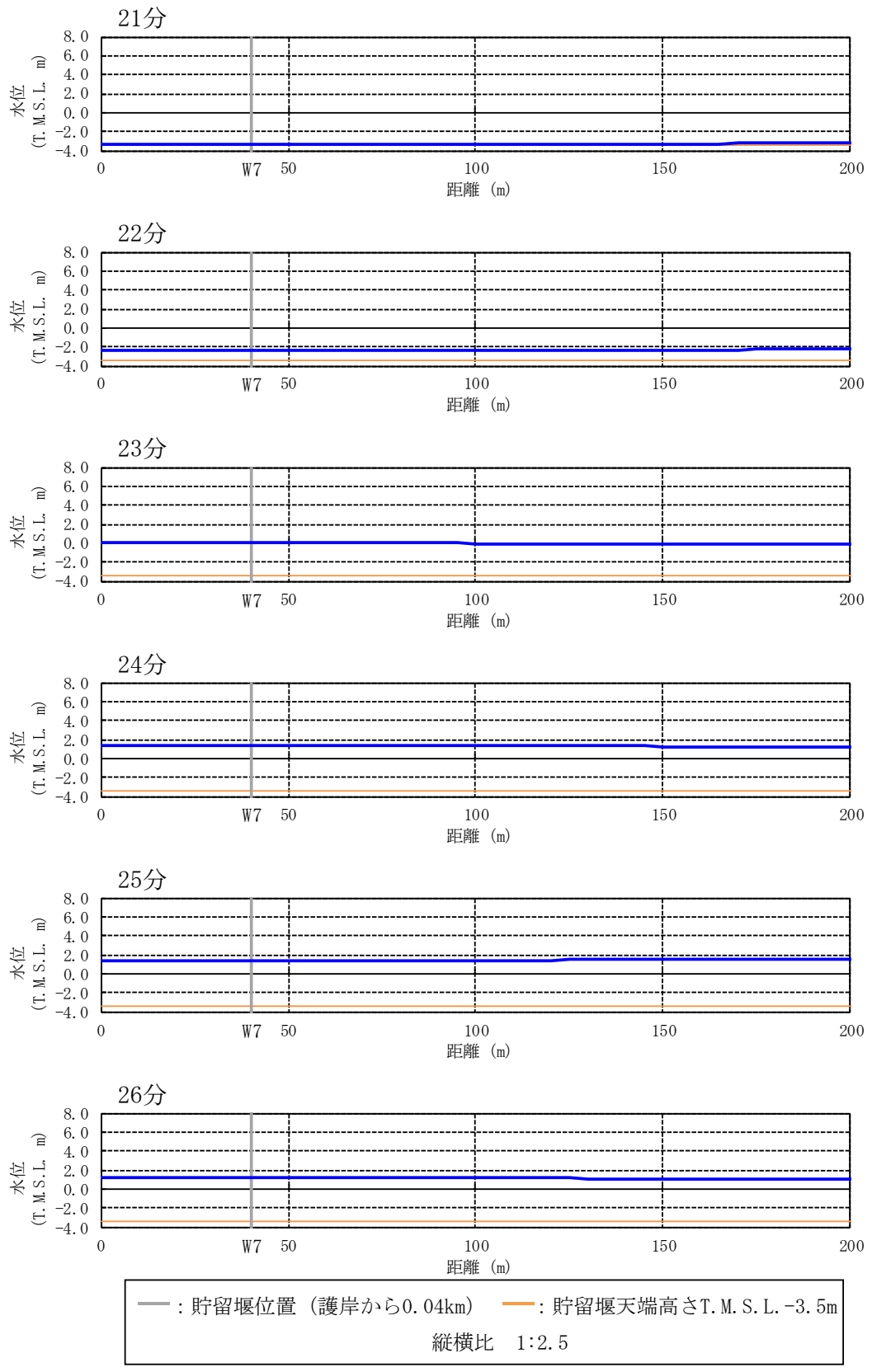


図 4.7 参 1-40 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [21-26 分, 0-200m を拡大]

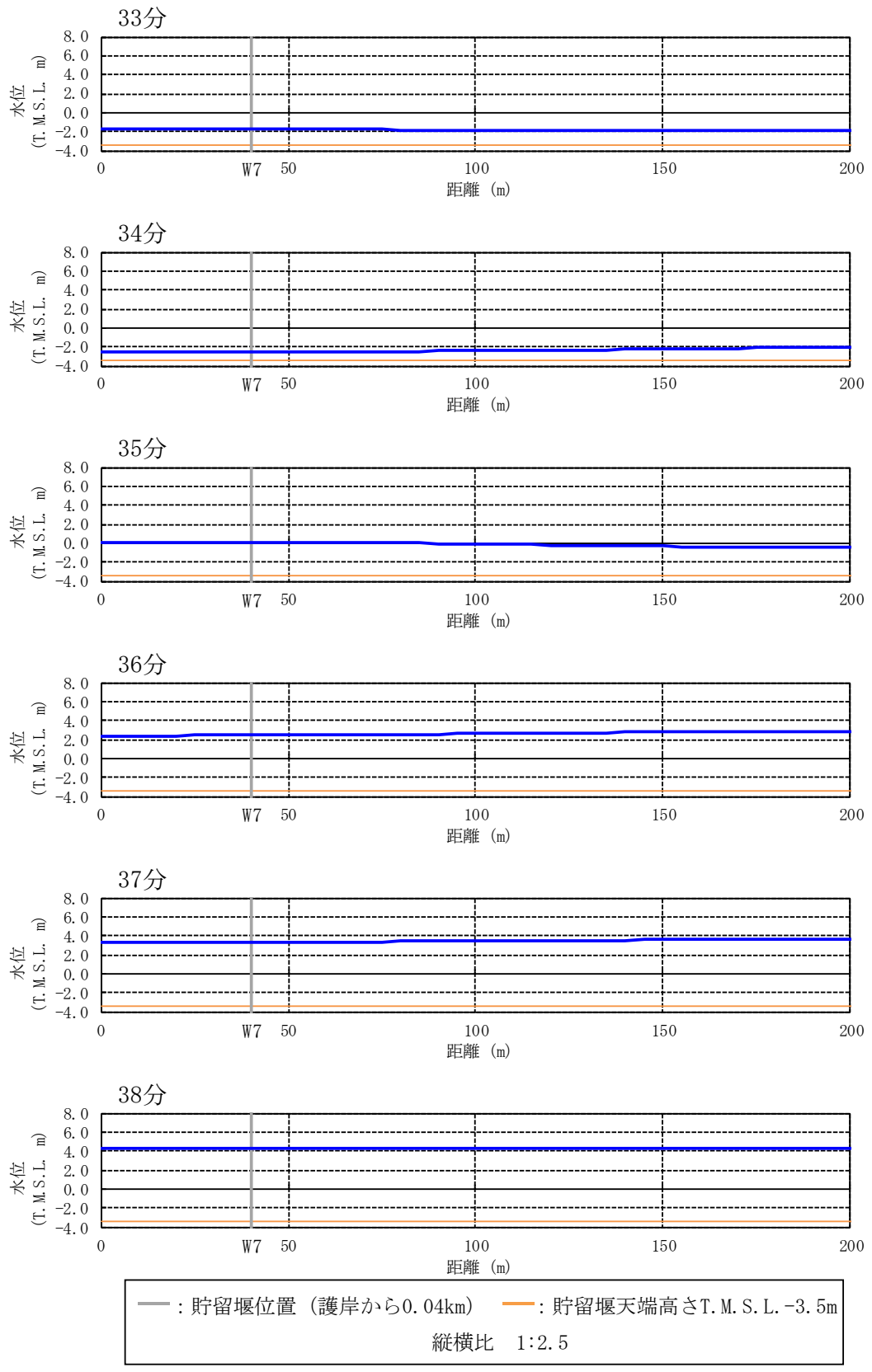


図 4.7 参 1-41 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [33-38 分, 0-200m を拡大]

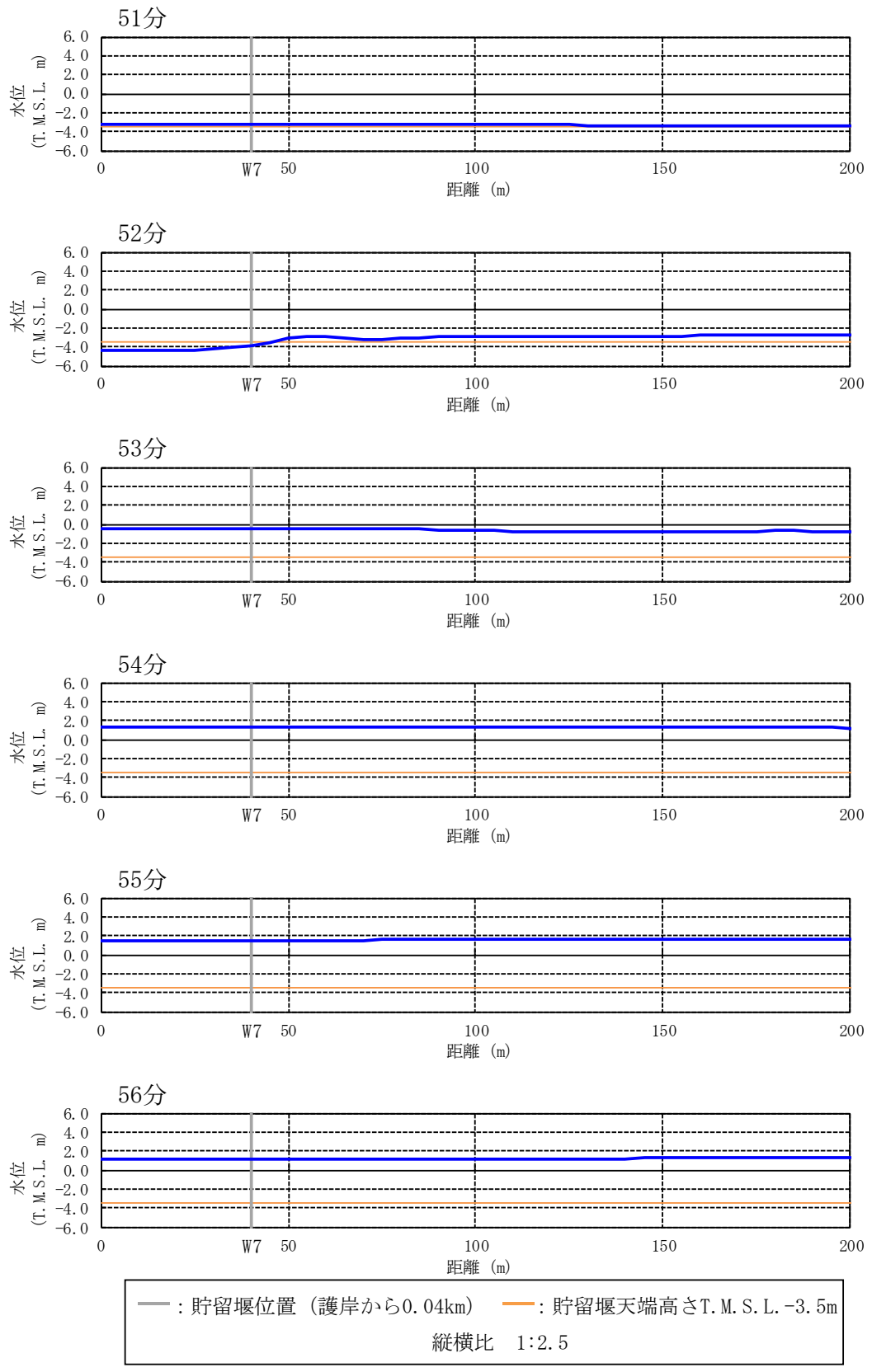


図 4.7 参 1-42 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [51-56 分, 0-200m を拡大]

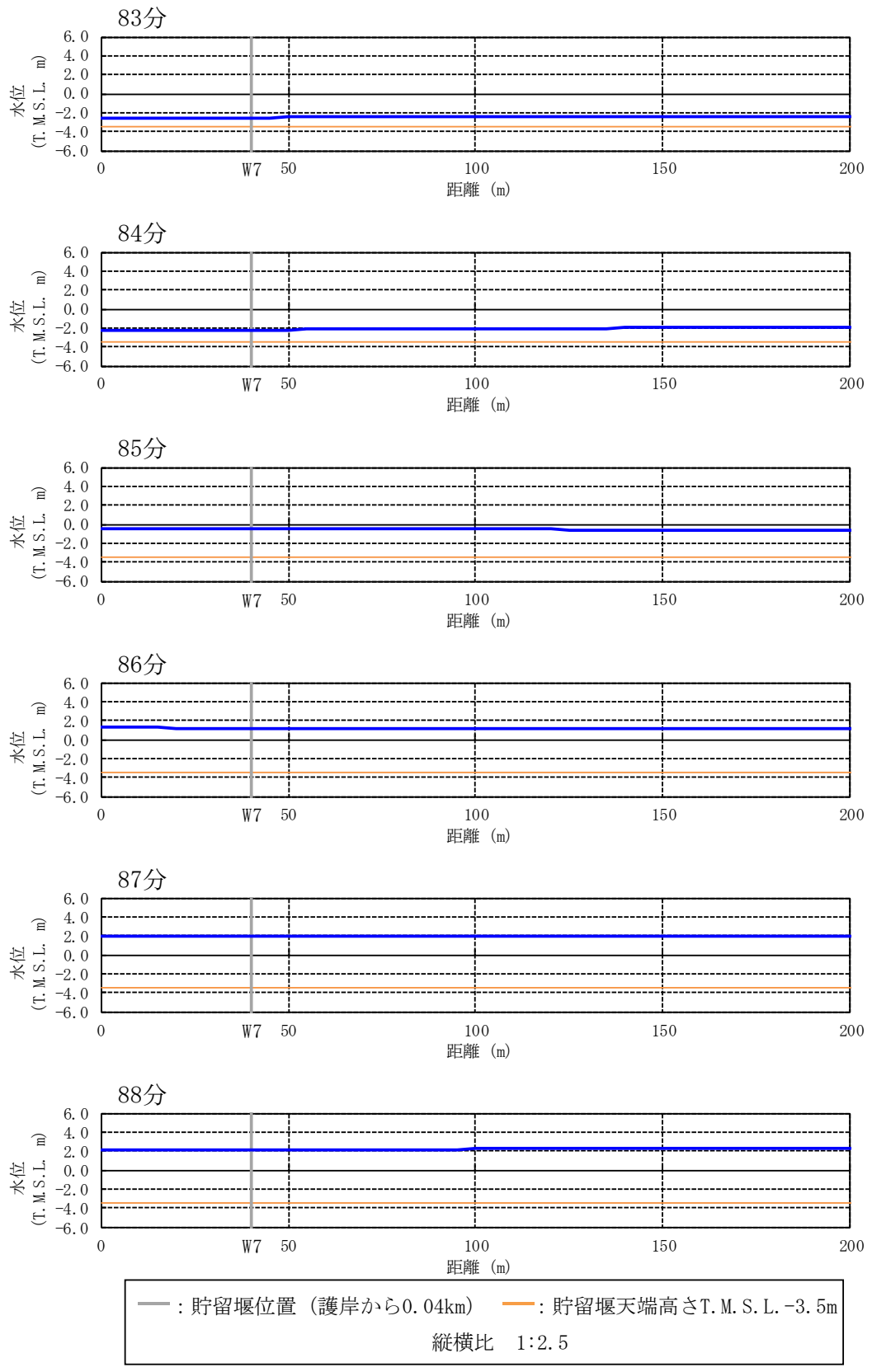


図 4.7 参 1-43 水位の空間分布の時間変化 (基準津波 3) [83-88 分, 0-200m を拡大]

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。

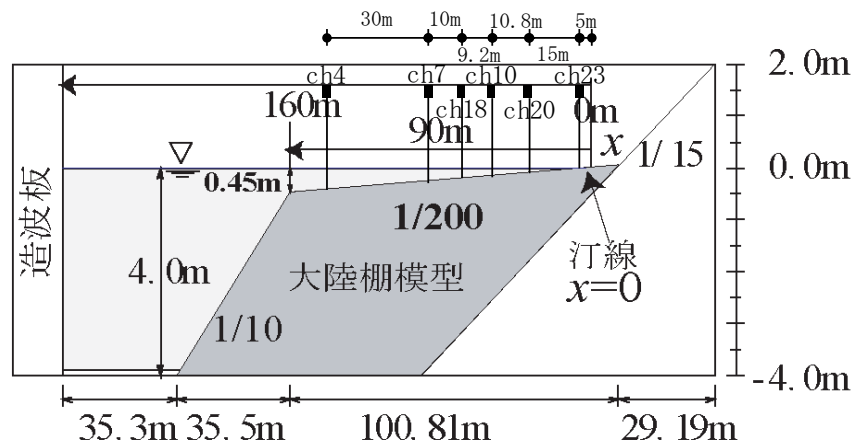


図 4.7 参 2-3-1 実験水路の概要 (松山ら(2005)⁵⁾に加筆)

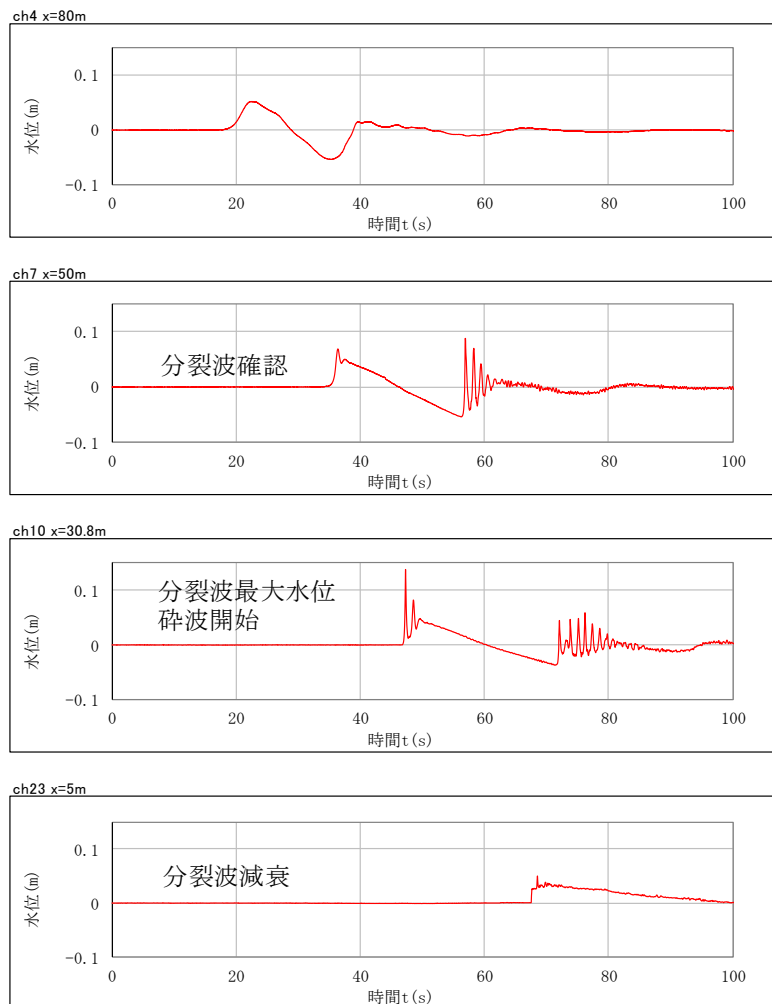


図 4.7 参 2-3-2 実験結果

3.2 解析コード「BSNSQ」の適用性検証

(1) 再現解析条件

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

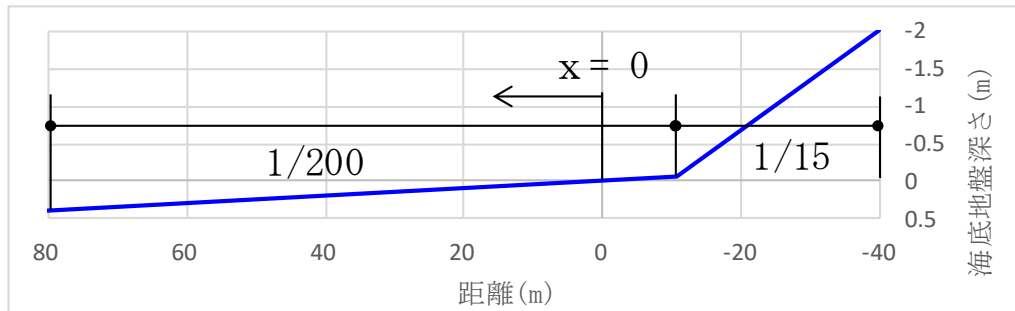


図 4.7 参 2-3-3 1次元再現解析用地形モデル

表 4.7 参 2-3-2 1次元再現解析条件

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

(2) 再現解析結果

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

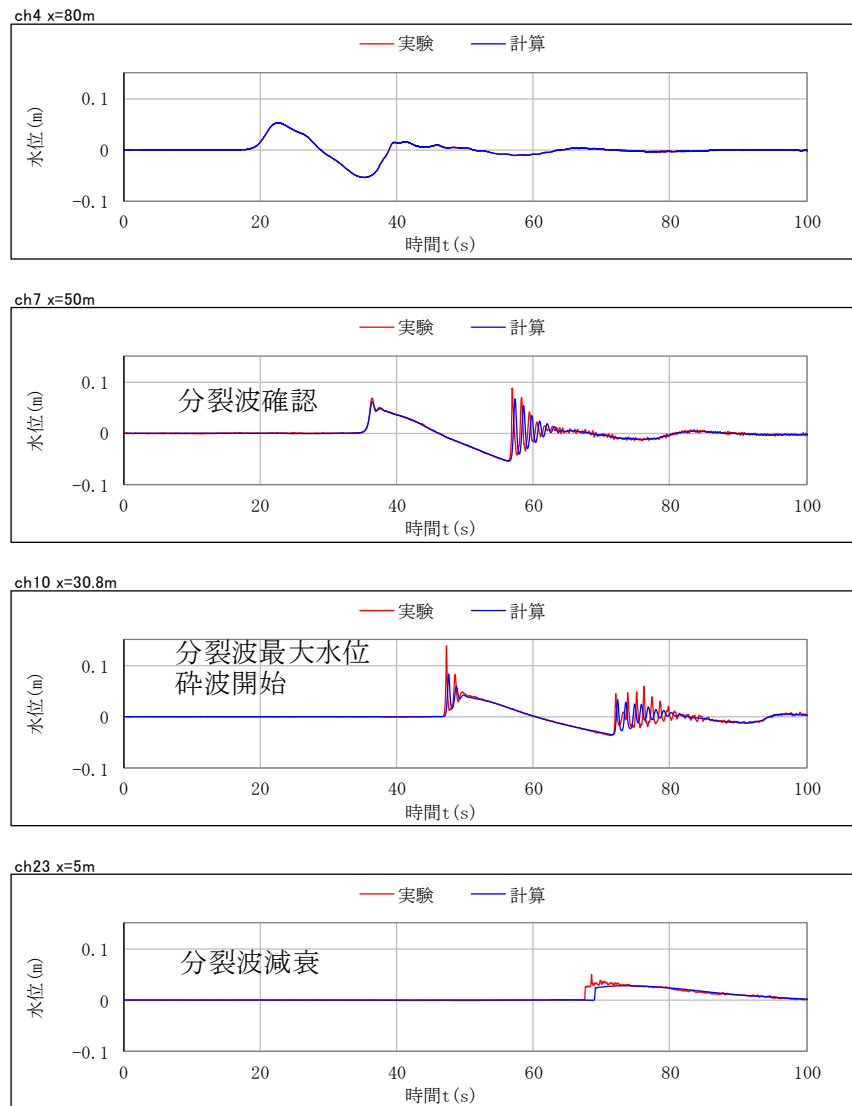


図 4.7 参 2-3-4 1次元解析結果と実験の比較

3.3 解析コード「OpenFOAM」の適用性検証

(1) 再現解析条件

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

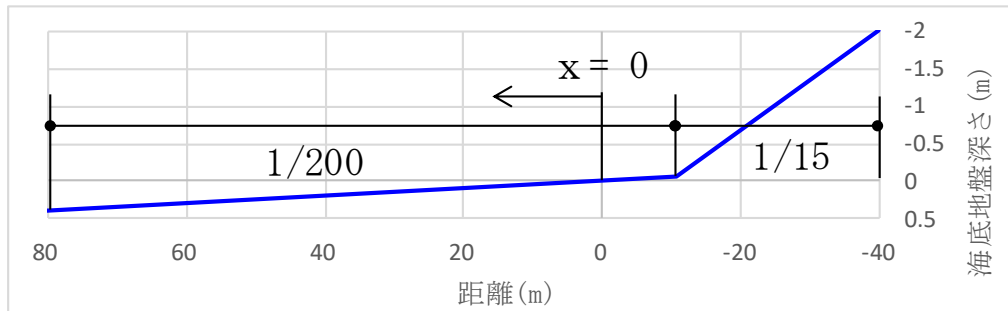


図 4.7 参 2-3-5 断面 2 次元再現解析用地形モデル

表 4.7 参 2-3-3 断面 2 次元再現解析条件

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

(2) 再現解析結果

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

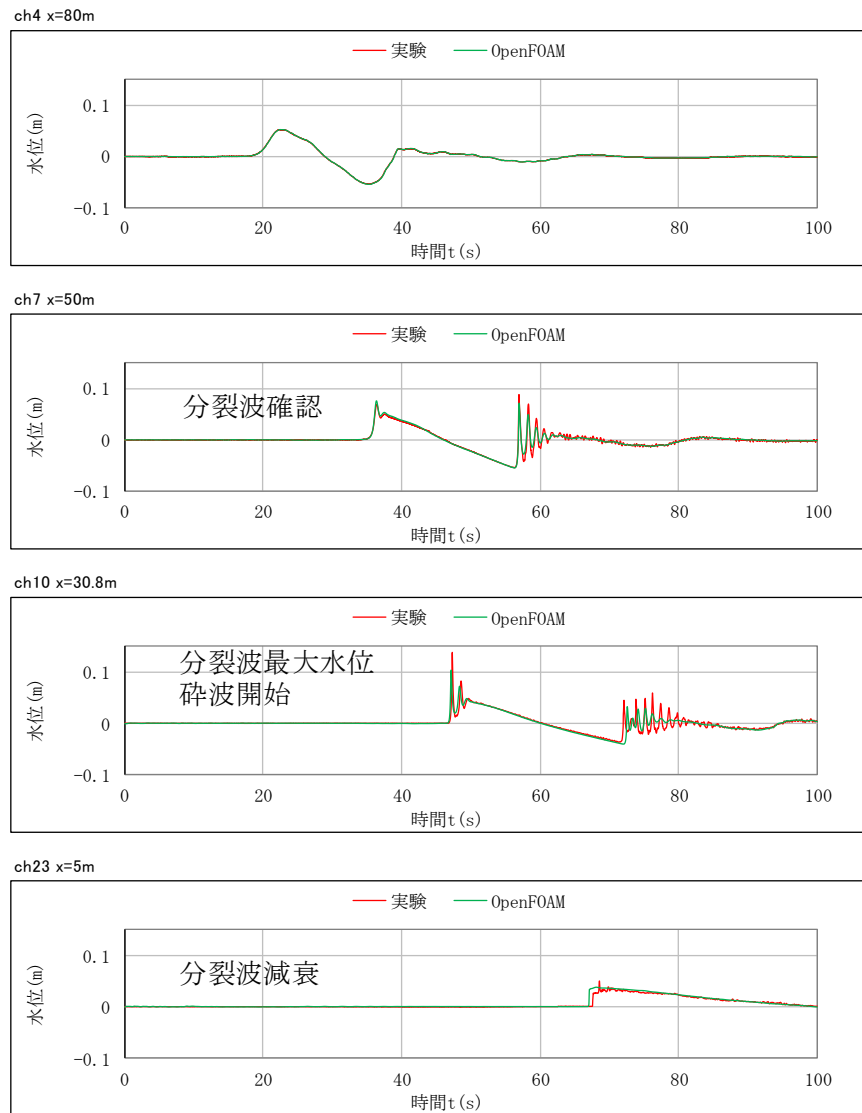


図 4.7 参 2-3-6 断面 2 次元解析結果と実験の比較

3.4 解析コード「CADMAS-SURF 2D」の適用性検討

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

4. 実規模地形を対象とした検証

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

4.1 各解析コードの計算結果比較

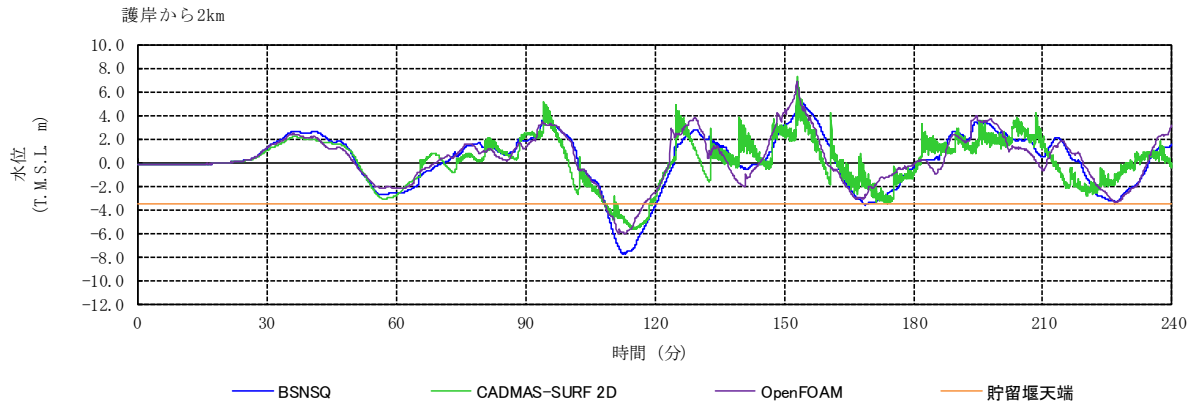
柏崎刈羽原子力発電所の海底地形で1次元モデルおよび断面2次元モデルによる津波水位解析を実施する。各解析コードの解析条件を表4.7参2-4-1、解析結果の比較を図4.7参2-4-1に示す。なお、地形モデルは全て添付資料1図4.7添1-3.5-1にて示した断面地形モデルの基準津波策定位置から護岸までの範囲を用いる。また、当該サイトの基準津波の特徴として、押波と引波が複数回繰り返す傾向があり、引波により露出した海水貯留堰に対する押波の形状の評価についての適用性も検討する必要があるため、水位低下が大きい基準津波2を対象とする。

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

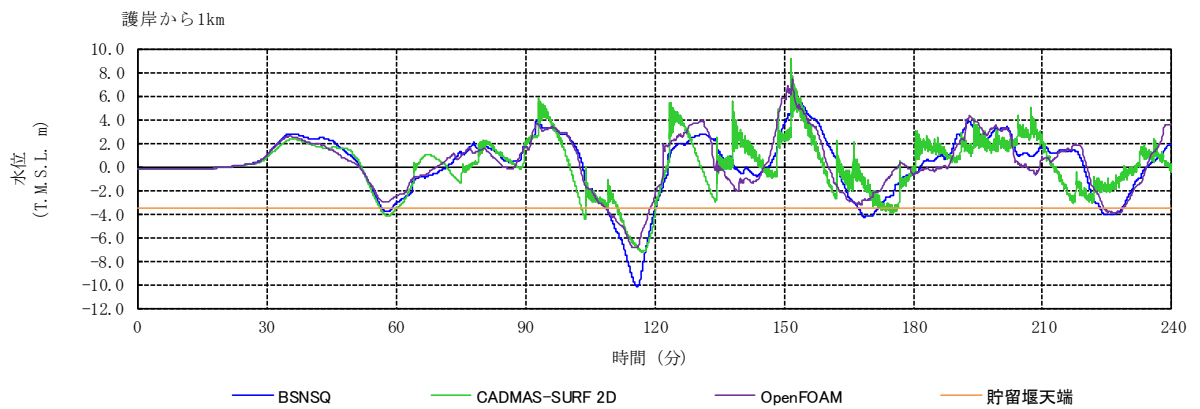
表 4.7 参 2-4-1 解析条件の比較

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

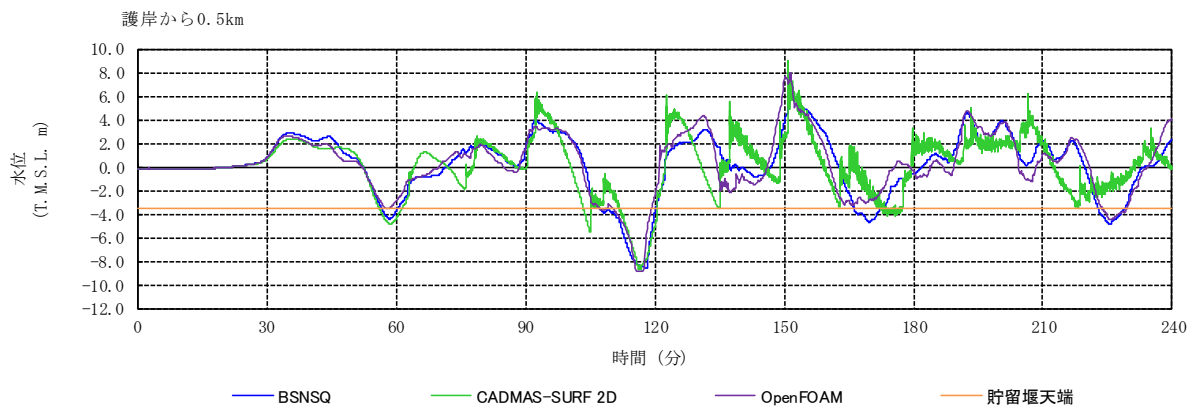
注記* : 5 条まとめ資料と同様に潮位のばらつきを考慮



護岸から 2.0km 地点



護岸から 1.0km 地点



護岸から 0.5km 地点

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

4.2 解析コード「CADMAS-SURF 2D」の解析結果

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

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

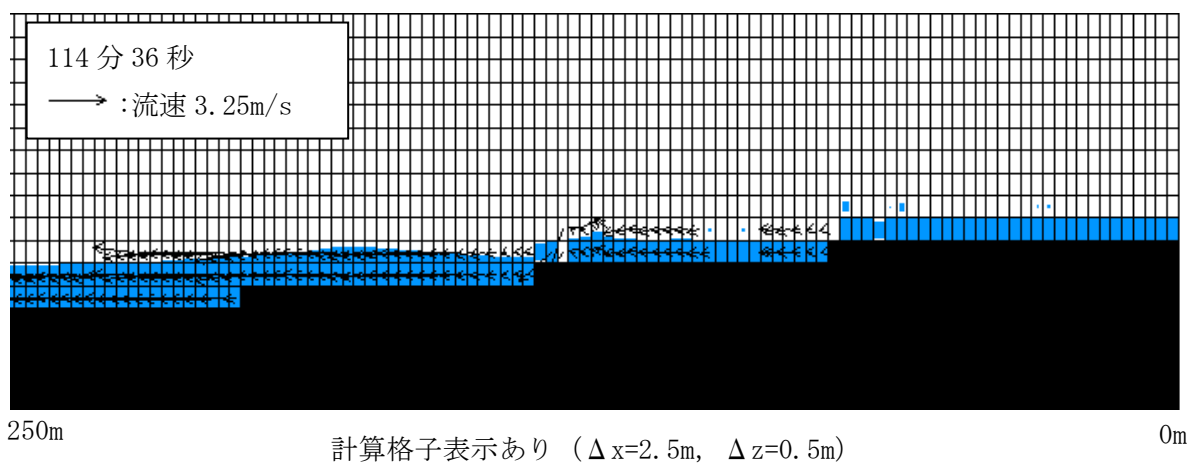
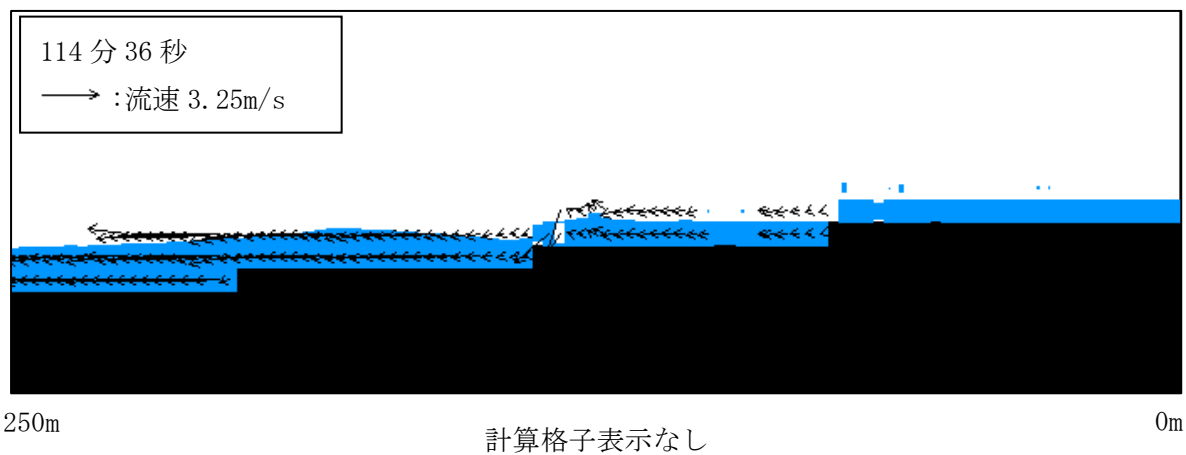


図 4.7 参 2-4-2 CADMAS-SURF 2Dによる解析結果の空間分布
(引波時の護岸付近を拡大, 縦横比 1:10)

4.3 解析コード「BSNSQ」と「OpenFOAM」の比較

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

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

5. 解析コードの選定

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

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

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

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

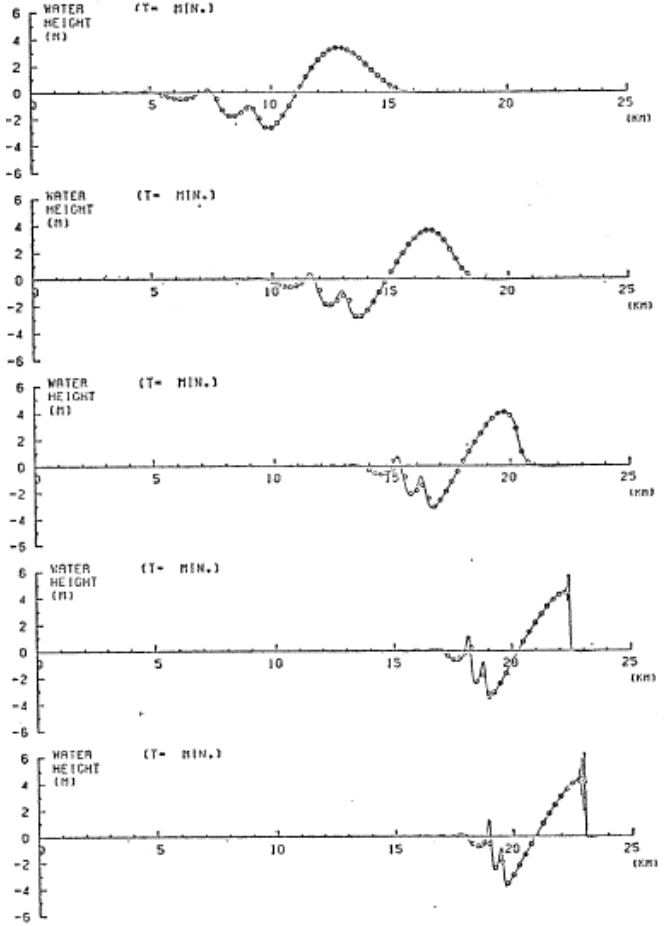
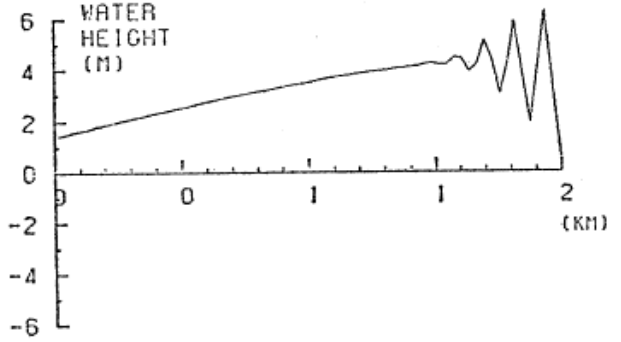
加えて、1次元解析は検証実績が豊富であることも踏まえ、柏崎刈羽原子力発電所においては解析コード「BSNSQ」による1次元解析の適用性が高いと判断した。なお、1次元解析によるソリトン分裂の発生の可能性について検討した実績を参考資料3に示す。

6. 参考文献

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

1次元解析によるソリトン分裂に関する検討実績

1. 1次元解析によるソリトン分裂に関する検討実績

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

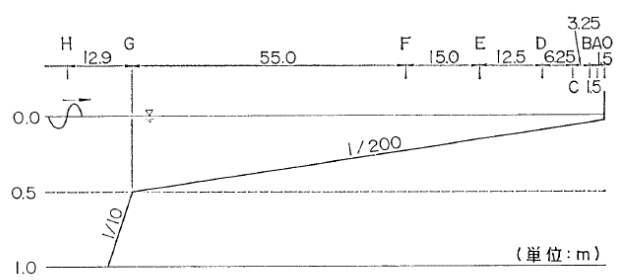


図-2 解析モデル

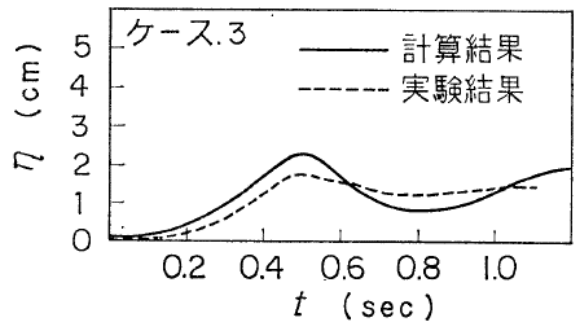
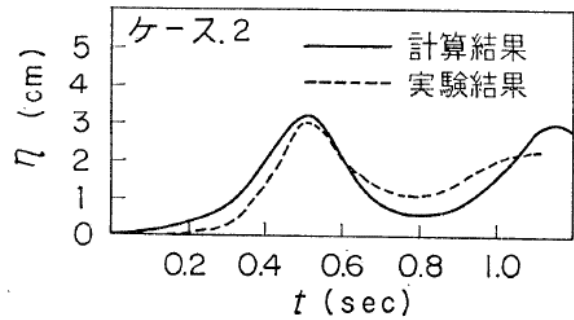
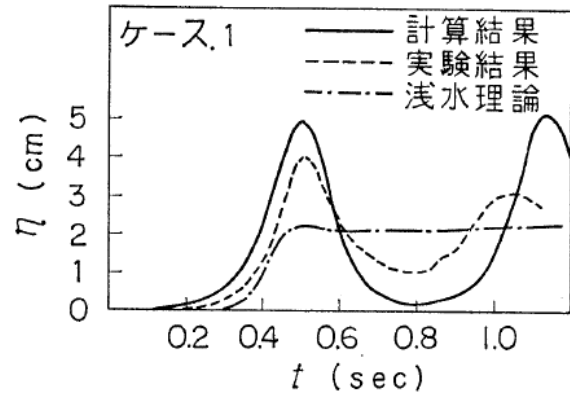


図-5 ソリトン波形の比較 (測定点C)

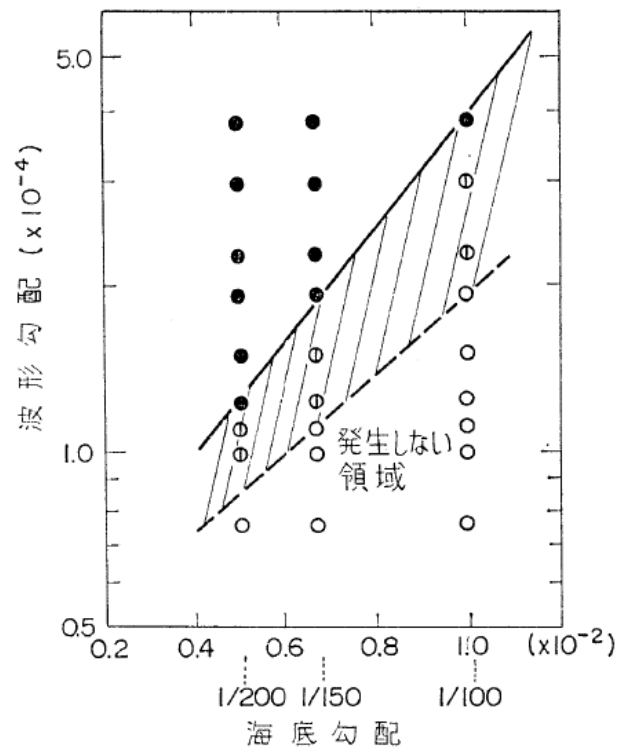


図-8 ソリトン分裂の発生条件の結果整理図

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。

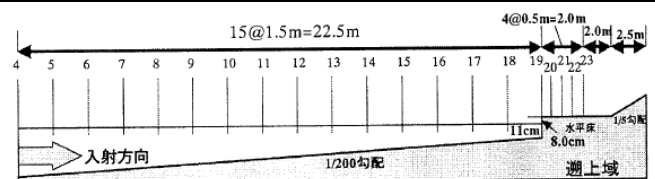
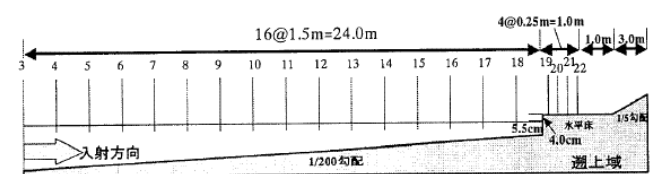
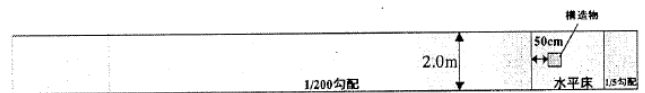


図-1 中型水路断面図と計測点



(1) 断面図



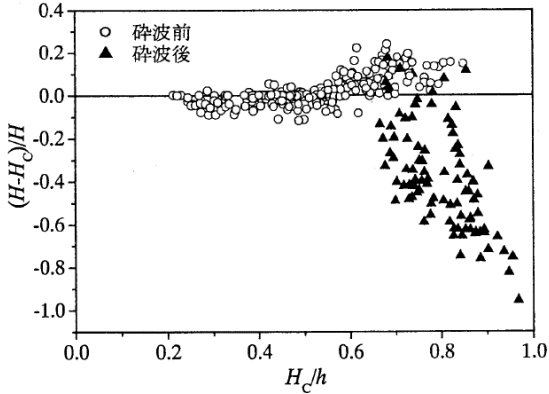
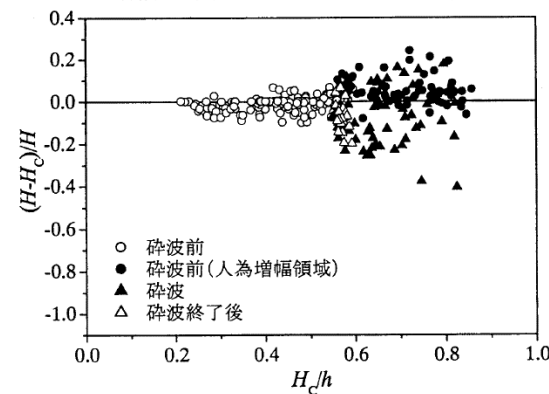
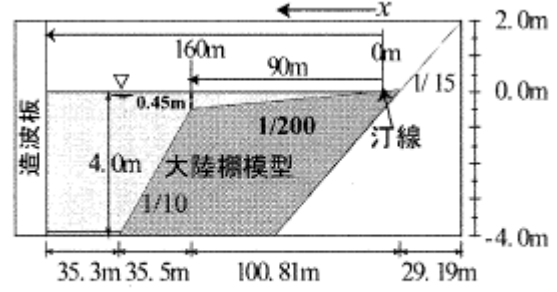
(2) 平面図

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>Wave Generator</p> <p>図-1 実験装置</p> <p>増幅・碎波モデル無</p> <p>増幅・碎波モデル有</p> <p>Case 3</p> <p>Case 9</p> <p>Case 11</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>

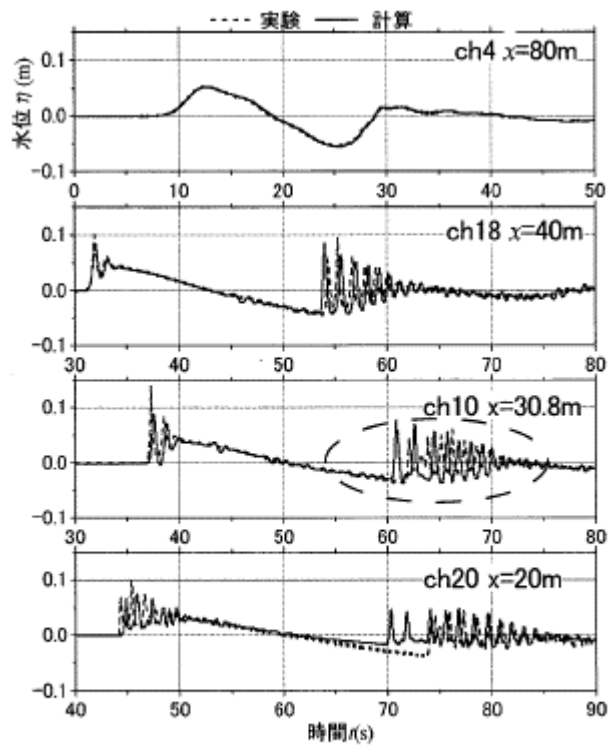


図-3 従来の数値計算モデルによる
数値計算と実験の比較 (No.024)

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。

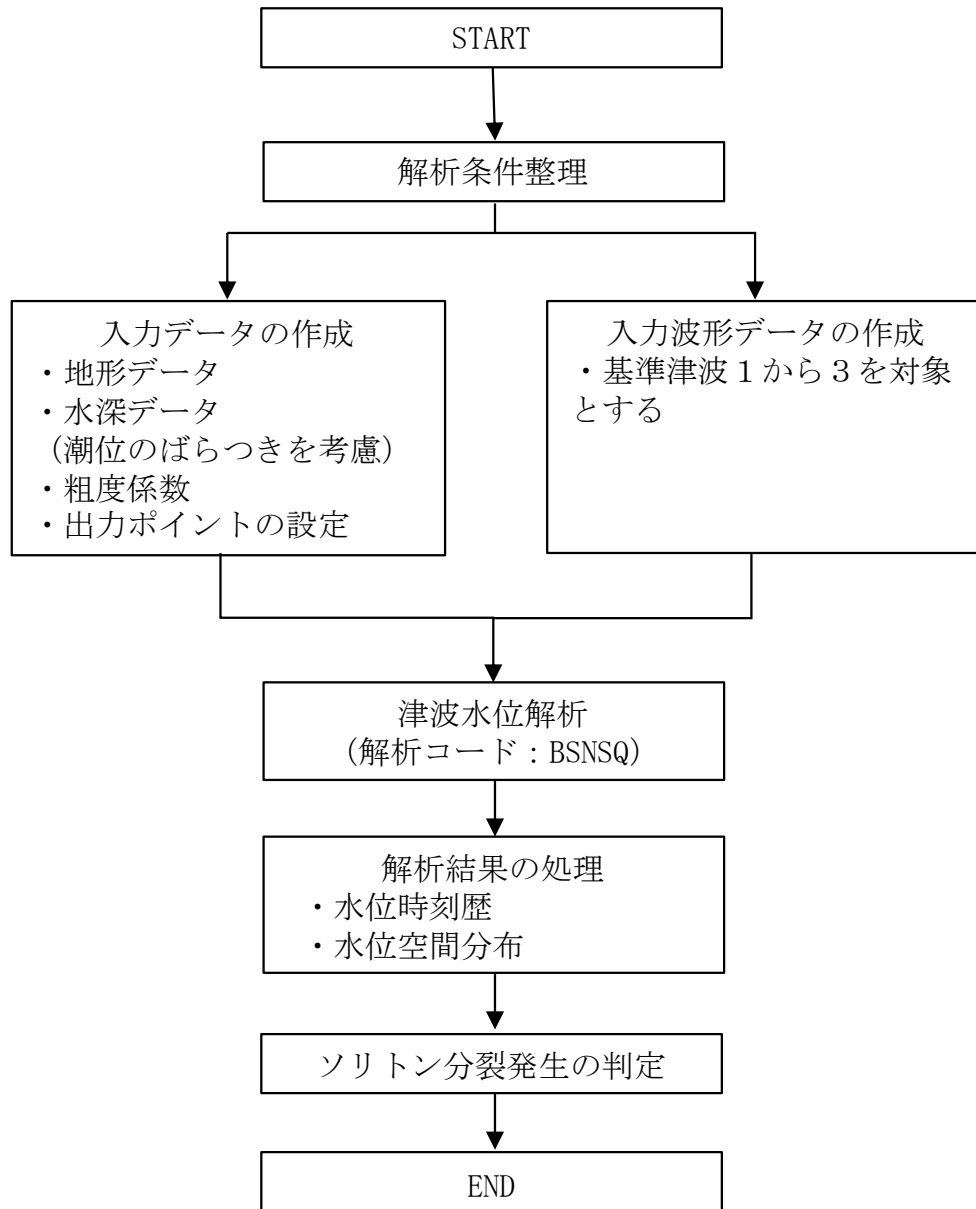


図 4.7 参 4-1 解析フローチャート

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。

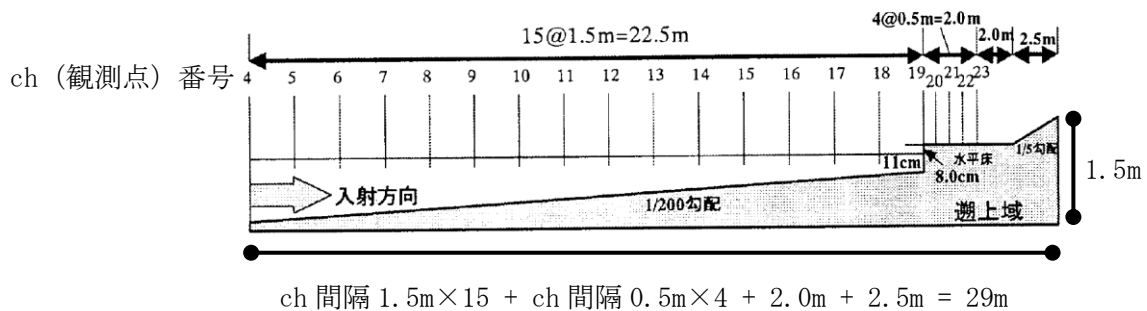


図 4.7 参 4-2 中型水路断面図と計測点 (大森ら(2000))¹⁾に加筆)

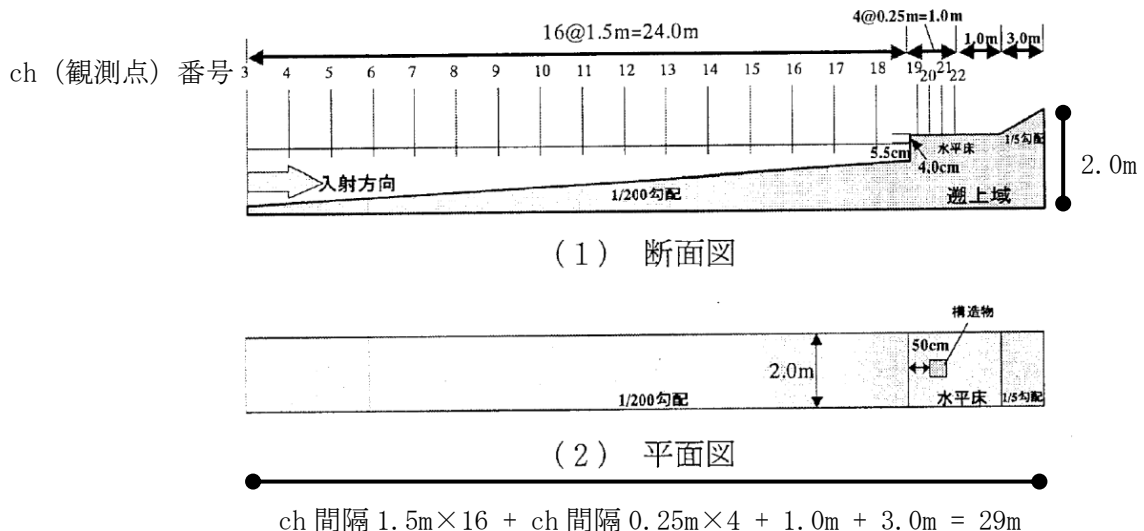


図 4.7 参 4-3 大型水路断面・平面図と計測点 (大森ら(2000))¹⁾に加筆)

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

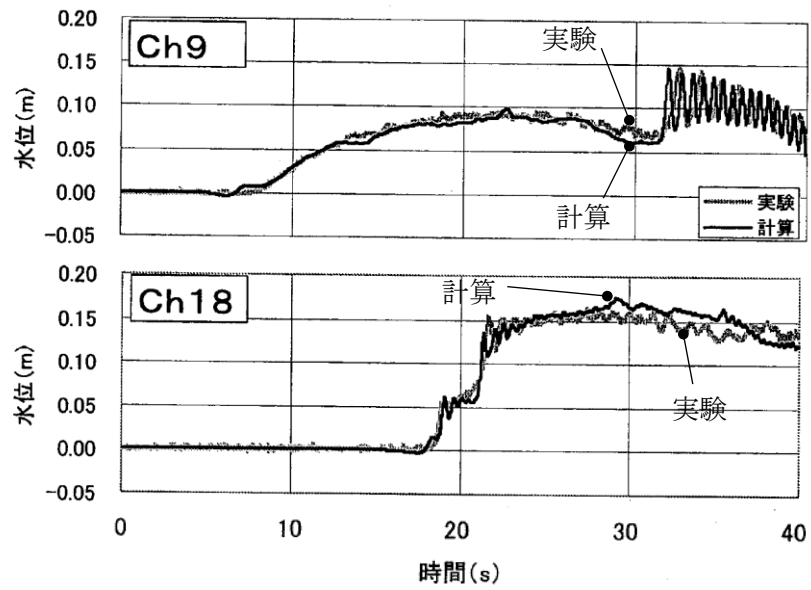


図 4.7 参 4-4 水時刻歴波形 (ケース 1-B) (大森ら(2000)¹⁾に加筆)

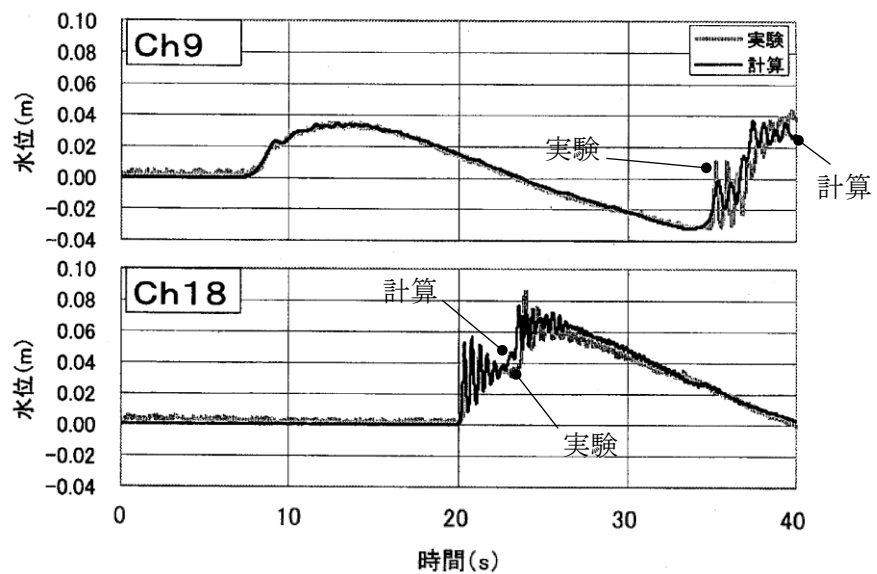


図 4.7 参 4-5 水位時刻歴波形 (ケース 2-B) (大森ら(2000)¹⁾に加筆)

(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と実施内容

- ・ 中型トラック；窓を全開にする，扉を開放する。
- ・ ユニック；窓を全開にする，扉を開放する。
- ・ バキューム車；窓を全開にする，扉を開放する，タンク蓋を開放する（図 4.7-添 2-1 参照）

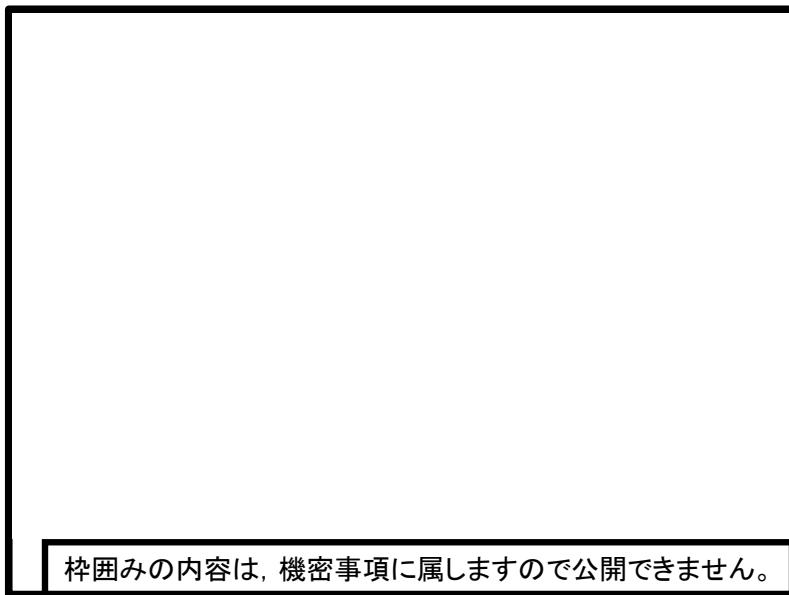
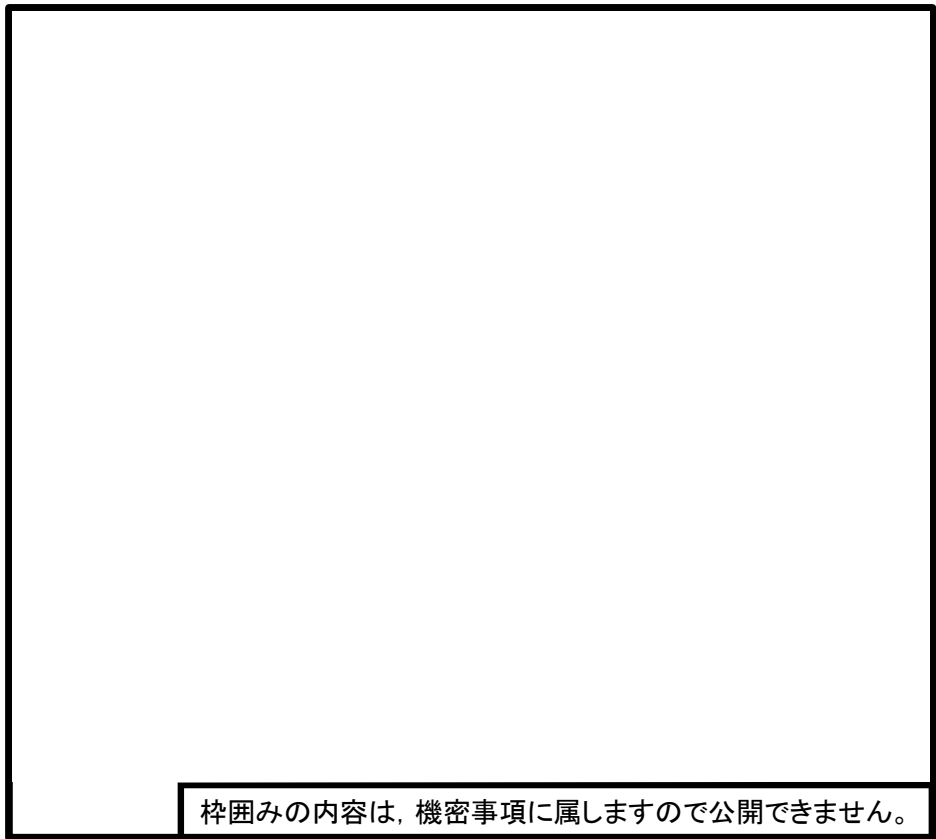
2. 運用の前提条件

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。

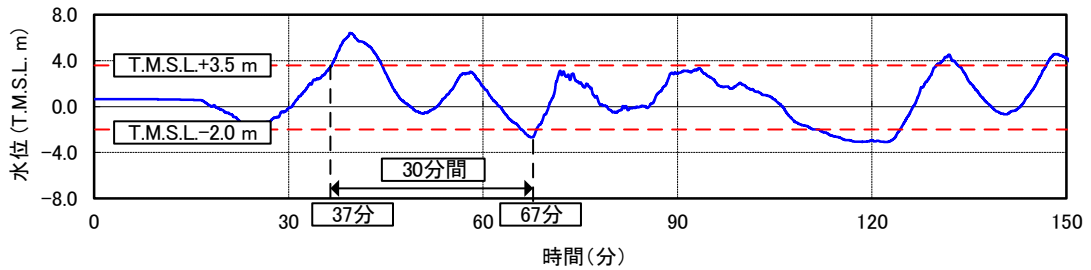


タンクカバー開放手順
① (C)カバー手動ロックを解除
②運転席にてパワーテイクオフスイッチオン
③(D)カバー開放レバー操作
※開放完了まで約5分

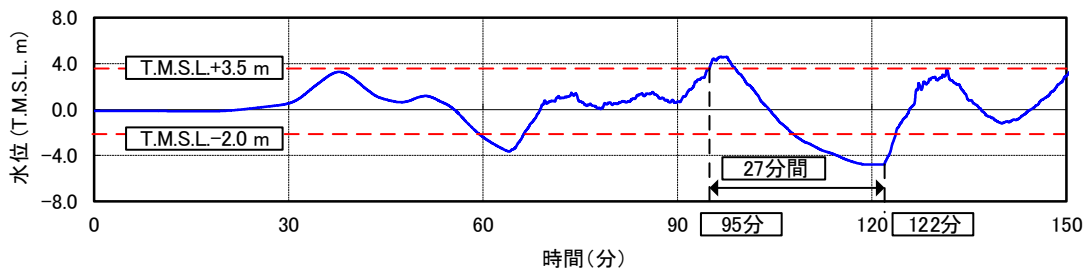
図 4.7-添 2-1 バキューム車退避時タンク蓋開放イメージ

4. 基準津波の特性

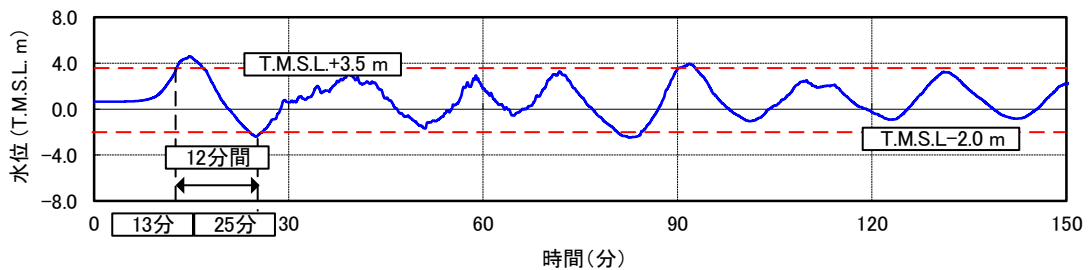
大湊側護岸部に駐停車する車両が津波時に海水貯留堰に衝突するためには、押波で車両が漂流を開始し、その後の引き波で海洋に流出し、その後の押波で衝突するというプロセスを踏む必要がある。基準津波の各波形を確認すると、大湊側護岸部の浸水深さが 50cm 以上（津波高さが T.M.S.L. +3.5m 以上）となってから、T.M.S.L. -2.0m*以下まで水位が下がった後に押波に切り替わるまでの周期は最短でも 12 分程度要する。（図 4.7-添 2-2 参照）



基準津波 1



基準津波 2



基準津波 3

図 4.7-添 2-2 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

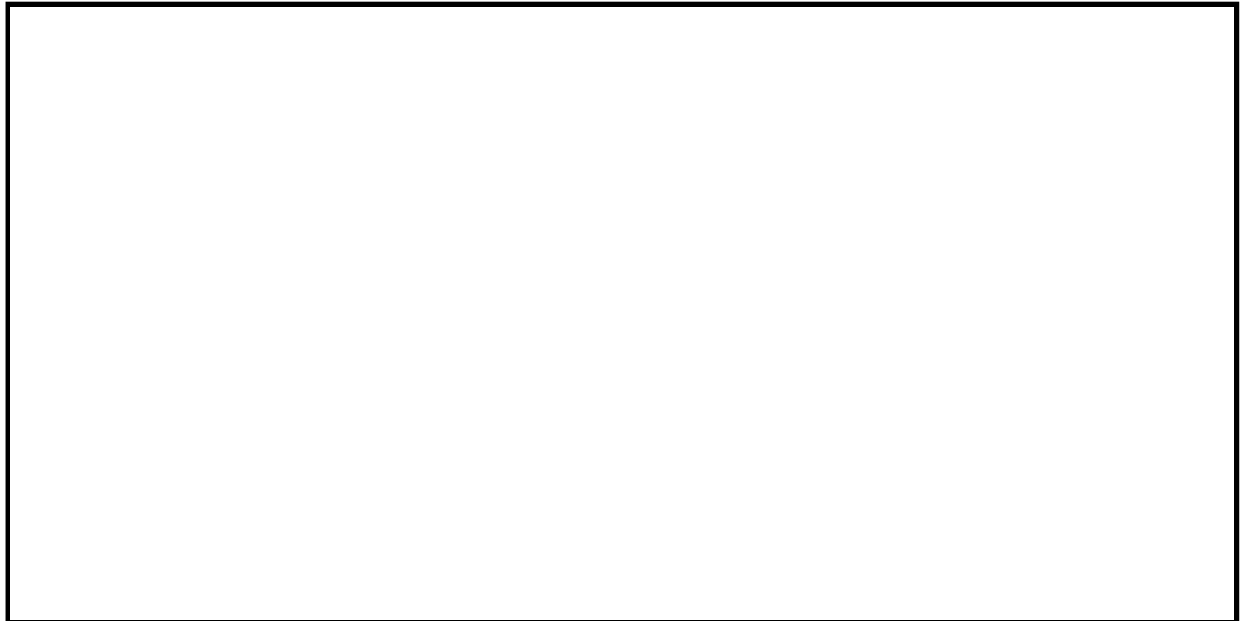


図 4.7-添 3-1 スキッドローダーの構造例

図 4.7-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 4.7-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

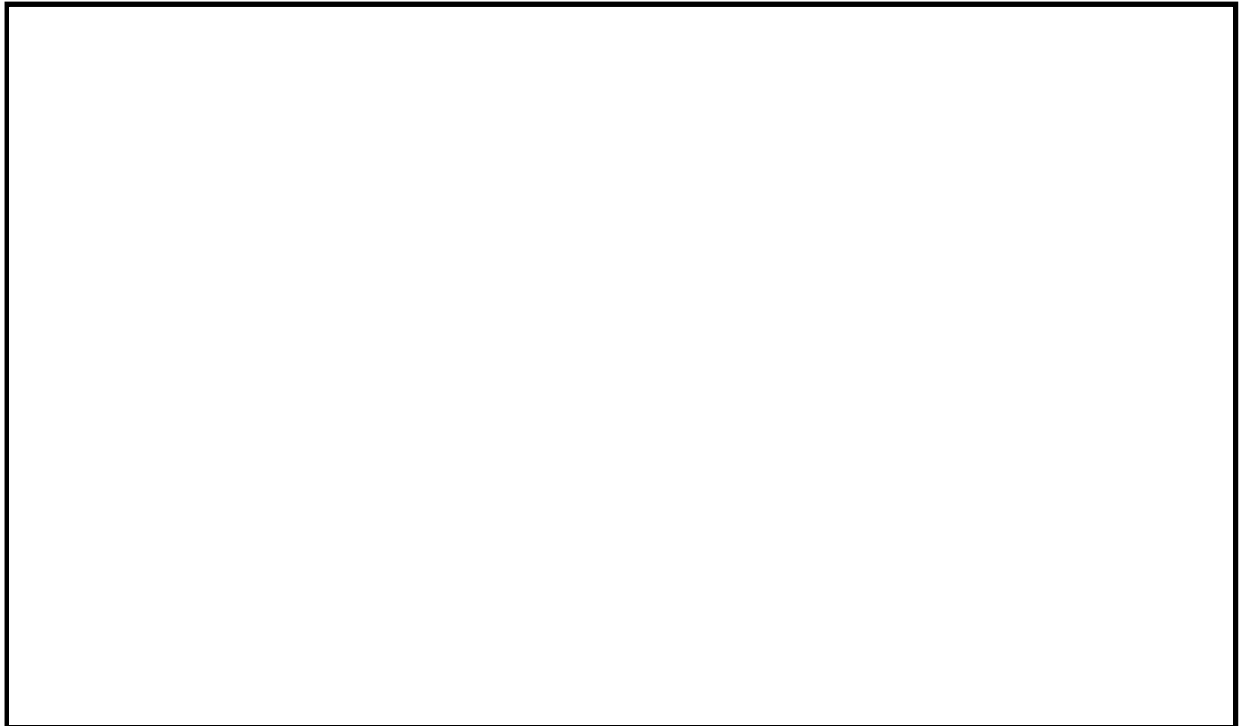


図 4.7-添 3-4 軽自動車の構造例

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 4.7-添 3-5 軽自動車の密度算定例

2.3 乗用車

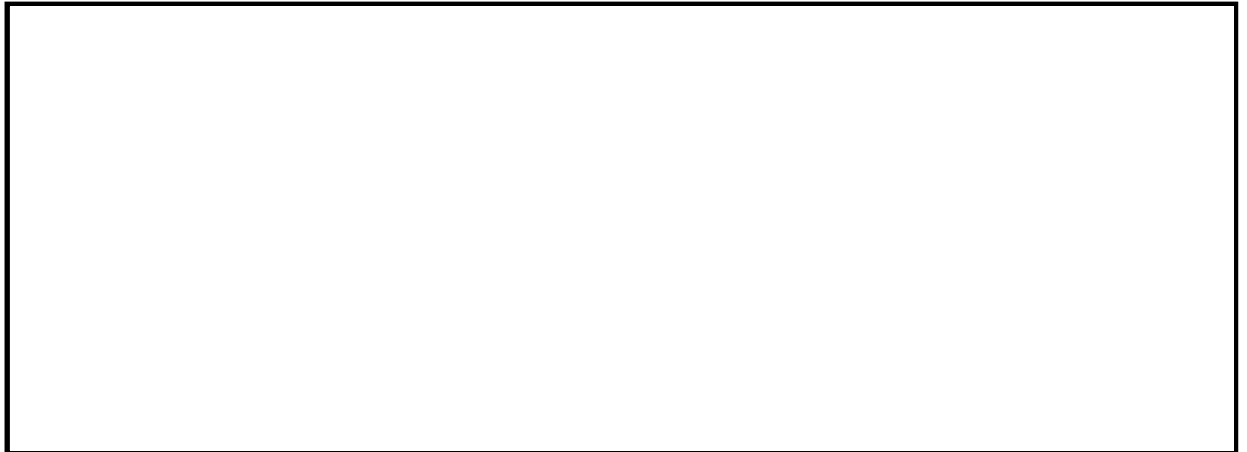


図 4.7-添 3-6 乗用車の構造例

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 4.7-添 3-7 乗用車の密度算定例

2.4 中型トラック

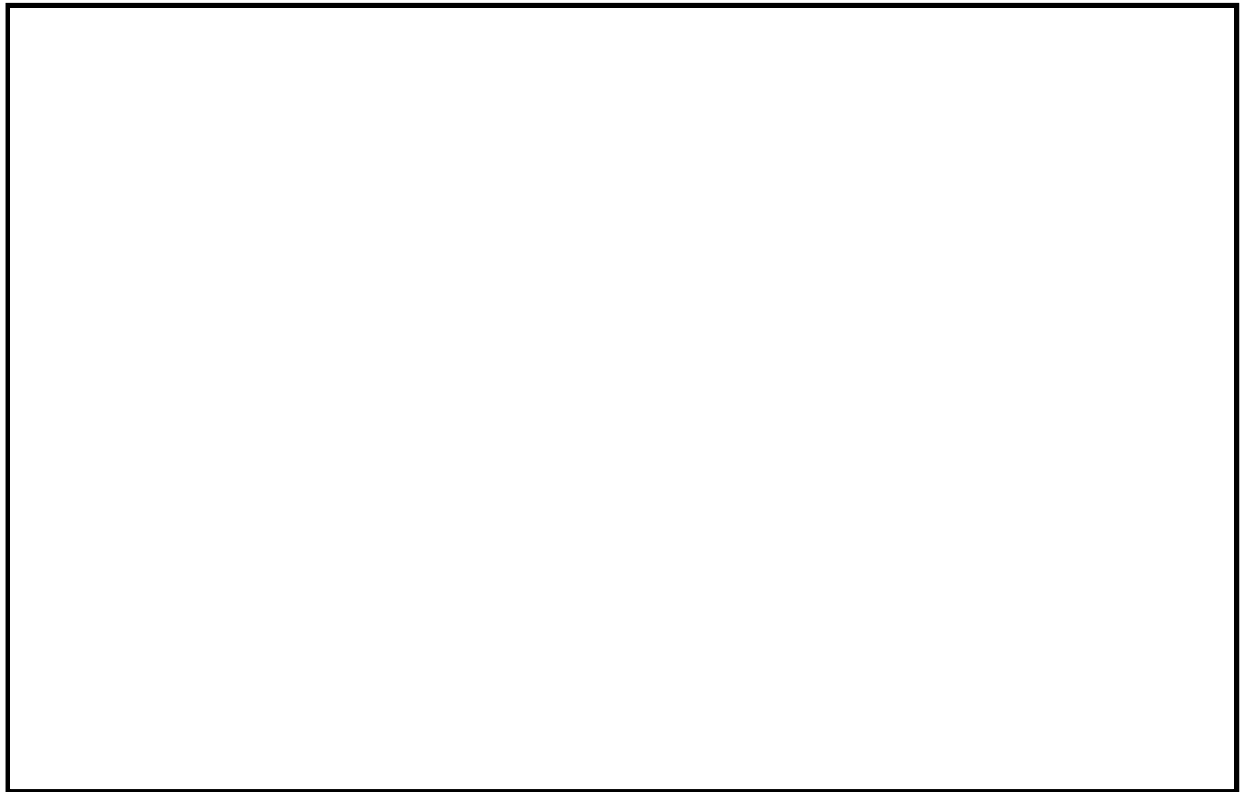


図 4.7-添 3-8 4t トラックの構造例

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 4.7-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

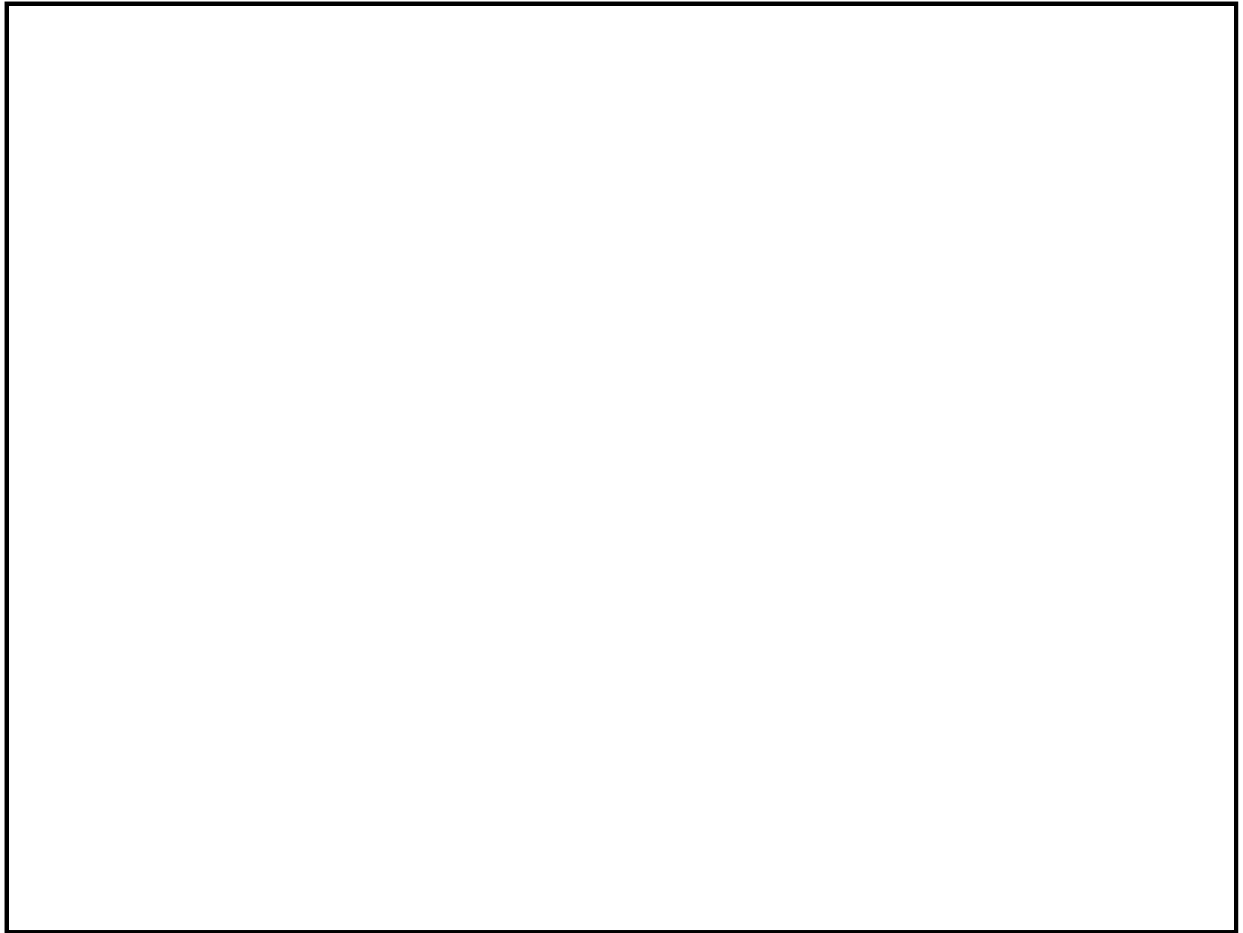


図 4.7-添 3-10 4t ユニックの構造例

密度算定方法	⑤車両重量[t]	⑥部材密度[t/m³]	⑦体積[m³]	⑧除外体積[m³]	車両密度[t/m³]
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[m³]							車両密度 [t/m³]
	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 4.7-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

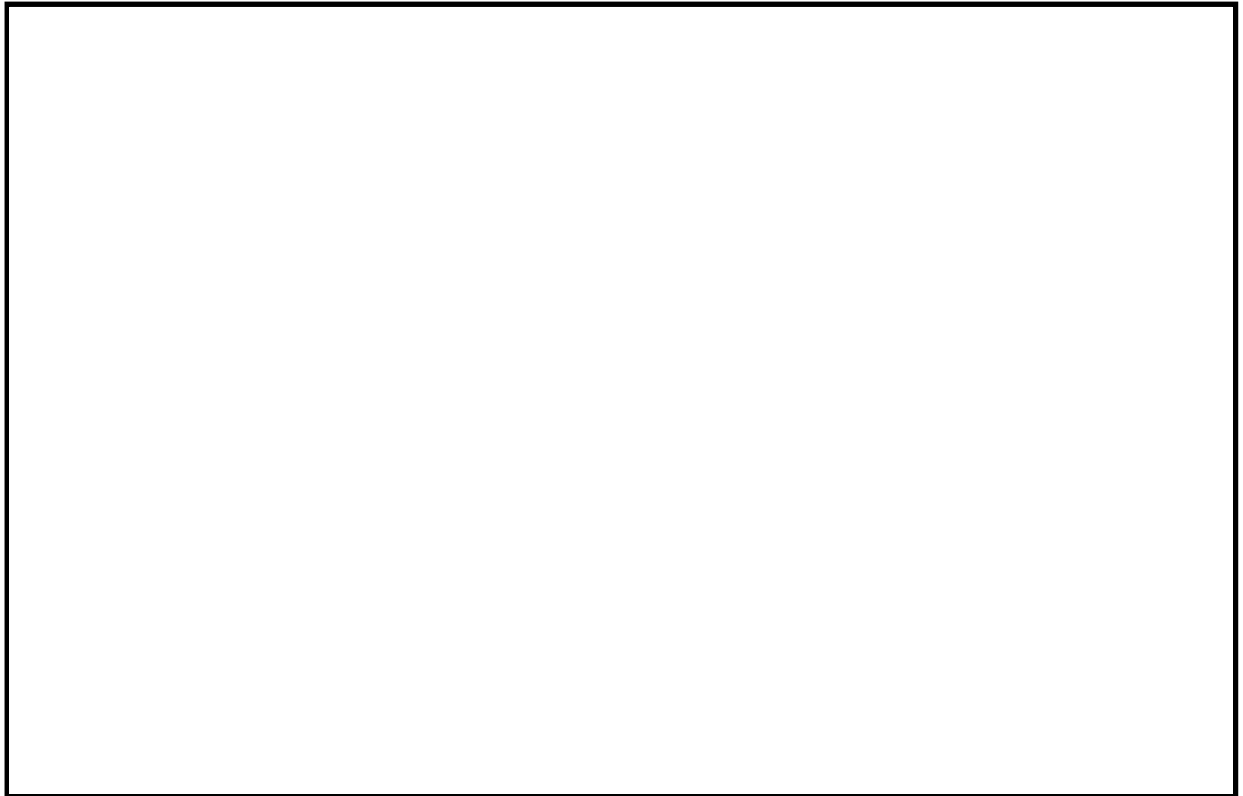


図 4.7-添 3-12 15t トラックの構造例

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 4.7-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

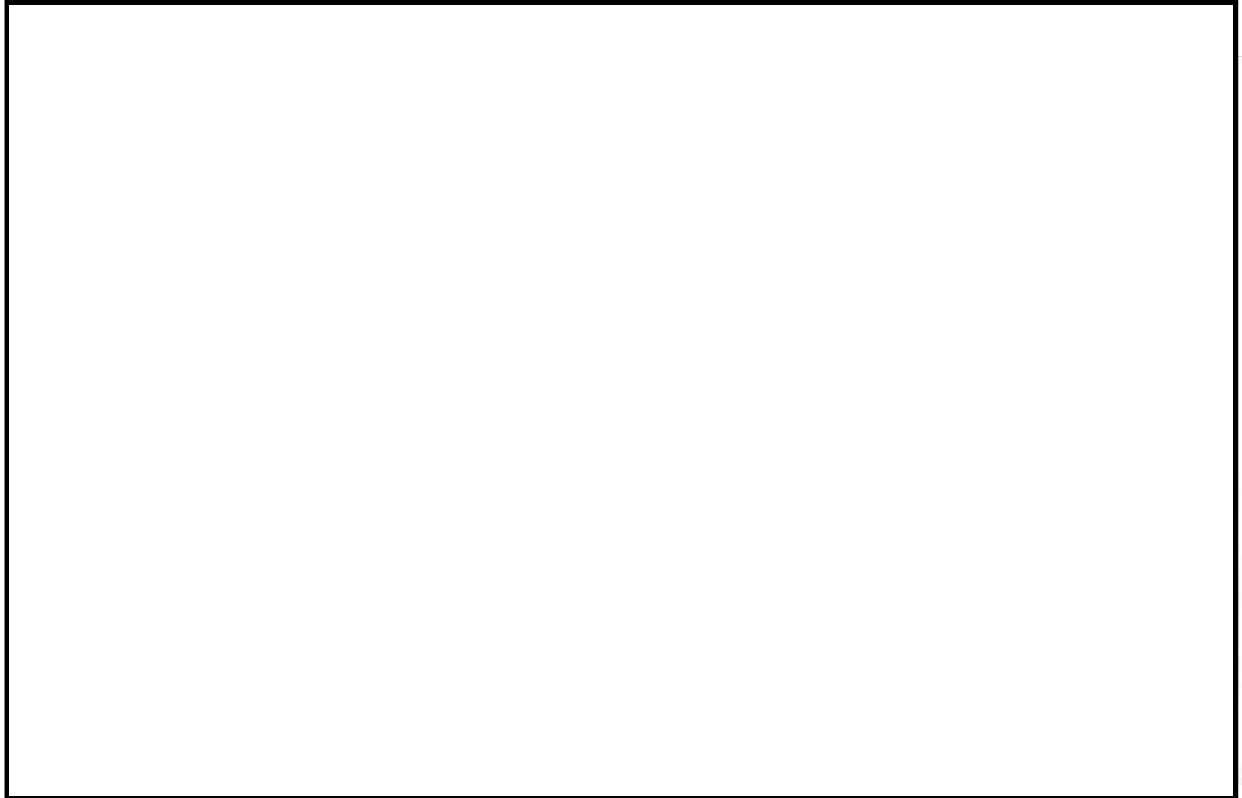


図 4.7-添 3-14 バキューム車の構造例

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 4.7-添 3-15 バキューム車の密度算定例

2.8 大型建設用車両

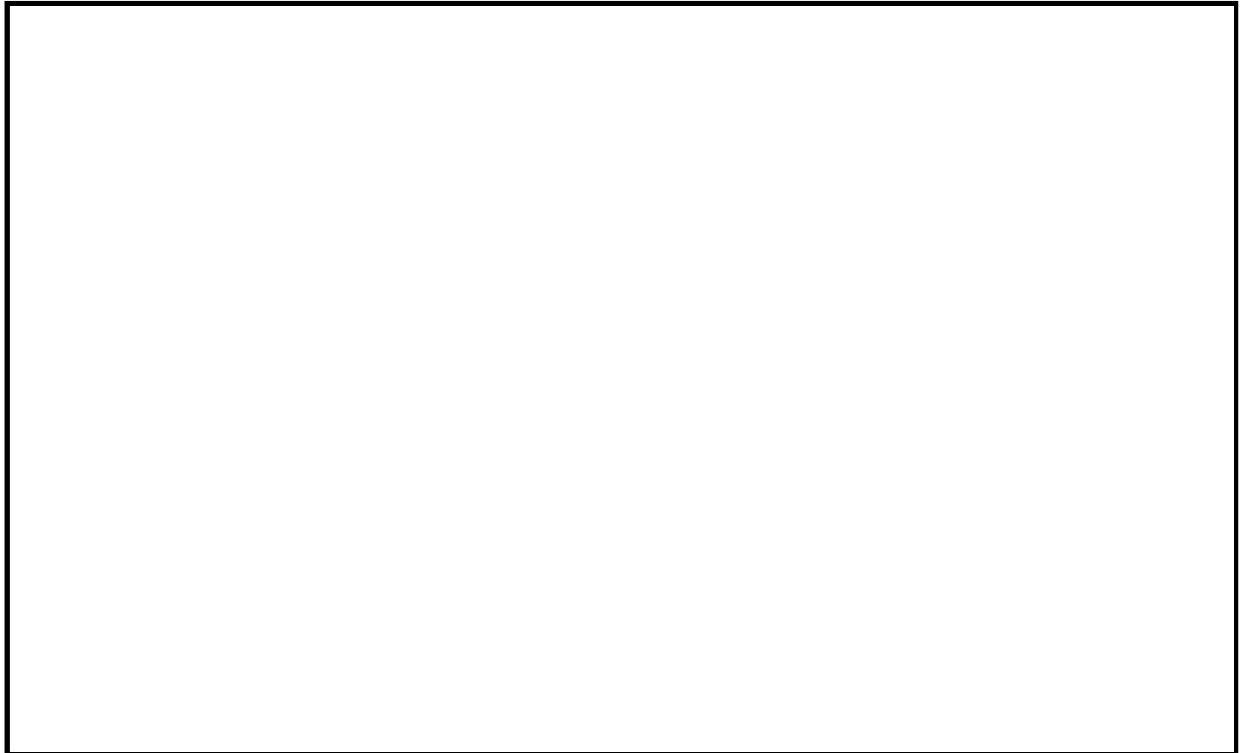


図 4.7-添 3-16 4tトラック式高所作業車の構造例

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 4.7-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、

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

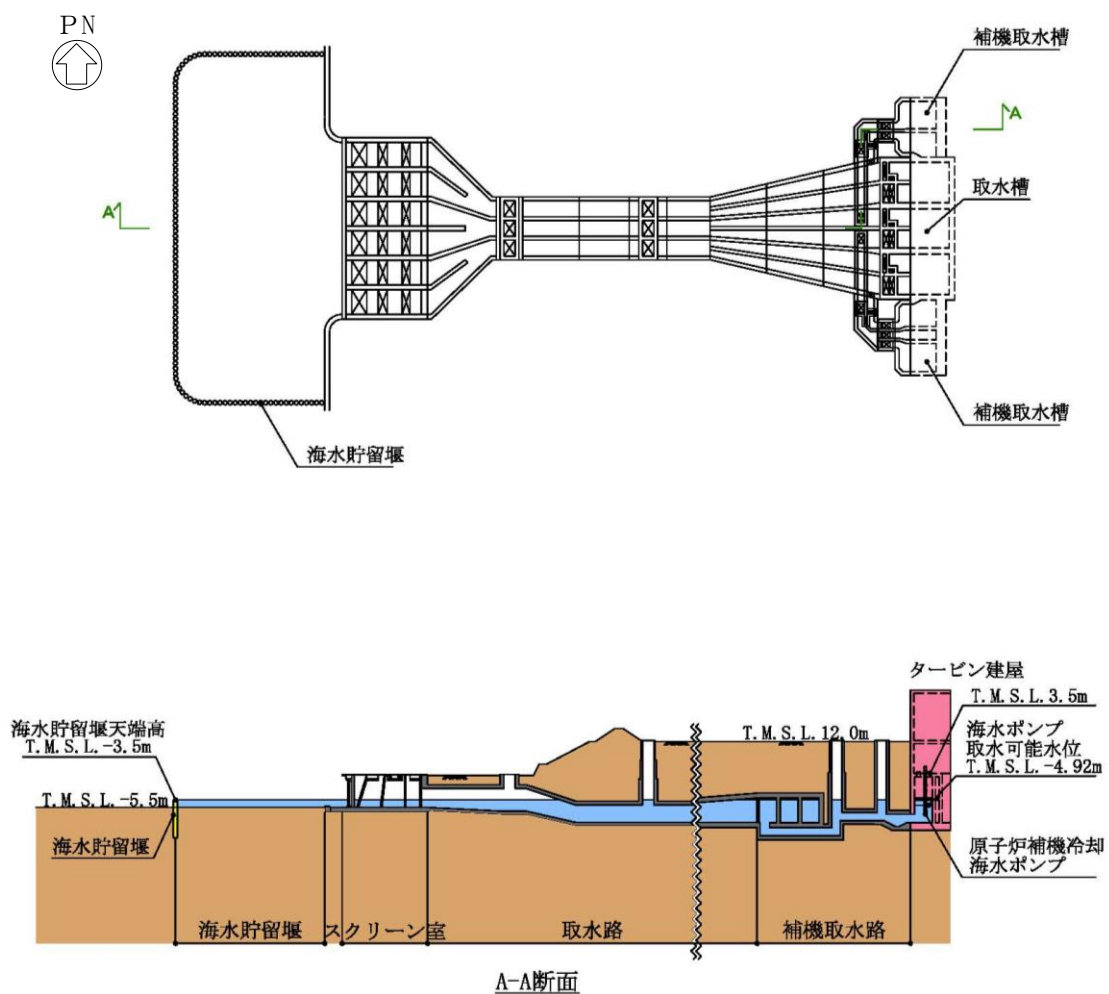
5.3 スロッシングによる海水貯留堰貯水量に対する影響評価について

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

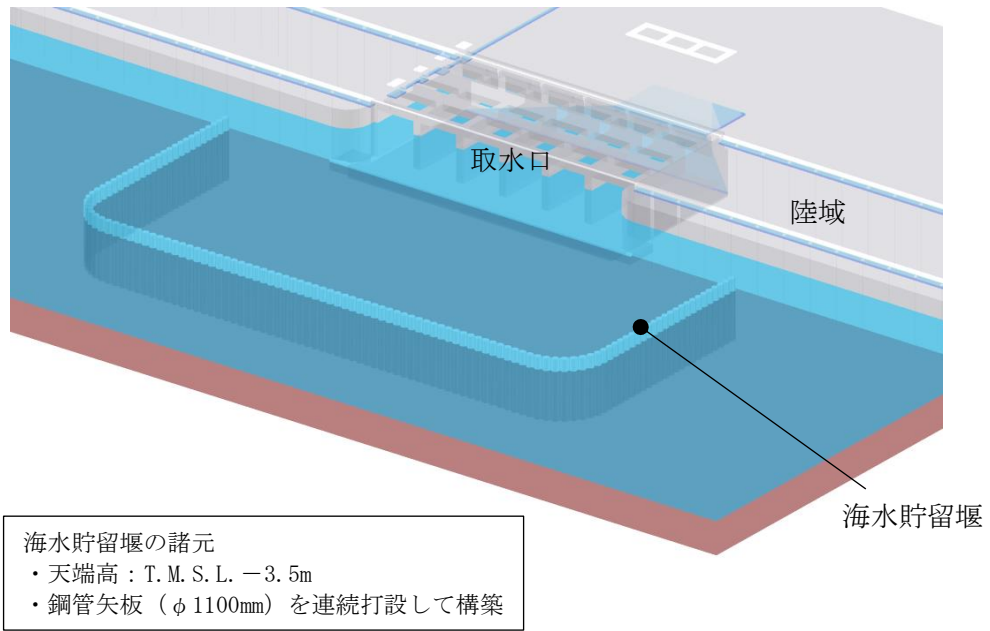


図 5.3-2 海水貯留堰鳥瞰図

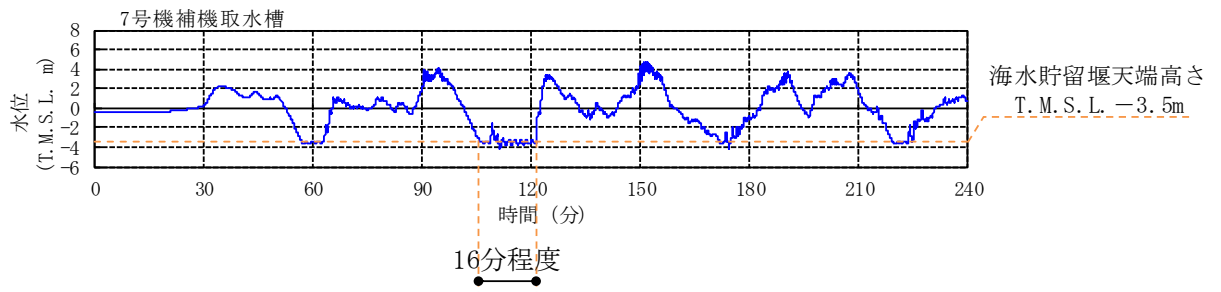


図 5.3-3 補機取水槽内の水位時刻歴

(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。

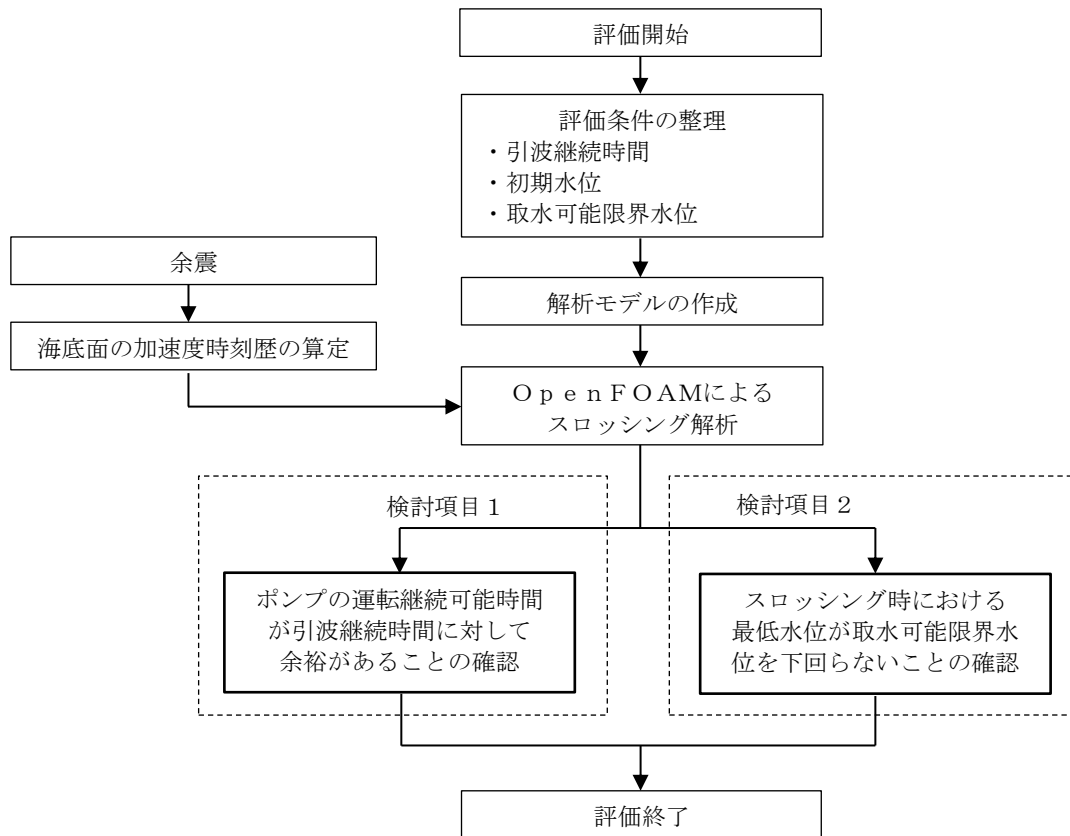


図 5.3-4 評価フロー

(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。

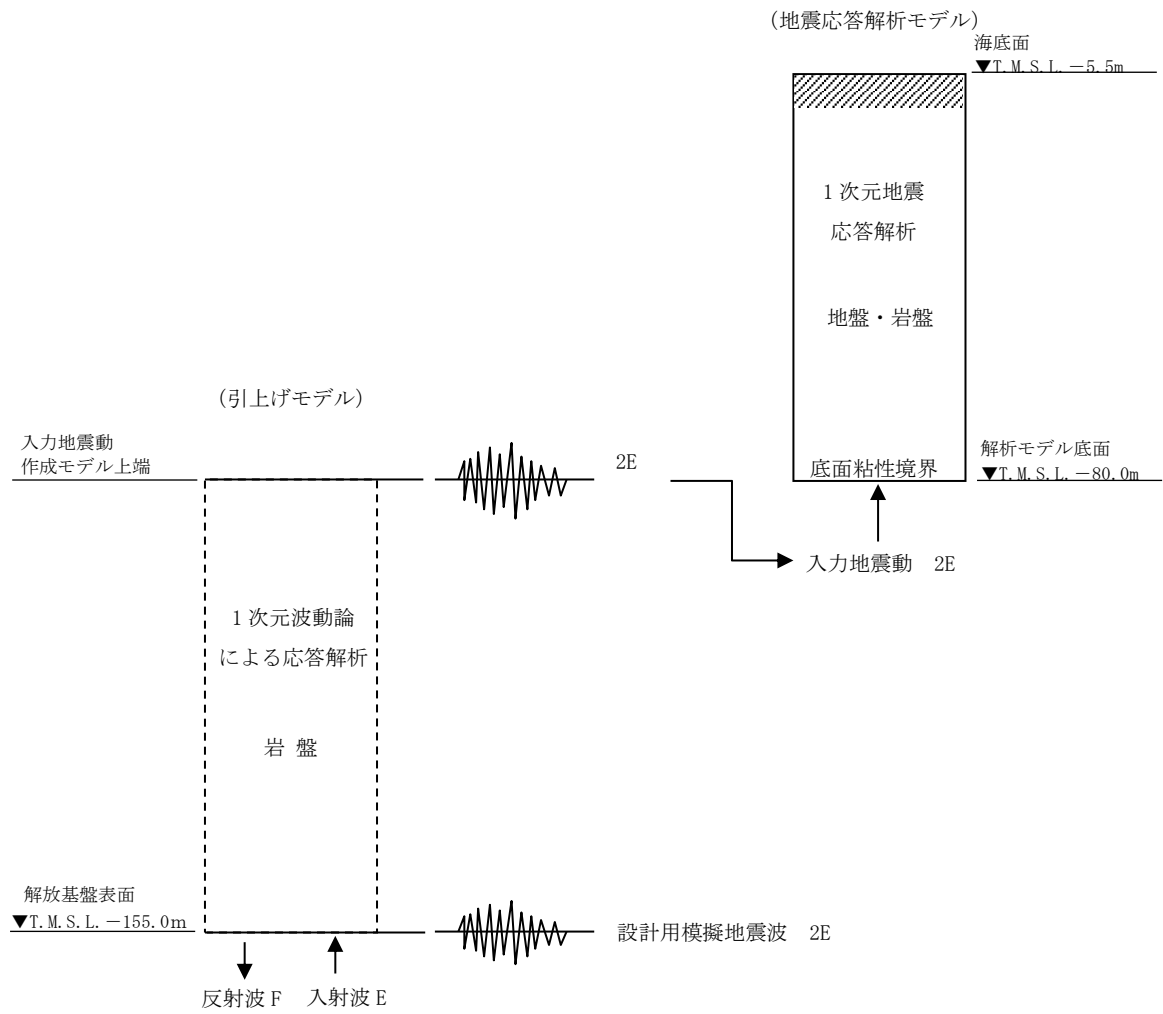
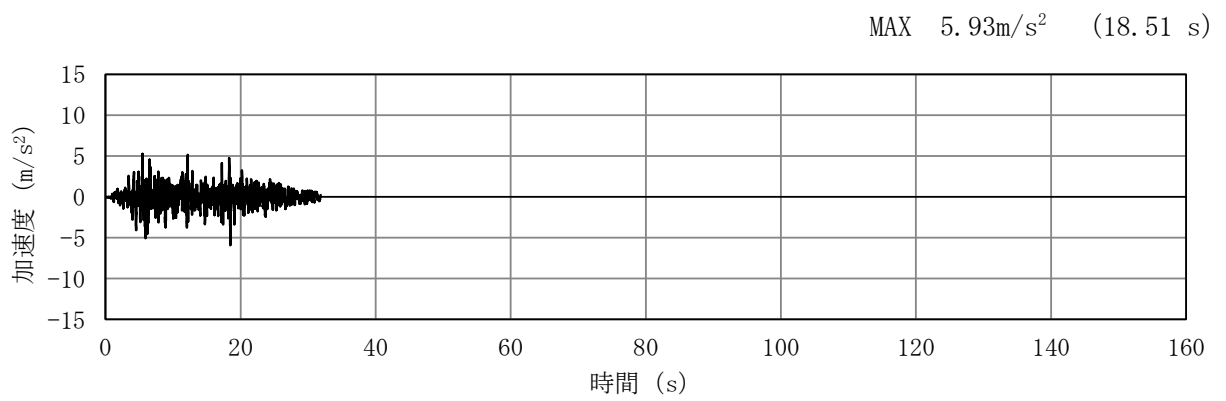
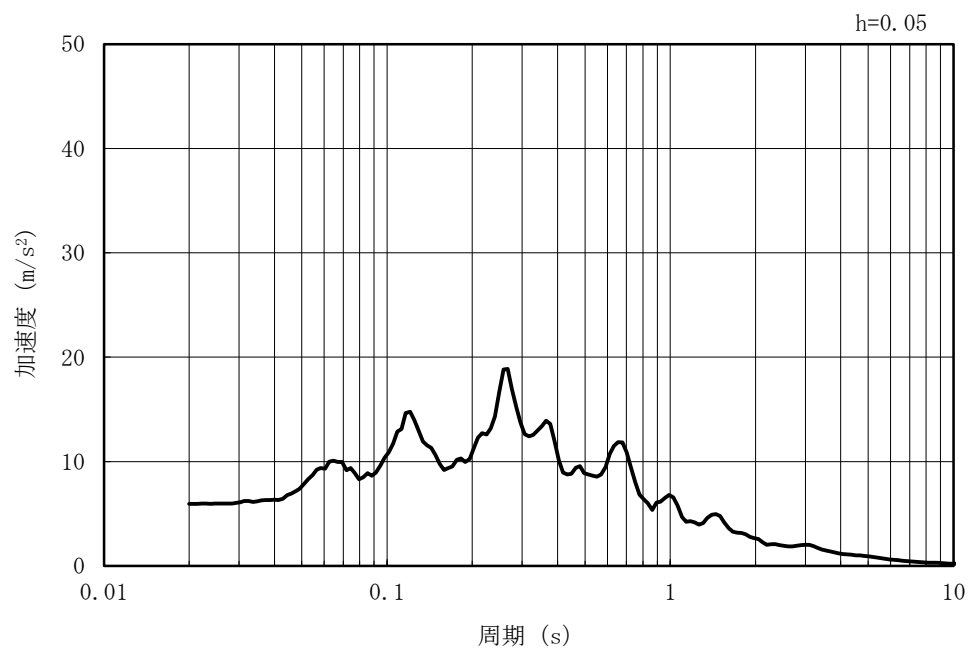


図 5.3-5 入力地震動算定の概念図

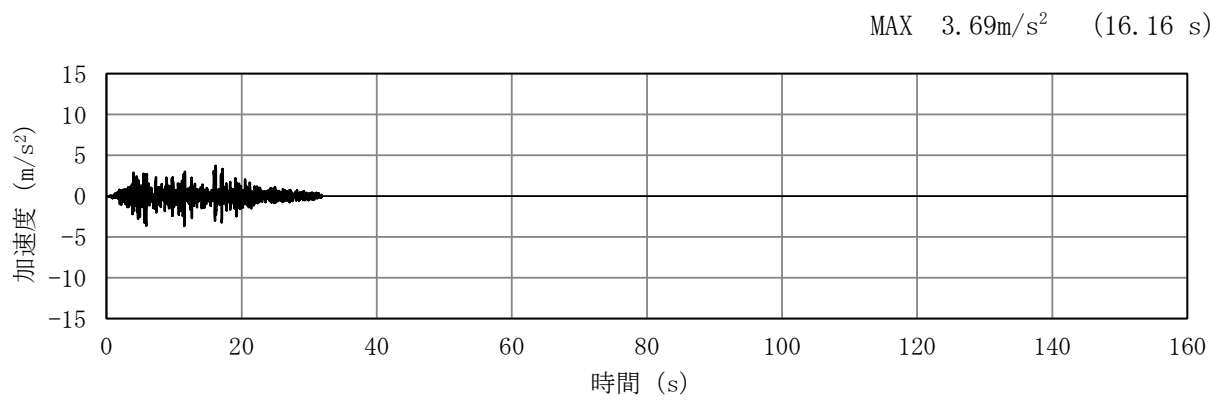


(a) 加速度時刻歴波形

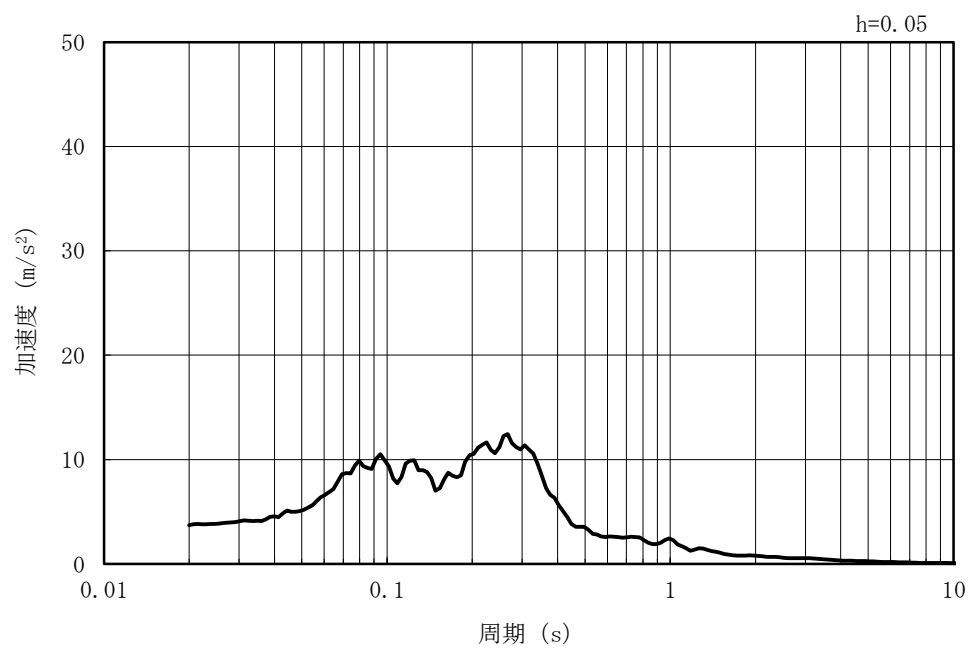


(b) 加速度応答スペクトル

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。

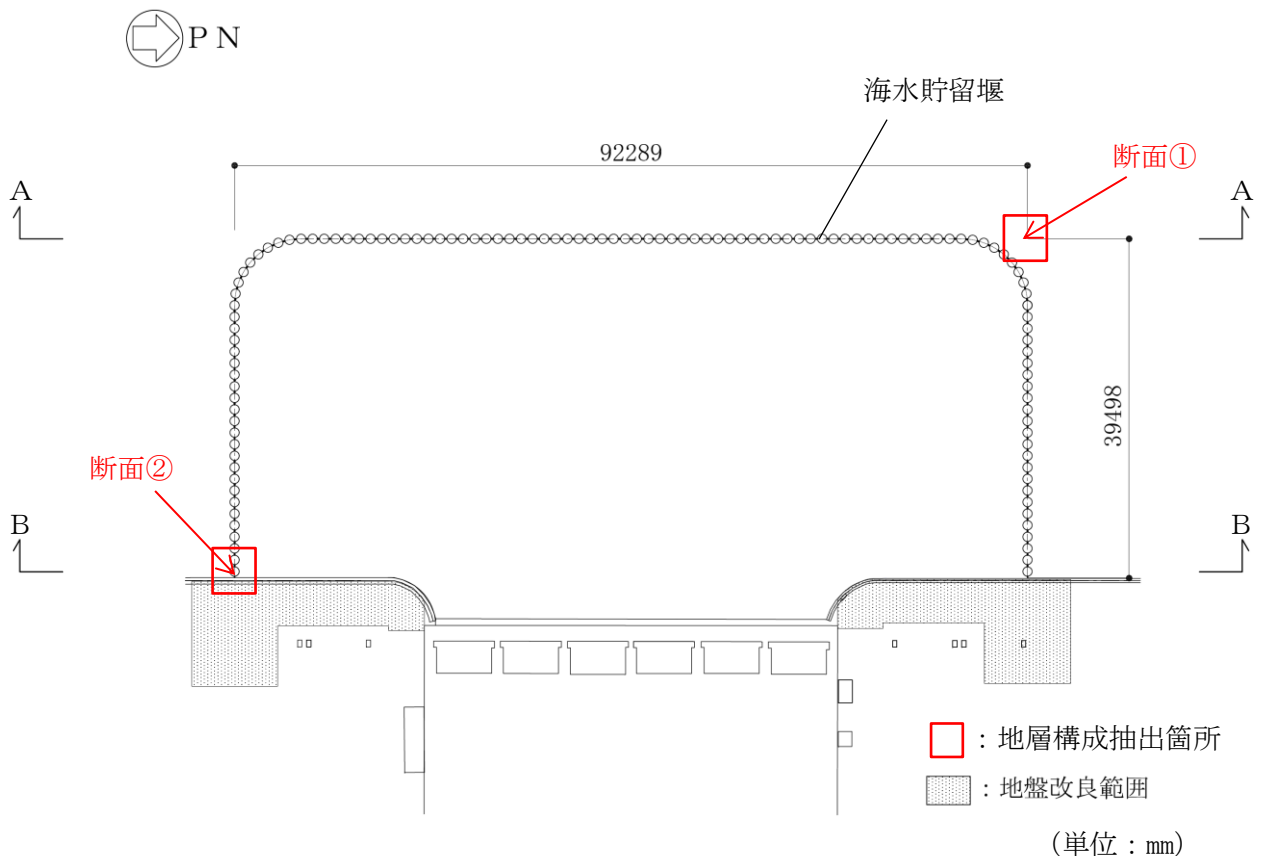


図 5.3-8 評価対象断面位置図

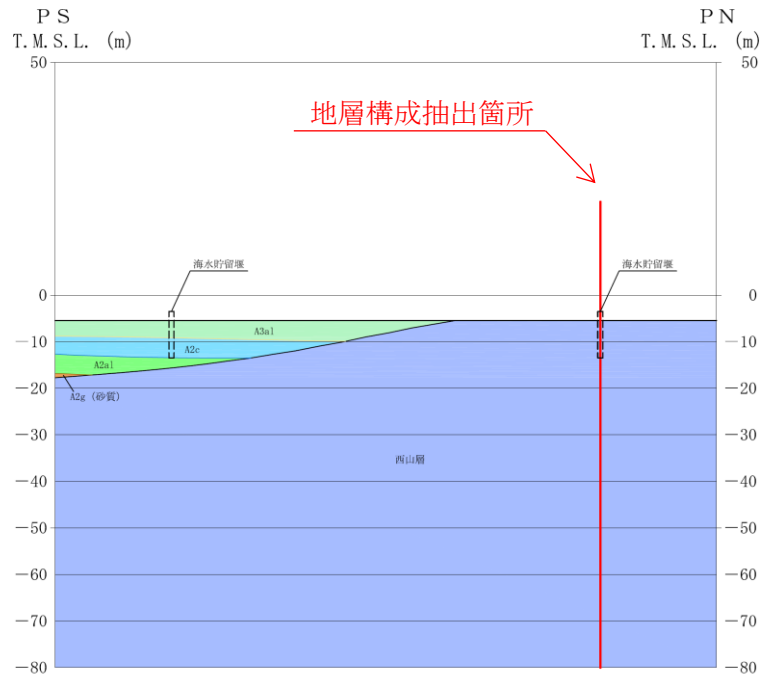


图 5.3-9 地質断面图 (A-A 断面图)

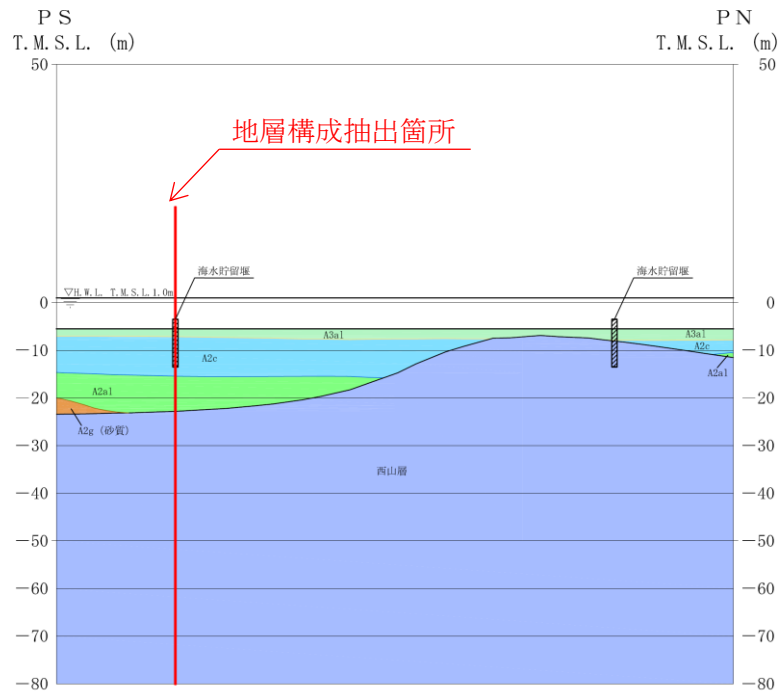
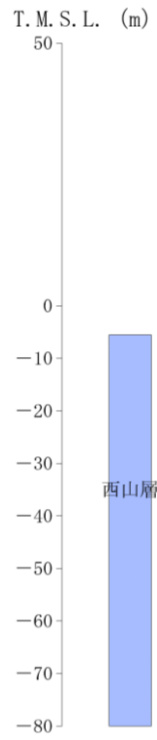
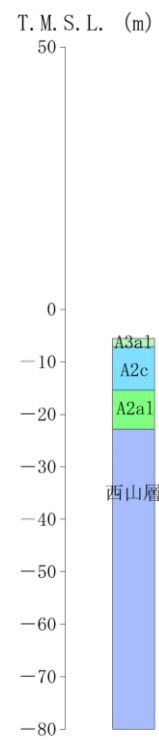


图 5.3-10 地質断面图 (B-B 断面图)



(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)

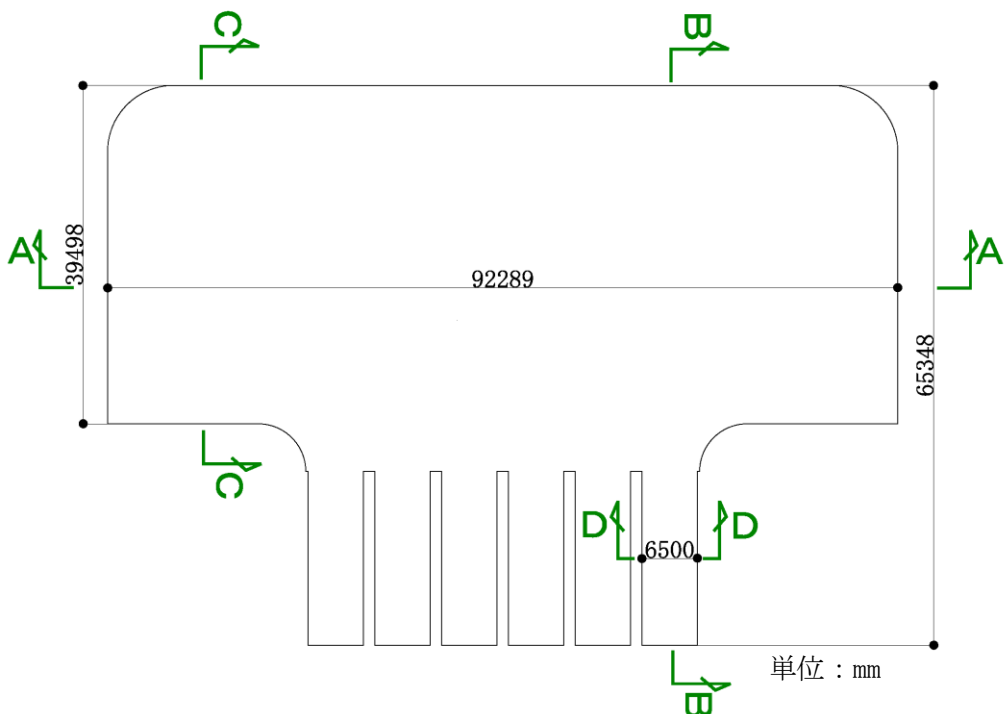


図 5.3-12 水槽形状の考え方

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「JEAG4601-1987 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。

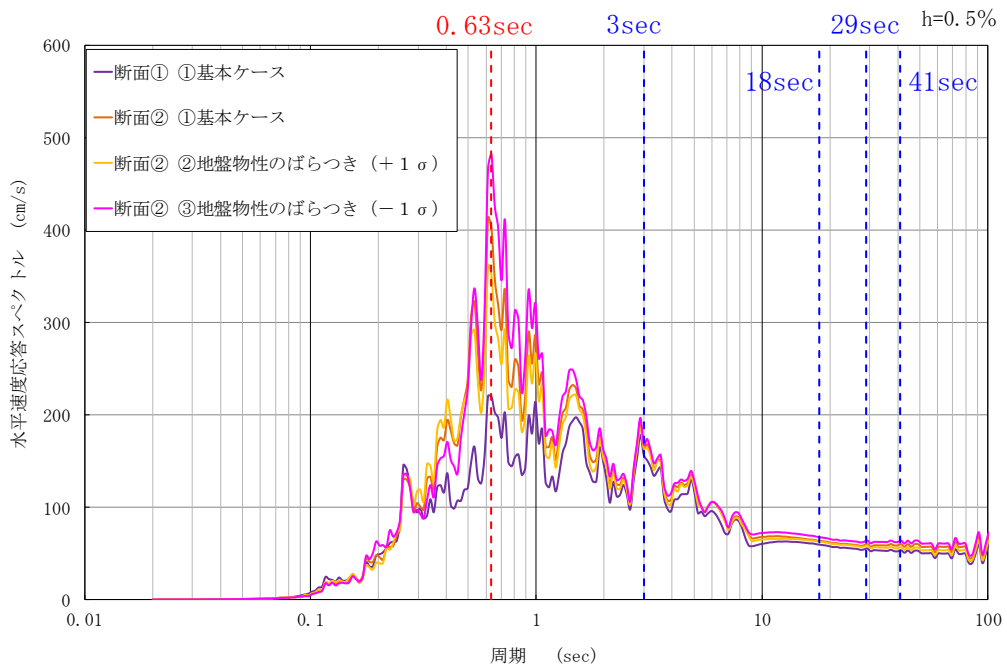


図 5.3-13 速度応答スペクトル (水平方向)

(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。

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

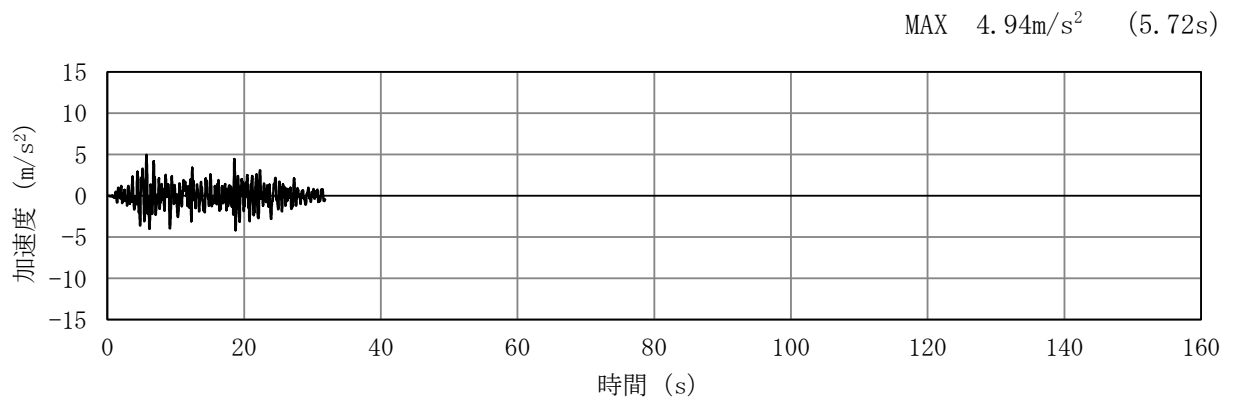
$$\begin{aligned}
 \text{16分間原子炉補機冷却海水ポンプによる取水が行われた場合の水位} \\
 &= \text{海水貯留堰天端高} - \text{16分間の水位低下量} \\
 &= \text{T.M.S.L.} - 3.5\text{m} - 0.626\text{m} \\
 &= \text{T.M.S.L.} - 4.126\text{m} \rightarrow \underline{\text{T.M.S.L.} - 4.13\text{m}}
 \end{aligned}$$

表 5.3-5 初期水位の設定

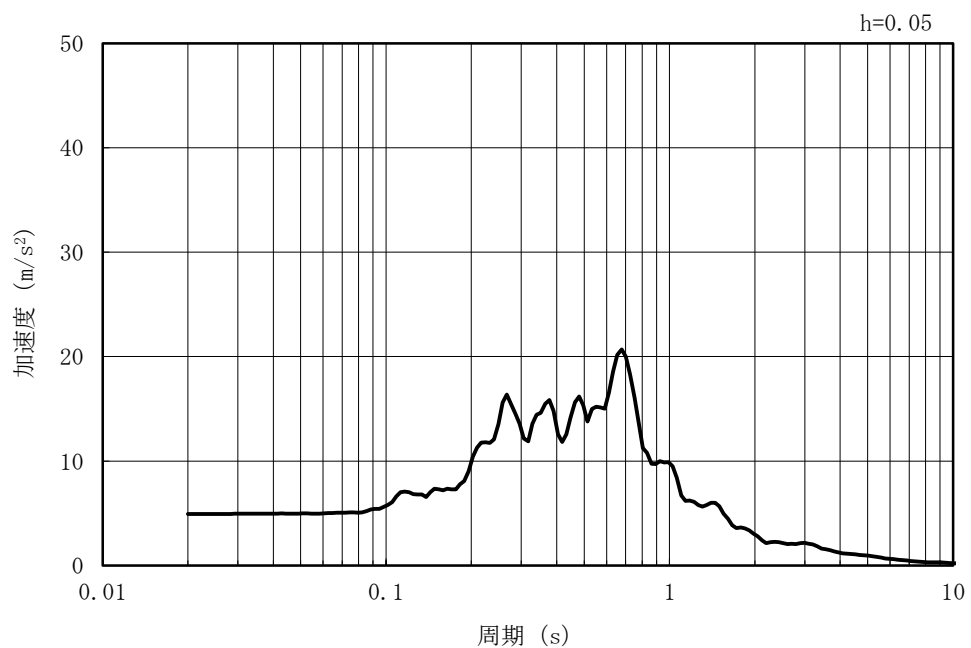
対象検討項目	初期水位	備考
検討項目1：貯水量が確保されることを確認	T.M.S.L. -3.5m	海水貯留堰天端標高
検討項目2：取水可能限界水位を下回らないことを確認	T.M.S.L. -4.13m	16分間原子炉補機冷却海水ポンプによる取水が行われた場合の水位

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。

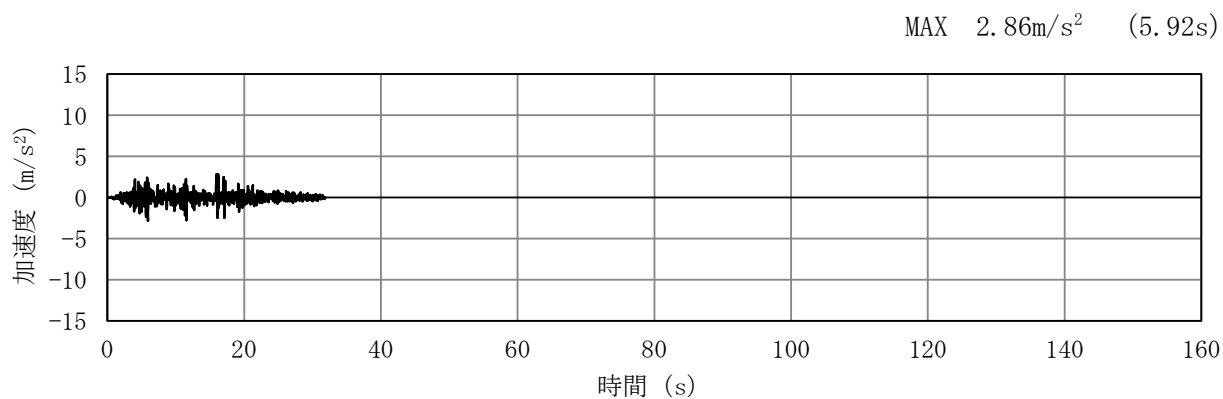


(a) 加速度時刻歴波形

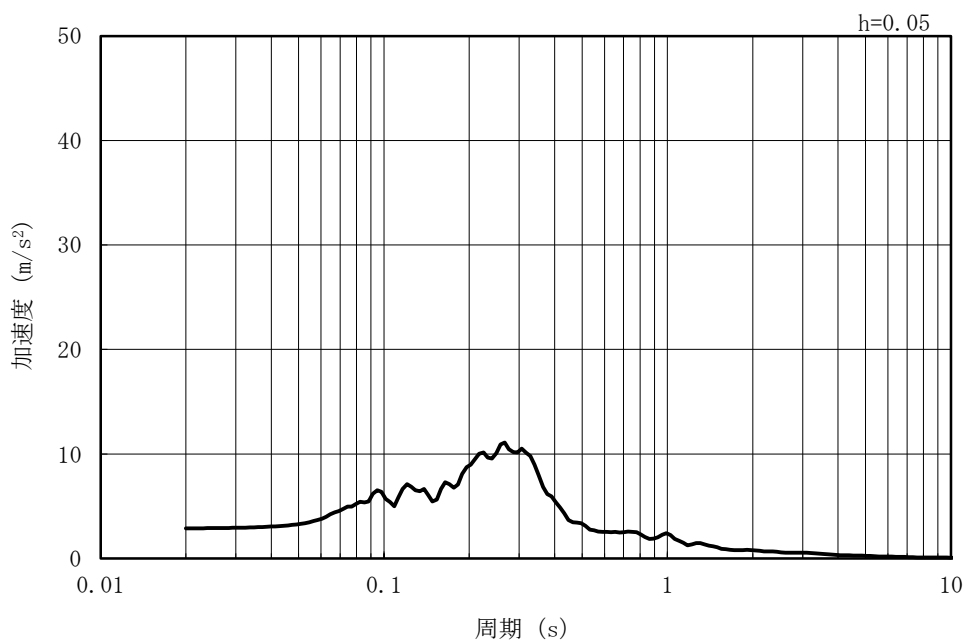


(b) 加速度応答スペクトル

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。

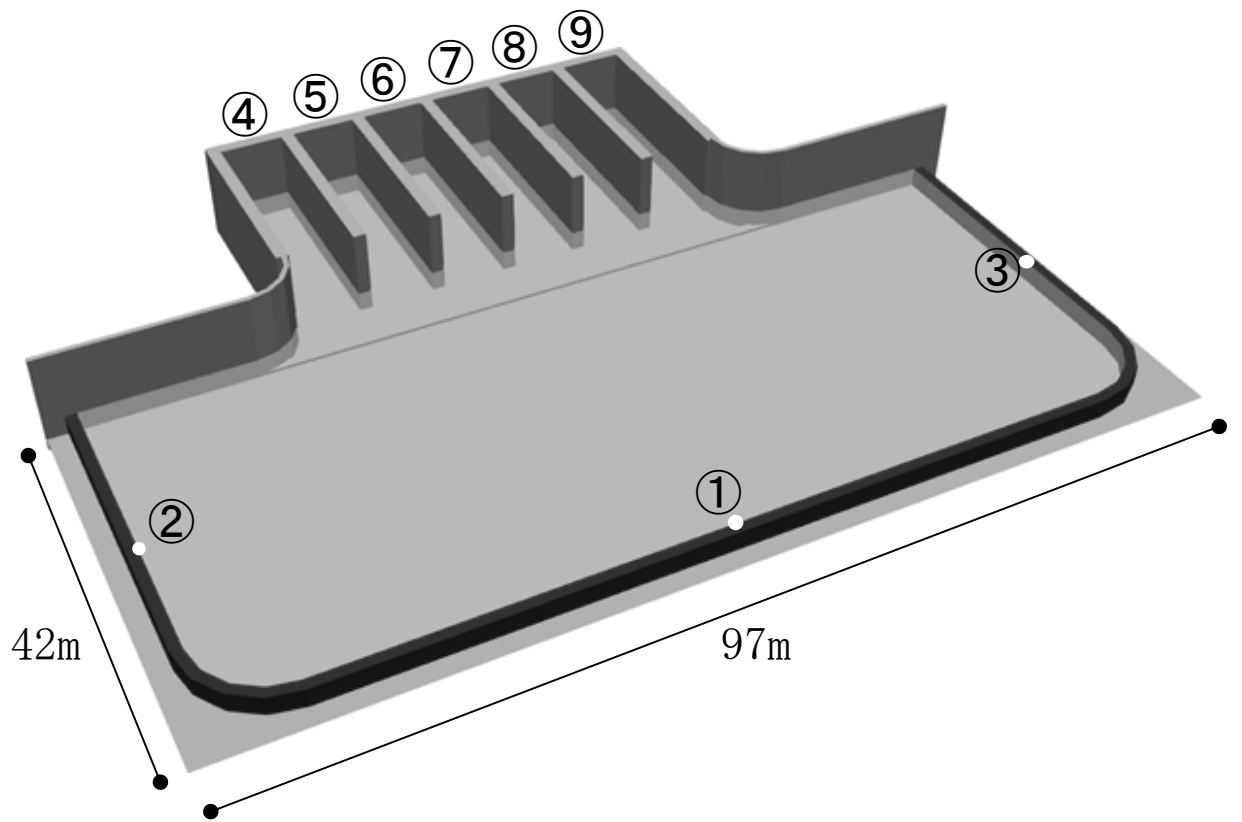


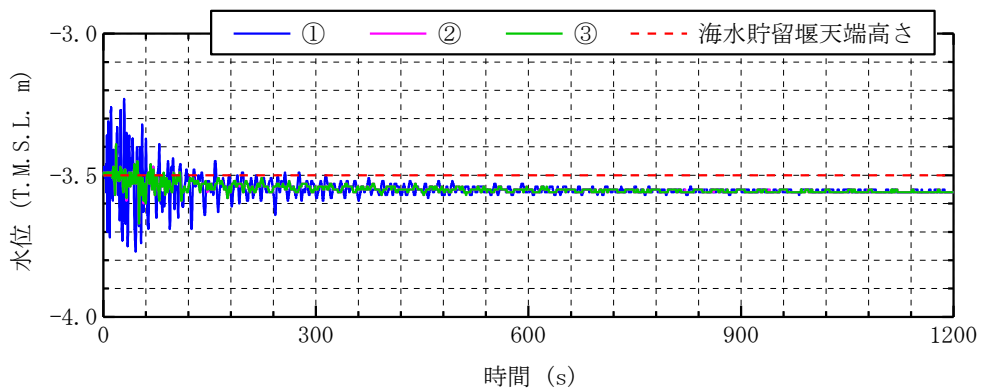
図 5.3-16 スロッシング解析モデル(OpenFOAM) (①～⑨は水位抽出位置)

d. 解析結果

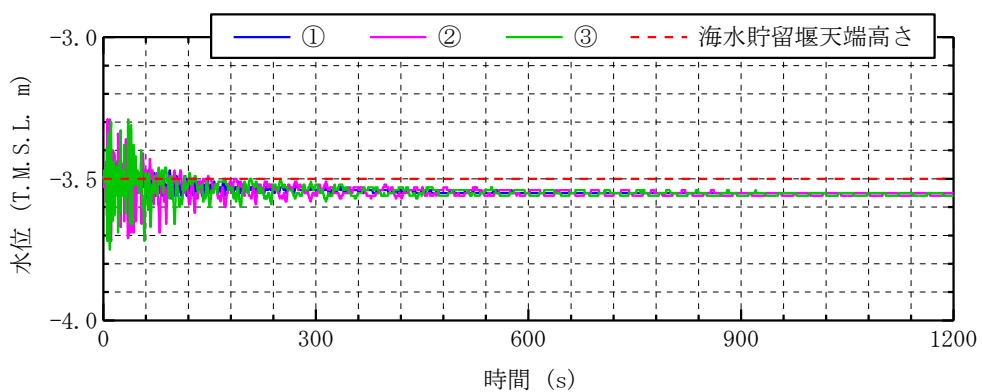
(a) 検討項目 1

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。

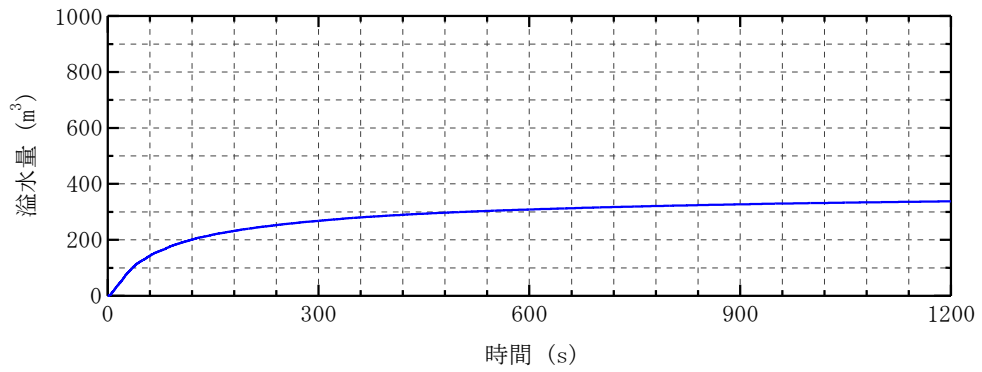


(a) 水平加振方向: 護岸直角

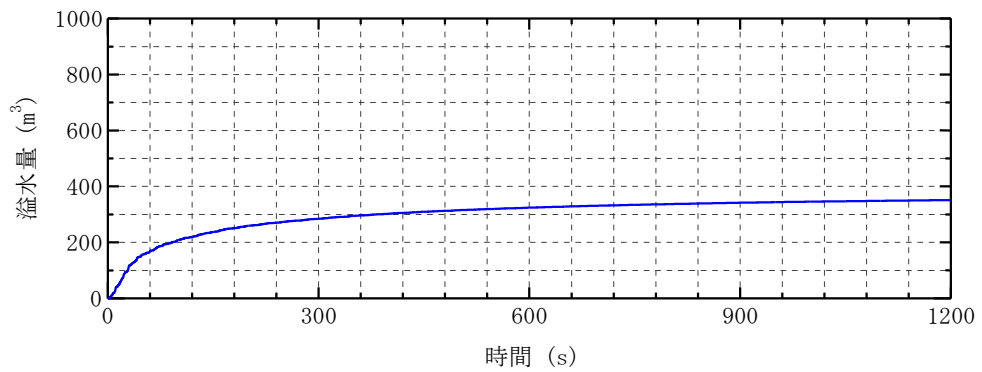


(b) 水平加振方向: 護岸平行

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

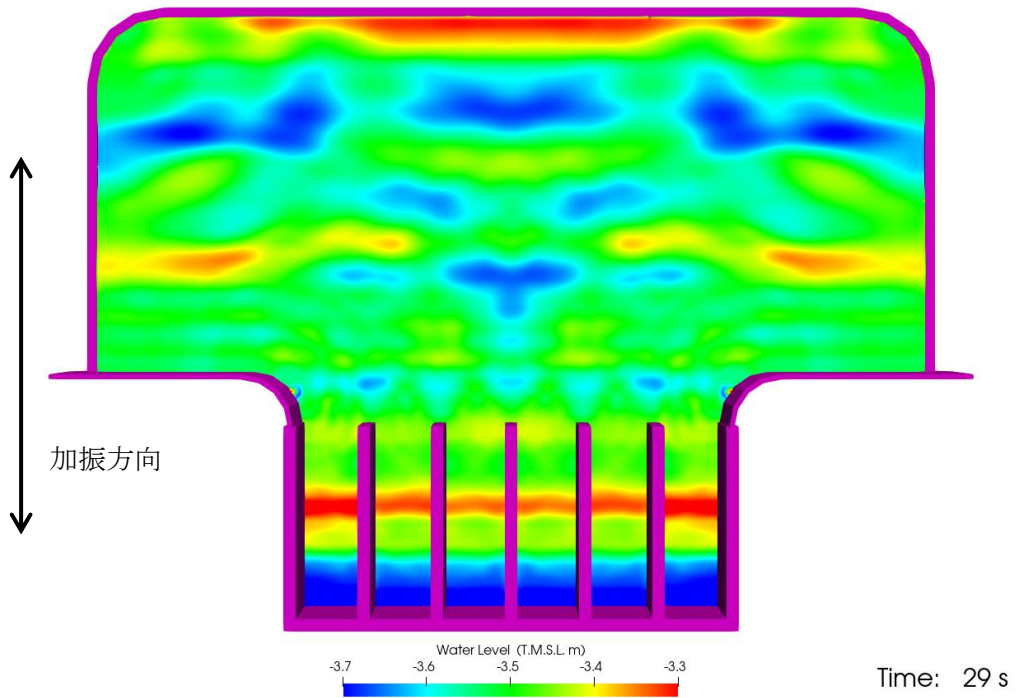


(b) 水平加振方向：護岸平行

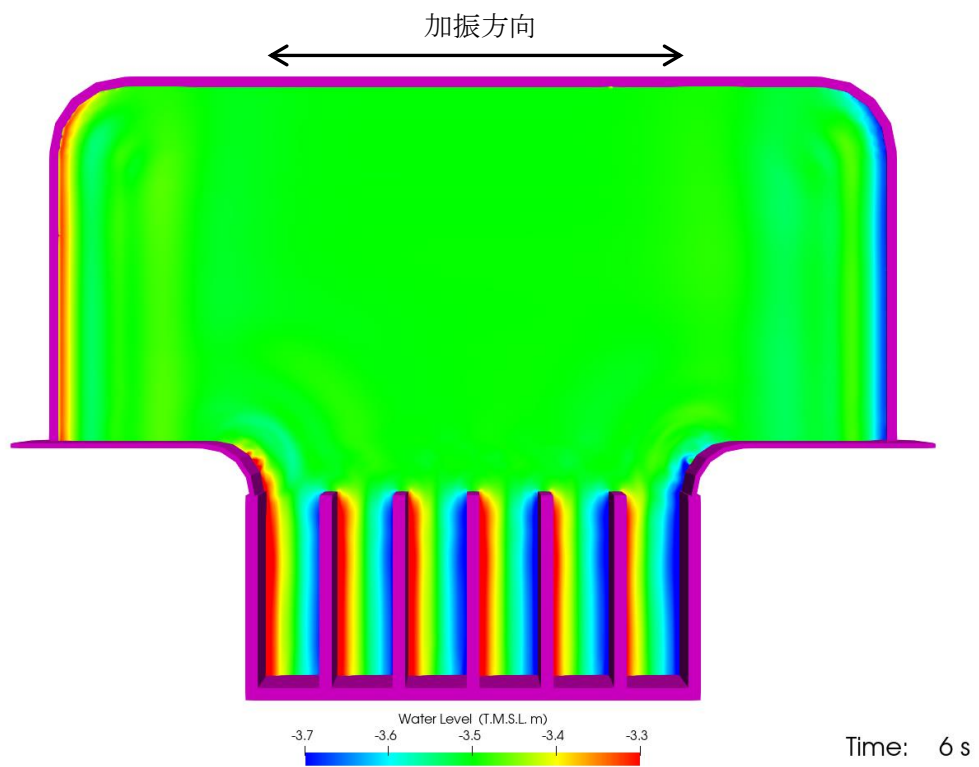
図 5.3-18 スロッシングによる溢水量の時間変化

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）

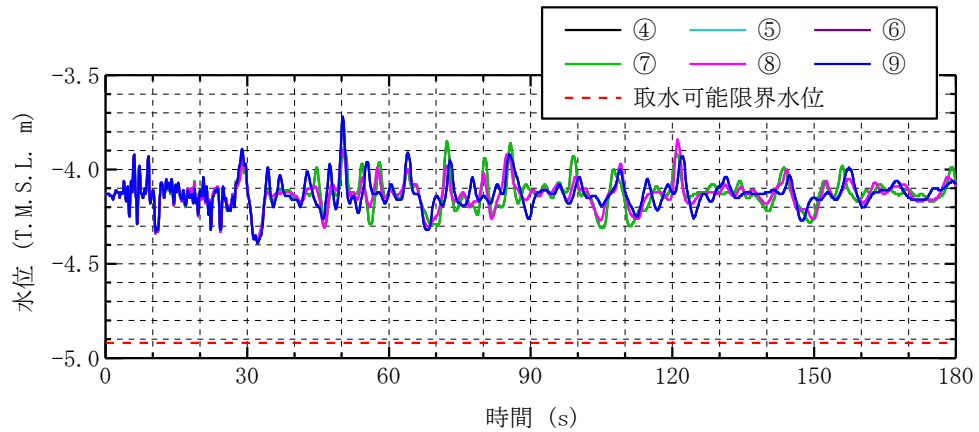


(b) 水平加振方向：護岸平行（6 秒時）

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

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

(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

(a) 砂の堆積量の設定について

7号機取水口前面（下降側）における入力津波の時刻歴波形を図 5.3-参 1-1 に示す。ここでは、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（地震発生 120 分後）における海水貯留堰内の砂の堆積量を砂移動解析により算出した。

「補足 3.1 砂移動による影響確認について」の結果を踏まえ、粒径による違いは 7号機取水口前面の砂の堆積厚さに影響を与えないことから、粒径は平均粒径（D50）（基本ケース）とし、防波堤が健全な状態と損傷した状態を考慮して防波堤の有無をモデル化した砂移動解析を実施した。

地震発生 120 分後における 7号機海水貯留堰内の砂の堆積量を図 5.3-参 1-2 に示す。この結果より、地震発生 120 分後における 7号機海水貯留堰内の砂の堆積量は防波堤の有無に影響されず、350m³程度と評価される。

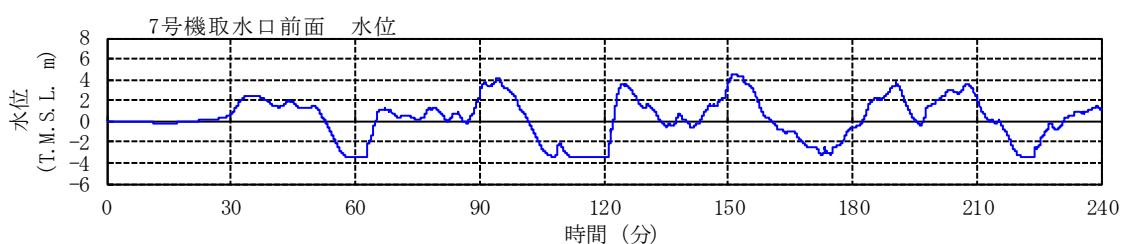


図 5.3-参 1-1 7号機取水口前面（下降側）における入力津波の時刻歴波形

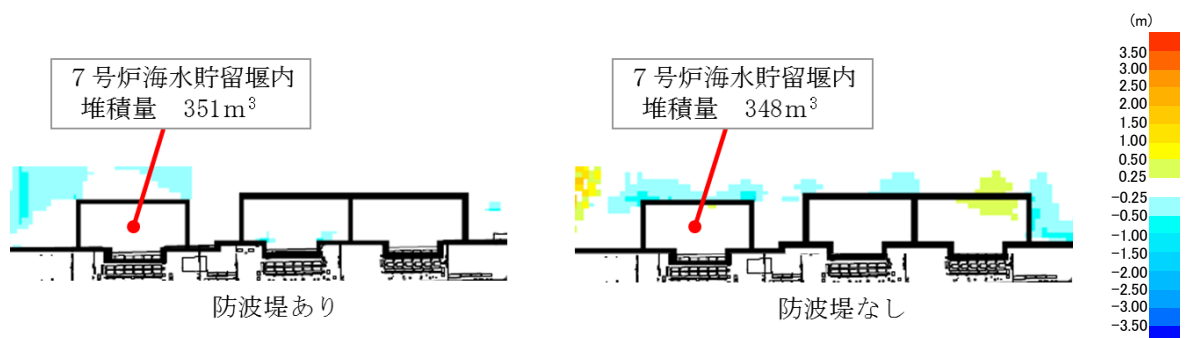


図 5.3-参 1-2 7号機海水貯留堰内の砂の堆積量と堆積浸食分布図

(b) 漂流物の堆積量の設定について

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 4.2-15 において海水貯留堰へ到達すると整理した「結果【Ⅲ】」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 1-3 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 4.2-12 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：堆積物分を差し引いた容量で 1433m³）に堆積し、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り、堆積量の算出対象から除外した。図 5.3-参 1-4 に7号機海水貯留堰断面図を示す。

(c) 海水貯留堰内部への堆積量について

「(a) 砂の堆積量の設定について」及び「(b) 漂流物の堆積量の設定について」において設定した砂及び、漂流物について海水貯留堰内へ堆積すると想定し、有効貯水量への影響評価を行った。砂については、350m³（海水貯留堰面積：3496m²より 0.1m 堆積すると想定）をベースとして海水貯留堰内に堆積させ、その上に漂流物が堆積するとしている。表 5.3-参 1-1 に漂流物の合計堆積量を、堆積のイメージ図を図 5.3-参 1-2 に示す。

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	有効貯水量 に対する 堆積量 (m^3)
			$S_1 = (\text{①の縦} \times \text{横})$		高さ h(m)		
			縦(m)	横(m)			
船舶	温排水水温調査作業船 (ゴムボート)	—*1					
	港湾設備保守作業船 (ゴムボート)	—*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	$S_3 (m^2) = \text{建築面積約 } 182m^2$			③	258.44
	5号機取水電源室	1	$S_3 (m^2) = \text{建築面積約 } 84m^2$			③	119.28
	5号機放水口サンプリング建屋	1	$S_3 (m^2) = \text{建築面積約 } 53m^2$			③	75.26
	大湊側少量危険物保管庫	1	$S_3 (m^2) = \text{建築面積約 } 59m^2$			③	83.78
車両	軽自動車	5*5	3.39	1.47	1.64	②	28.91
資機材	ユニットハウス①	2	5.44	2.30	2.60	①	35.54
	ユニットハウス②	1	3.60	1.84	2.60	①	9.41
	ユニットハウス③	1	5.44	2.30	2.60	①	17.77
	ユニットハウス④	5	4.63	2.46	2.14	①	80.87
	工具収納棚	1	1.00	1.80	1.70	②	2.20
	洗浄機①	2	1.05	0.60	0.80	②	0.41
	洗浄機②	2	1.05	0.60	0.80	②	0.41
	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)						712.24*4	

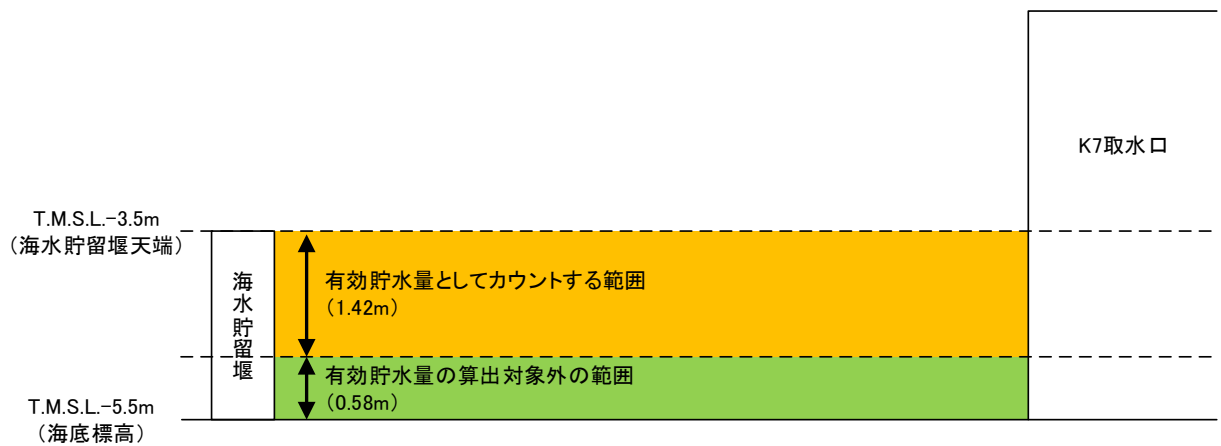
注記*1: 海上を航行, 停泊するものであるため, 堆積量の算出対象外とした。

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。

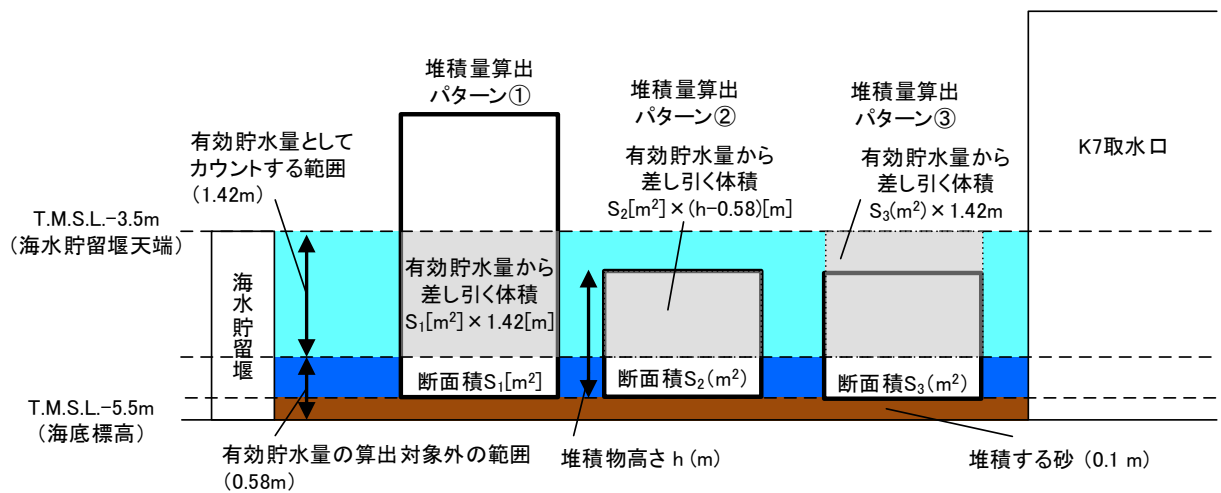
注記*3: 有効貯水量の算出対象外の範囲に堆積すると考えられたため, 堆積量の算出対象外とした。

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。

注記*5: 軽自動車については保守的に5台分の容積分を堆積量として考慮する。



(1) 海水貯留堰断面



(2) 堆積パターン

図 5.3-参 1-3 堆積量算出パターン

表 5.3-参 1-2 海水貯留堰内の容量について

海水貯留堰有効貯水量	漂流物堆積量	海水貯留堰有効貯水量(堆積物考慮)	有効貯水量の算出対象外の容量(堆積物考慮)
m ³	m ³	m ³	m ³
4964	712.24	4251.76	1433
上図との関連性			
オレンジ部	灰色部	水色部	濃い青部

注記：海水貯留堰面積は 3496m²

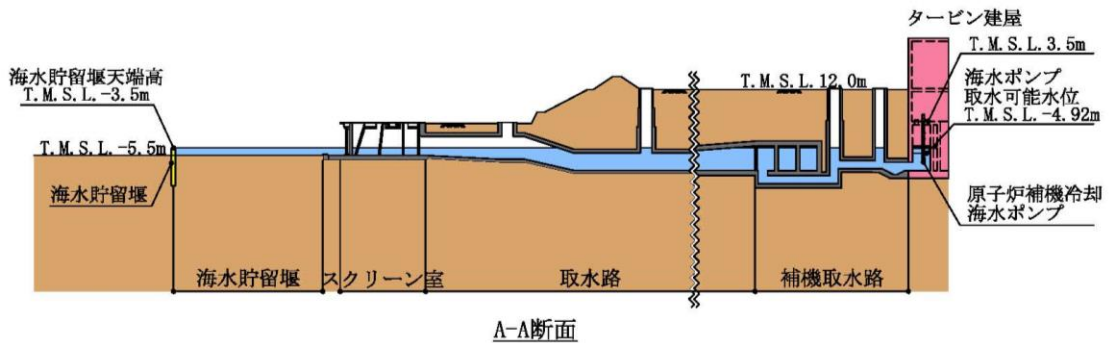
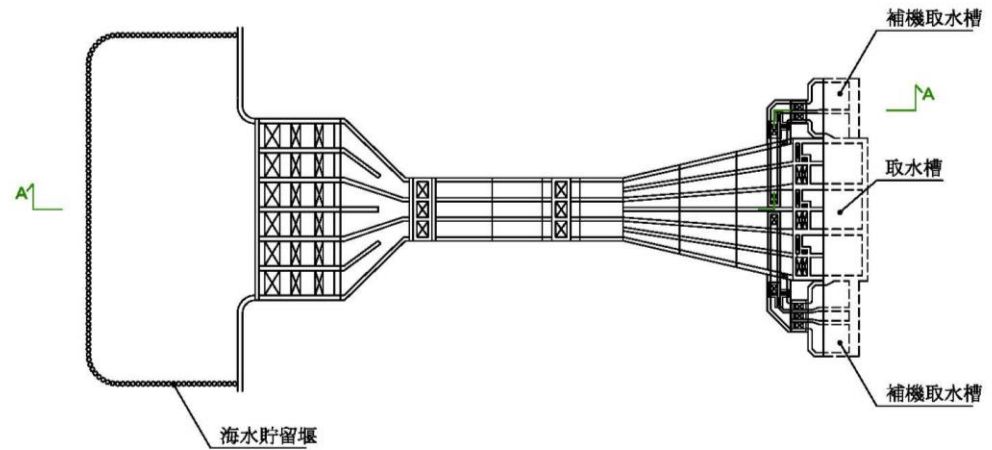


図 5.3-参 1-4 7号機海水貯留堰断面図

- 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 38 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。

$$\begin{aligned} \text{全貯水量（有効容量）}^{*1} &= 8000\text{m}^3 \\ \text{スロッシングによる溢水量} &= 351\text{m}^3 \\ \text{漂流物の堆積量} &= 712.24\text{m}^3 \rightarrow 713\text{m}^3 \end{aligned}$$

注記*1：海水貯留堰，スクリーン室，取水路，補機取水路の有効貯水量の合計容量

$$\begin{aligned} &\text{堆積及び溢水を考慮した原子炉補機冷却海水ポンプの運転継続可能時間} \\ &= (\text{有効容量} - \text{堆積量} - \text{溢水量}) \div \text{原子炉補機冷却海水ポンプ取水量} \\ &= (8000\text{m}^3 - 713\text{m}^3 - 351\text{m}^3) \div 180\text{m}^3/\text{分} \\ &= 38.53 \text{分} \rightarrow 38 \text{分} > 16 \text{分} \\ &(\text{容量換算での比較}) : (6936\text{m}^3) > (2880\text{m}^3) \end{aligned}$$

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。

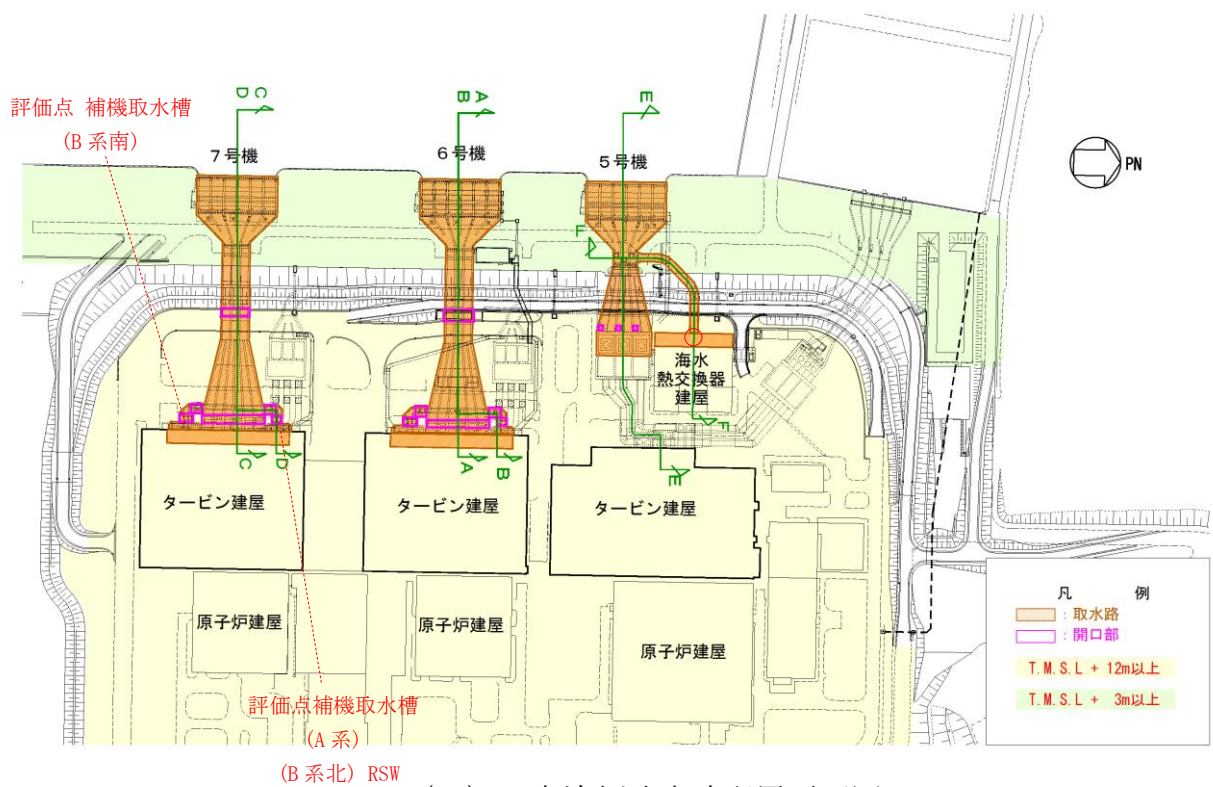
管路解析の解析条件を表 5.3 参 2-2，取水路の構造図を図 5.3 参 2-1，管路解析モデルを図 5.3 参 2-2 に示す。

表 5.3 参 2-1 計算ケース

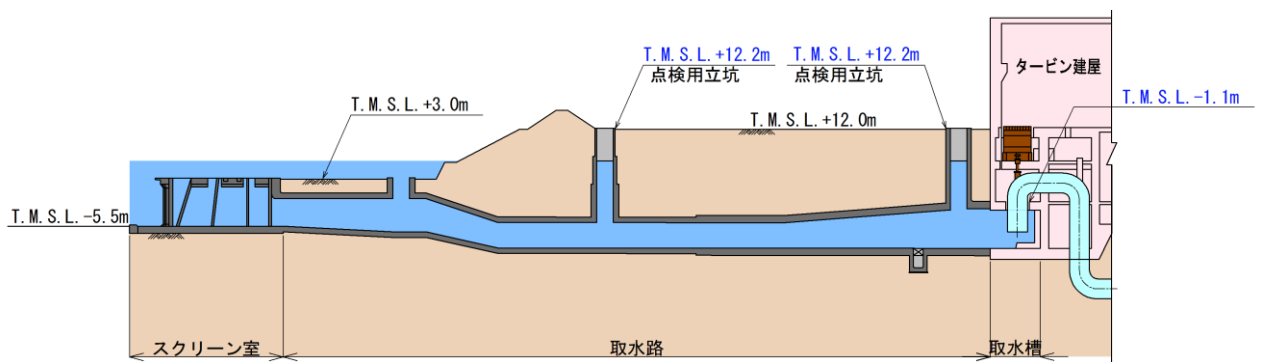
ケース	スクリーン損失の有無	貝付着の有無	原子炉補機冷却海水ポンプ稼働の有無
1	なし	あり (n=0.02)	なし (流量 0 m ³ /s)
2	なし	あり (n=0.02)	あり (流量 3 m ³ /s)
3	あり	あり (n=0.02)	なし (流量 0 m ³ /s)
4	あり	あり (n=0.02)	あり (流量 3 m ³ /s)
5	なし	なし (n=0.015)	なし (流量 0 m ³ /s)
6	なし	なし (n=0.015)	あり (流量 3 m ³ /s)
7	あり	なし (n=0.015)	なし (流量 0 m ³ /s)
8	あり	なし (n=0.015)	あ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

表 5.3 参 2-2 管路解析における解析条件

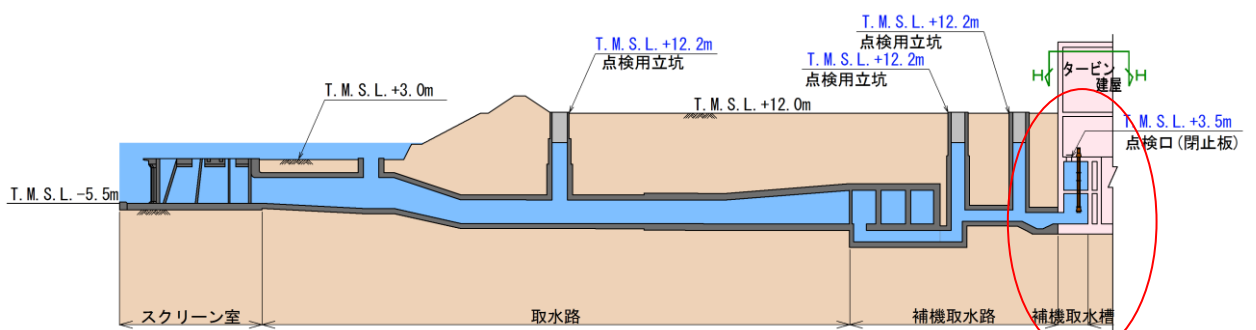
計算時間間隔 Δt	0.005 秒	
取水条件	ポンプ種類	ポンプ稼働条件
	CWP(循環水ポンプ)	0 (m ³ /h)
	RSW(原子炉補機冷却海水ポンプ)	0.5 (m ³ /s/台) × 6 台 =3 (m ³ /s)
	TSW(タービン補機冷却海水ポンプ)	0 (m ³ /h)
摩擦損失係数 (マンニングの粗度係数)	$n=0.02\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ (貝付着あり) $n=0.015\text{m}^{-1/3}\cdot\text{s}$ (貝付着なし)	
貝の付着代	貝代 10cm を考慮	
局所損失係数	電力土木技術協会(1995) : 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)

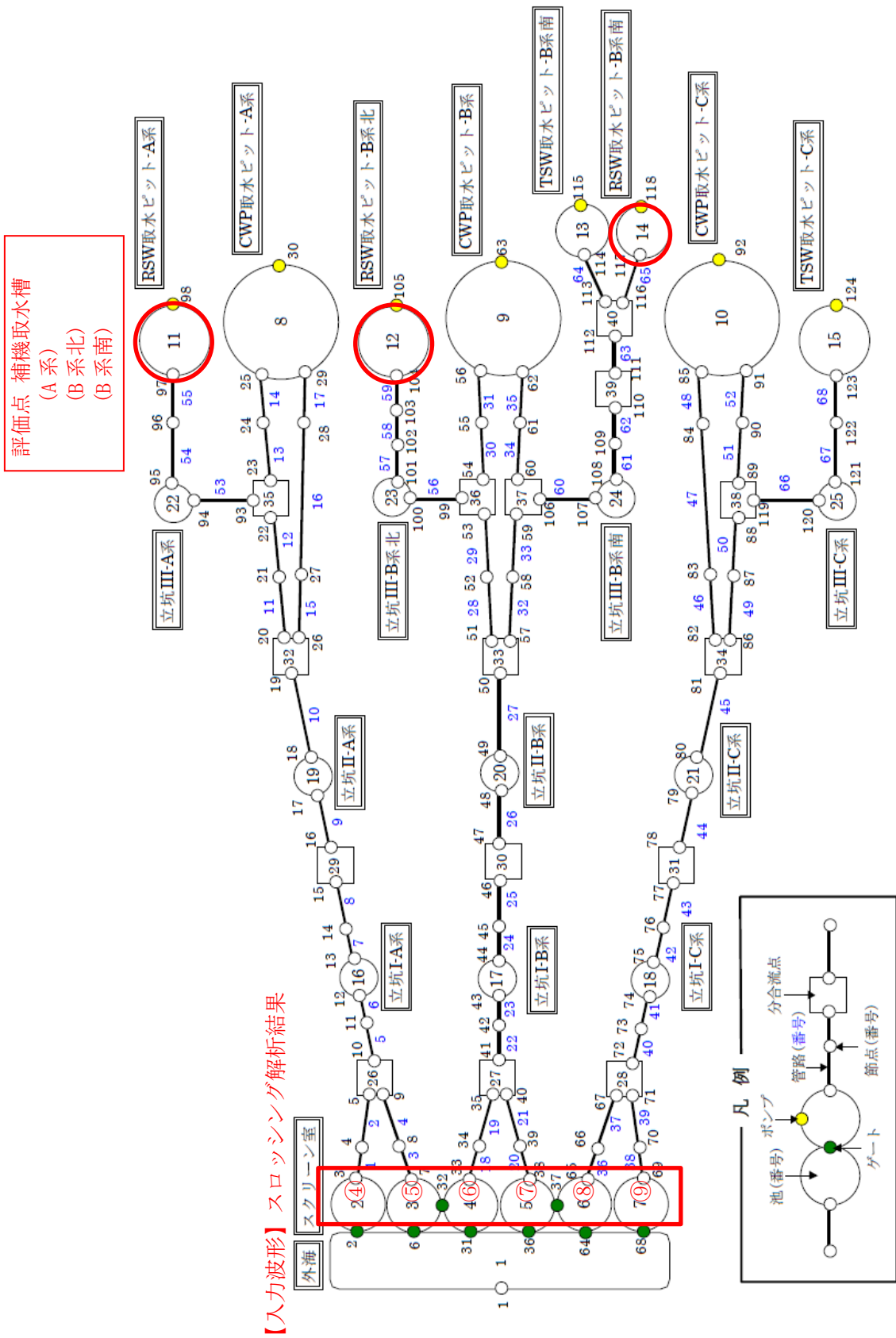
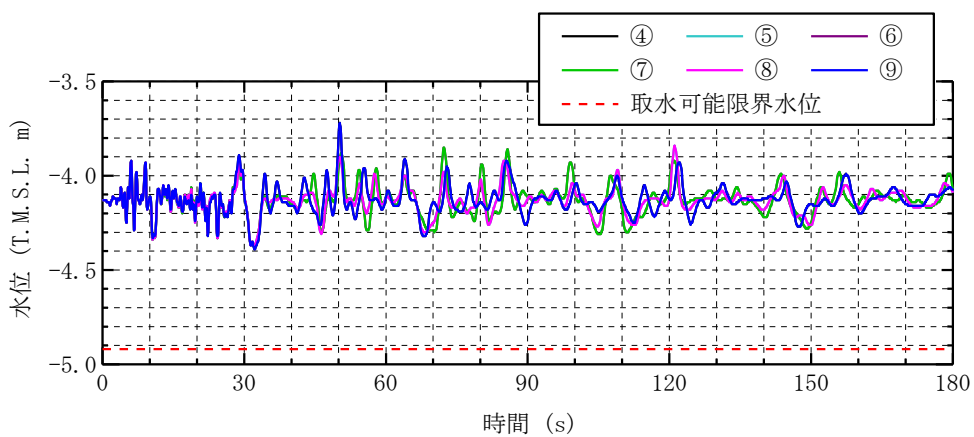


図 5.3 参 2-2 7号機取水路の管路解析モデル

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。

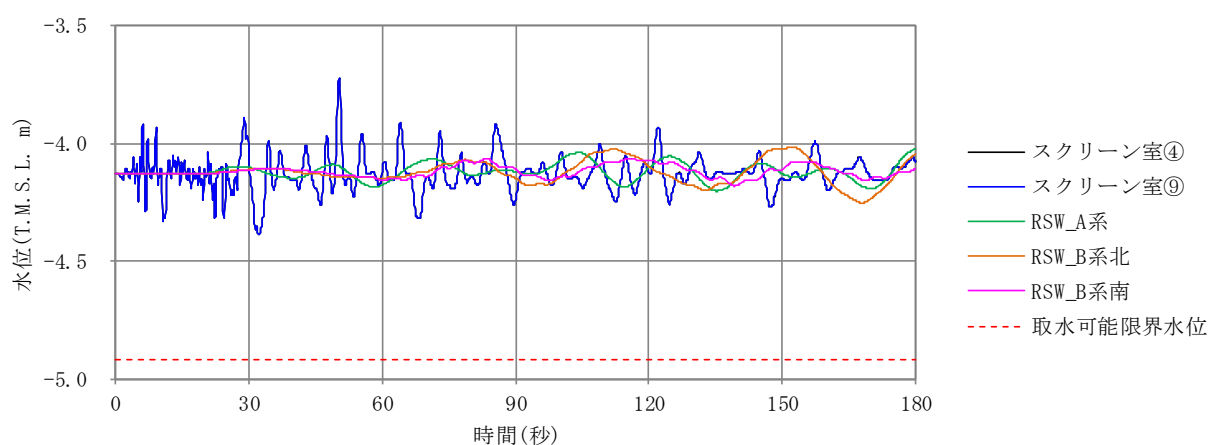


図 5.3 参 2-4 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 1 : スクリーン損失なし, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

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

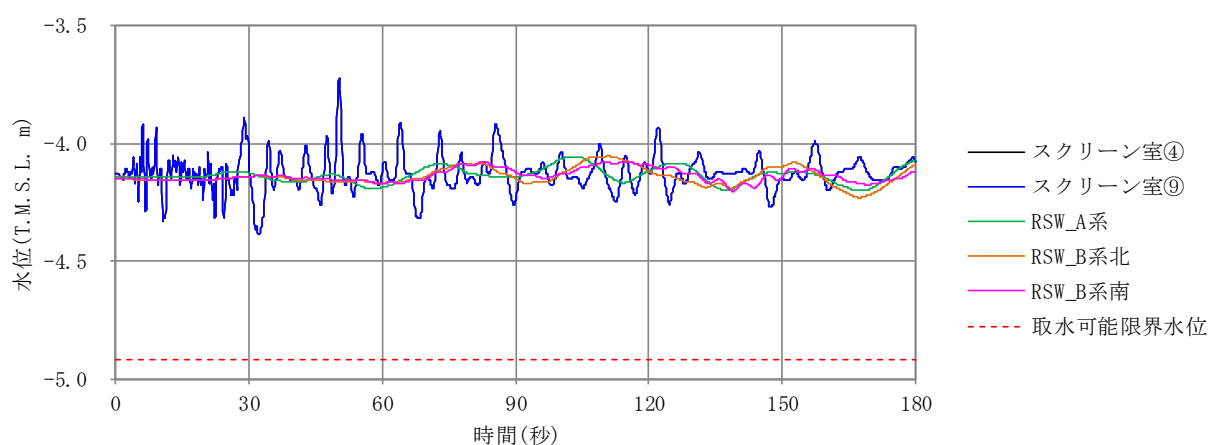


図 5.3 参 2-5 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 2: スクリーン損失なし, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

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

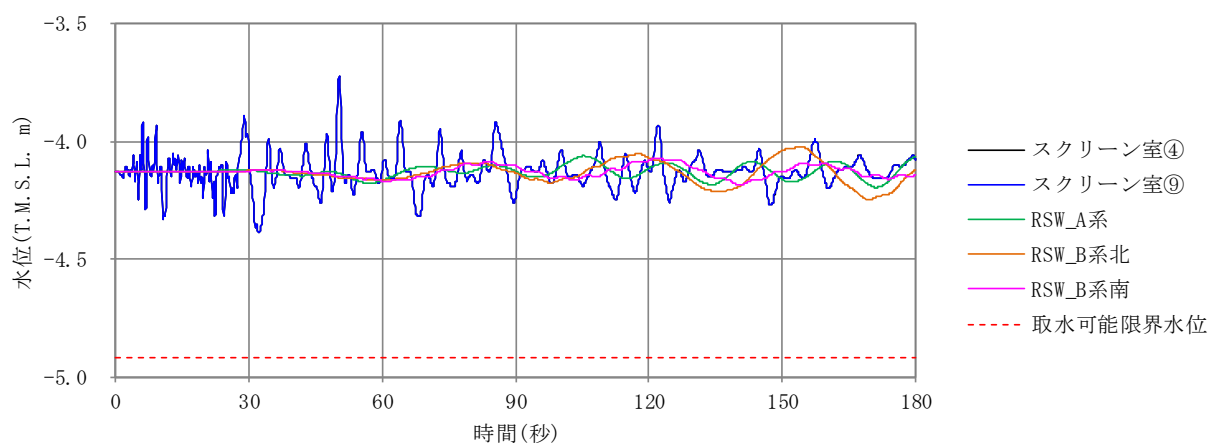


図 5.3 参 2-6 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 3: スクリーン損失あり, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

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

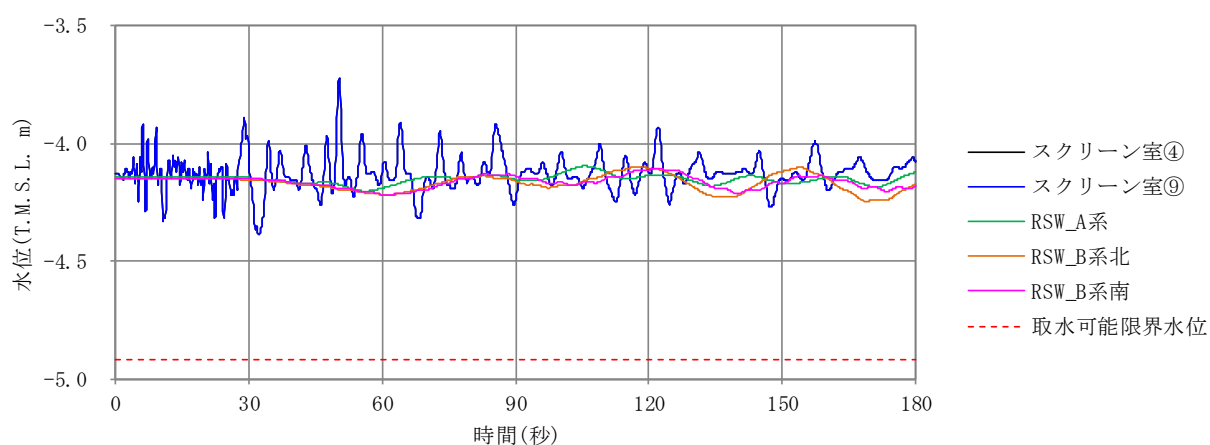


図 5.3 参 2-7 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 4: スクリーン損失あり, 貝付着あり, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

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

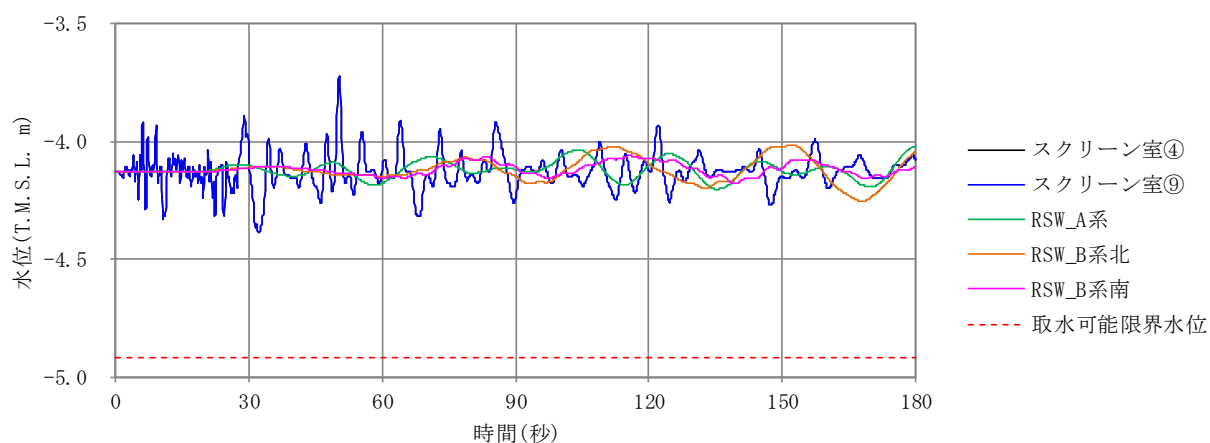


図 5.3 参 2-8 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 5: スクリーン損失なし, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

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

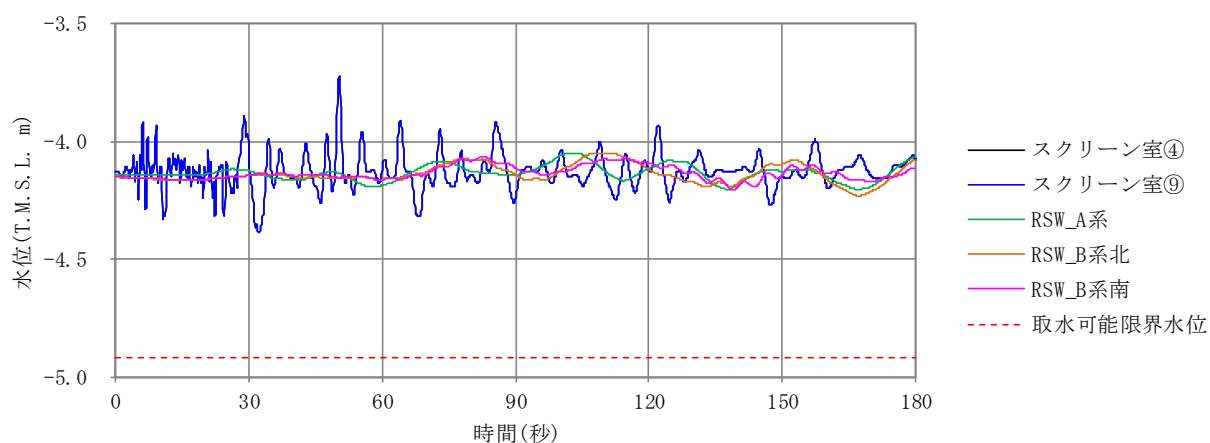


図 5.3 参 2-9 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 6: スクリーン損失なし, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

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

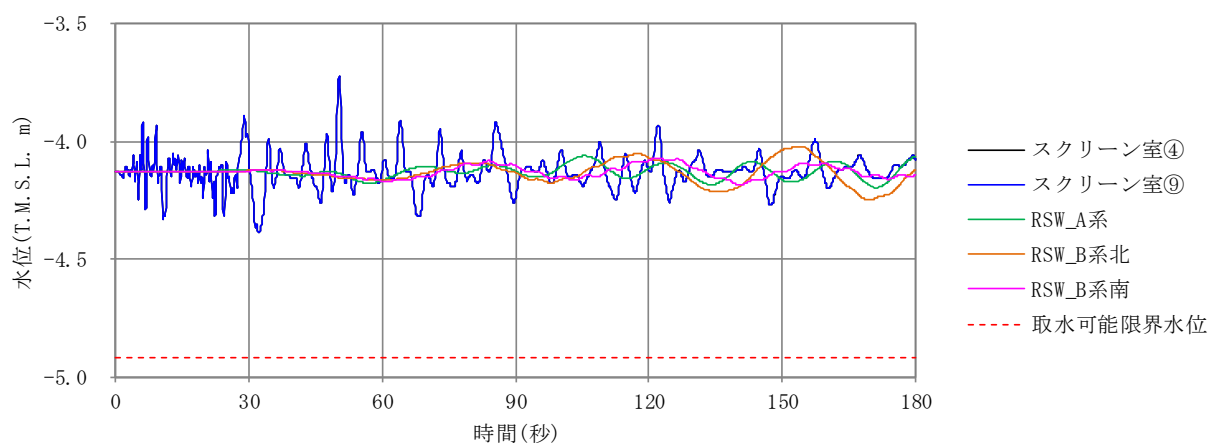


図 5.3 参 2-10 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 7: スクリーン損失あり, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働なし)

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

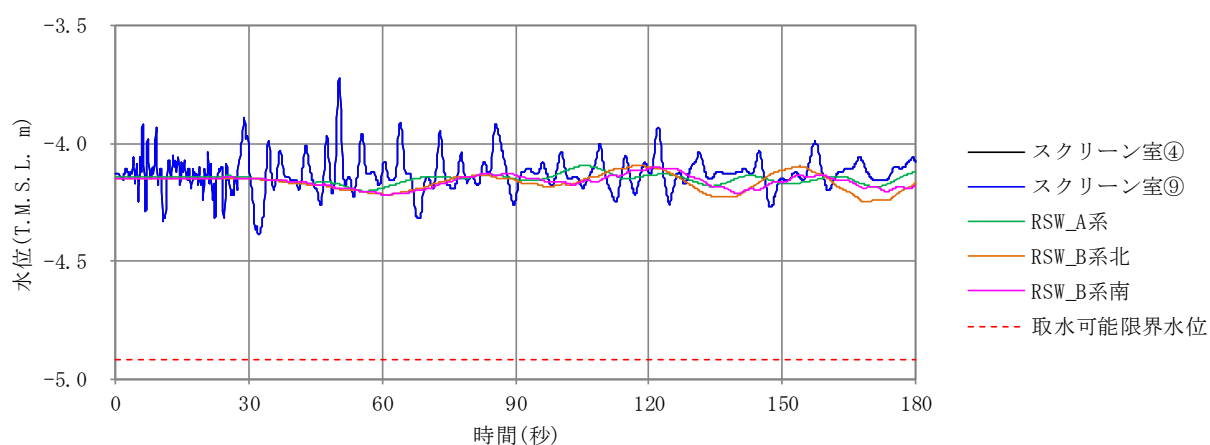


図 5.3 参 2-11 原子炉補機冷却海水ポンプ位置の水位時刻歴波形
 (ケース 8: スクリーン損失あり, 貝付着なし, 原子炉補機冷却海水ポンプ稼働あり)

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。

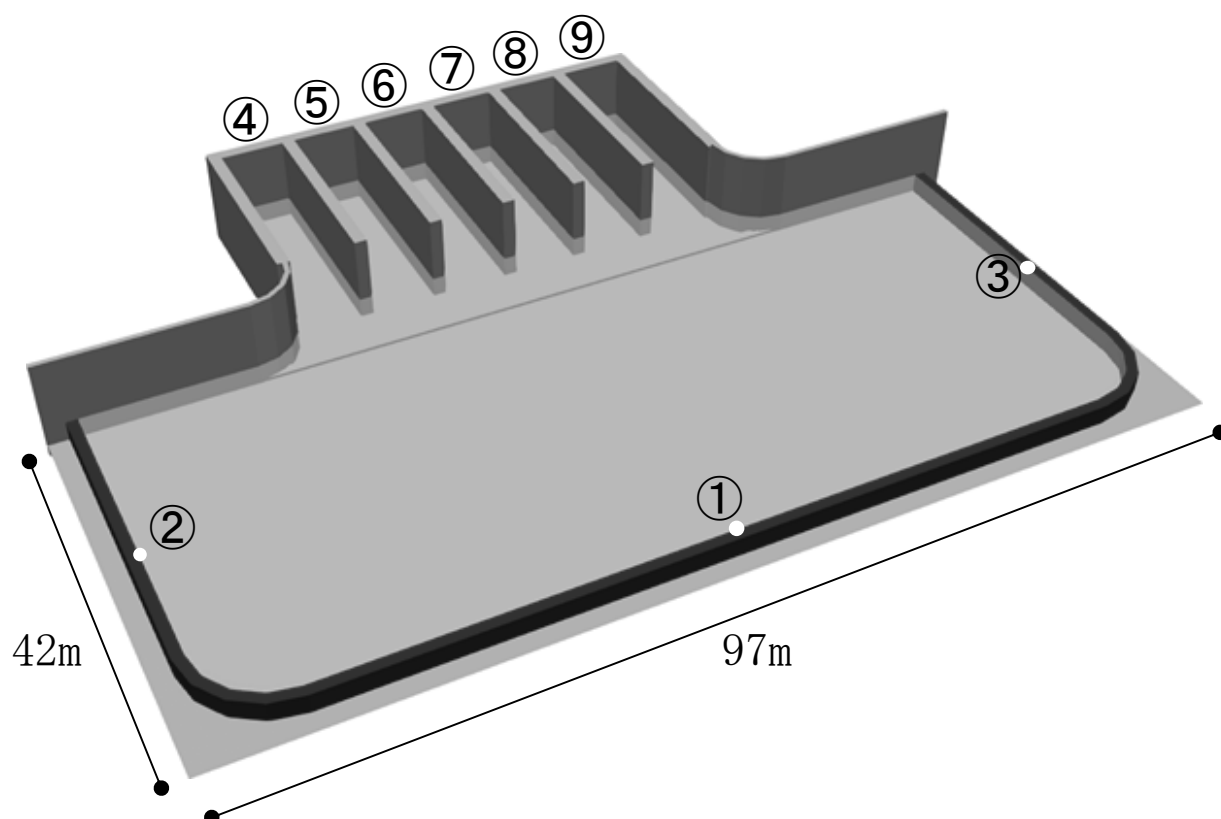


図 5.3 参 3-1 スロッシング解析モデル (OpenFOAM) (①~⑨は水位抽出位置) 【再掲】

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 369m³ 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 = 369m³ (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

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

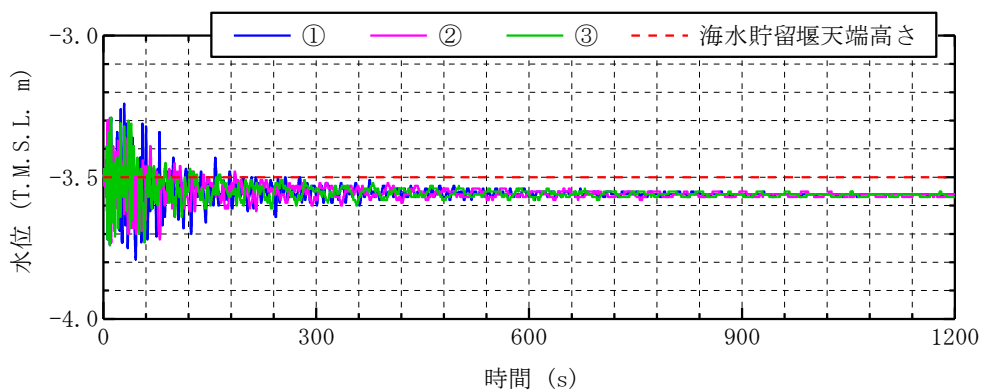


図 5.3 参 3-2 海水貯留堰位置における水位時刻歴波形（水平 2 方向同時加振）

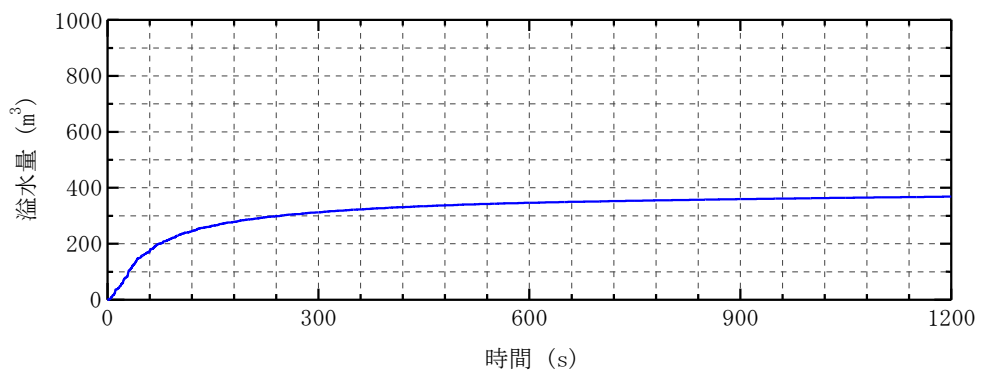


図 5.3 参 3-3 スロッシングによる溢水量の時間変化（水平 2 方向同時加振）

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

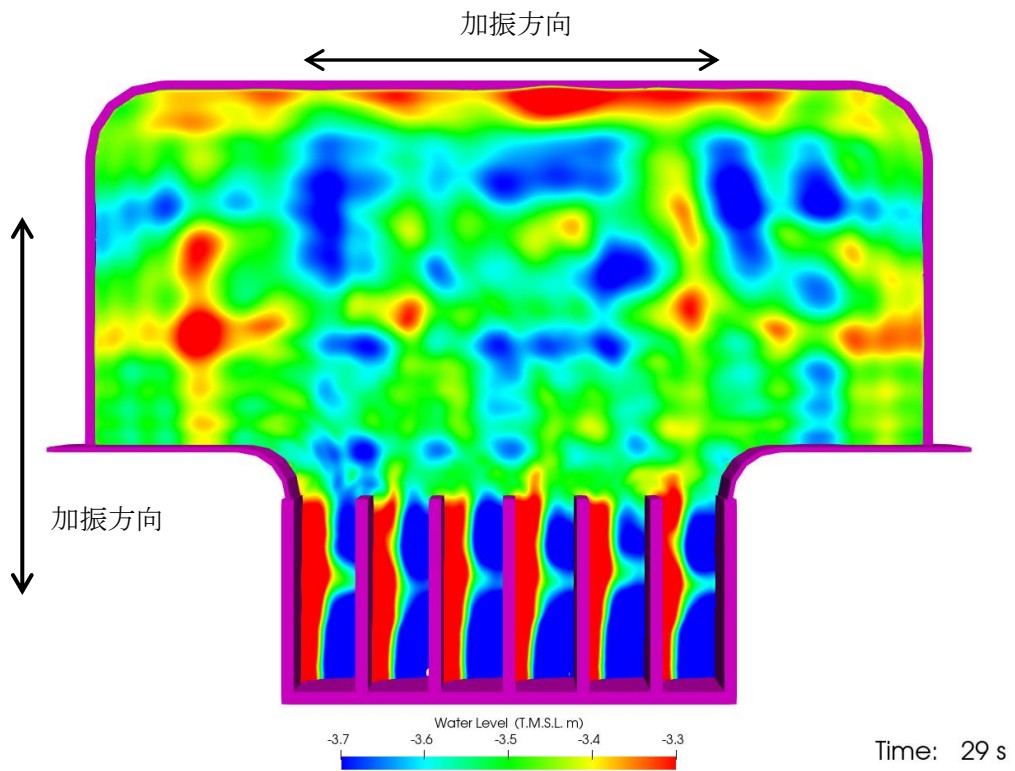


図 5.3 参 3-4 スロッシング時の水位分布 (水平 2 方向同時加振 : 29 秒時)

2.2 検討項目 2

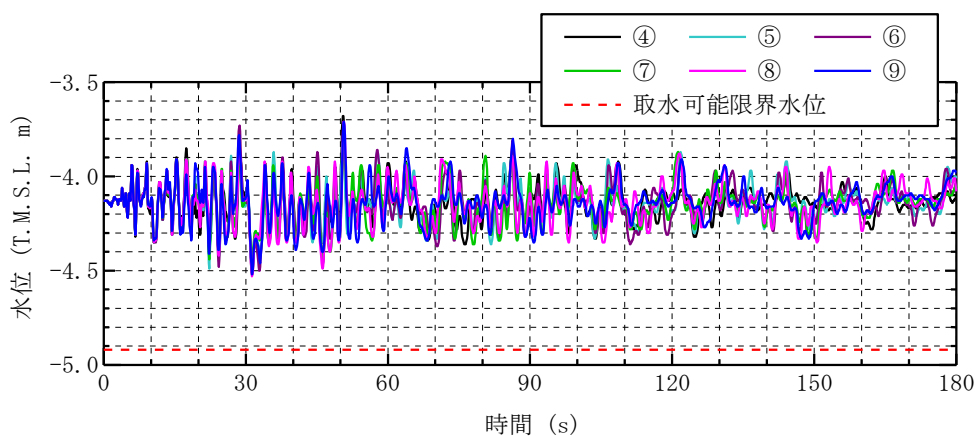
水平 2 方向同時加振した場合の水位変動を考慮しても、海水貯留堰内水位が原子炉補機冷却海水ポンプの取水可能限界水位 (T. M. S. L. -4.92m) を下回らないことを確認する。

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 351m^3 、護岸平行方向（南北方向）に加振した場合で 338m^3 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 689m^3 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。

浸水防護施設の耐震性に関する説明書の補足説明資料

: は、今回提出資料を示す。

補足説明資料目次

I. はじめに

1. 浸水防護施設の設計における考慮事項

1.1 地震と津波の組合せで考慮する荷重について

1.2 海水貯留堰における津波波力の設定方針について

1.3 自然現象を考慮する浸水防護施設の選定について

1.4 津波防護に関する施設の機能設計・構造設計に係る許容限界について

1.5 津波防護施設の強度計算における津波荷重、余震荷重及び漂流物荷重の組合せについて

1.6 津波に対する止水性能を有する施設の評価について

1.7 強度計算に用いた規格・基準について

1.8 アンカー設計に用いる規格・基準類の適用について

1.9 浸水防護施設の評価における風荷重・積雪荷重の設定について

2. 浸水防護施設の耐震、強度計算に関する補足説明

2.1 海水貯留堰の耐震計算書に関する補足説明

2.2 海水貯留堰（6号機設備）の耐震計算書に関する補足説明

2.3 海水貯留堰の強度計算書に関する補足説明

2.4 海水貯留堰（6号機設備）の強度計算書に関する補足説明

2.5 取水護岸の耐震計算書に関する補足説明

2.6 取水護岸（6号機設備）の耐震計算書に関する補足説明

2.7 津波荷重（突き上げ）の強度評価における鉛直方向荷重の考え方について

2.8 止水堰の設計に関する補足説明

2.9 床ドレンライン浸水防止治具を構成する各部材の評価及び機能維持の確認方法について

2.10 津波監視カメラに関する補足説明

2.11 取水槽水位計に関する補足説明

2.12 加振試験の条件について

2.13 水密扉の設計に関する補足説明

1.2 海水貯留堰における津波波力の設定方針について

1.2 海水貯留堰における津波波力の設定方針について

(1) 設定方針の概要

図 1.2-1 に海水貯留堰の平面図を、図 1.2-2 に断面図を示す。海水貯留堰は連結した鋼管矢板を海底面に設置することにより、引き波時に海底面から突出した鋼管矢板頂部（突出長 2～2.5m）で海水を貯留する設備である。

海水貯留堰に津波波力が作用するのは、図 1.2-3 に、海水貯留堰の内外水位概念図を示すとおり、引き波により海水貯留堰が海面から露出し、その後、押し波が海水貯留堰に作用してから越流するまでの間に限定される。

「防波堤の耐津波設計ガイドライン(国土交通省港湾局)」(平成 25 年 9 月(平成 27 年 12 月一部改訂))¹⁾によれば、津波が構造物を越流する場合の津波荷重の算定にあたっては、若干越流している状態に静水圧差による算定式を適用する場合、それより水位の低い越流直前の状態の方が高い波力となる可能性があるため、両者を比較して高い方を採用する必要があるとしている。

図 1.2-4 に「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に示されている防波堤に対する津波荷重算定手順のフローを示す。

波状段波の発生の有無にあたっては、KK7 補足-019-2「津波への配慮に関する説明書に係る補足説明資料 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」に示すとおり、柏崎刈羽原子力発電所の敷地前面では、津波の水面勾配が最大でも 2.57° と十分に小さく、津波のソリトン分裂および砕波は発生しないことを確認している。

従って、海水貯留堰は、図 1.2-2 に示すとおり、常時没水している構造物であり、基準津波による引き波によって海水貯留堰頂部が露出し、その後の押し波によって海水貯留堰天端高さ以上に水位が上昇すると瞬時に越流するため、内外の津波水位差はつきにくく同程度の水位となるものの、設計の保守性の観点から、越流が発生しない場合(越流直前の津波波力)、越流が発生する場合(越流時の津波波力)の津波波力をそれぞれ算定し、両者のうち保守的な津波波力を用いることとする。

津波波力の算定に用いる津波は、設置変更許可申請書の津波水位評価で示した基準津波 1～3 とする。基準津波は、平面 2 次元モデルによる津波シミュレーション解析により得られる津波水位であり、敷地前面に海水貯留堰や護岸などをモデル化し、構造物等の反射の影響を含めたものである。

なお、対象とする津波は、評価対象となる海水貯留堰が最も海面から露出し、その後の押し波が作用するまでの間に作用する津波波力による影響が大きいと考えられることから、基準津波 1～3 のうち、海水貯留堰の前面の水位が最も低くなる基準津波 2 を用いて検討する。

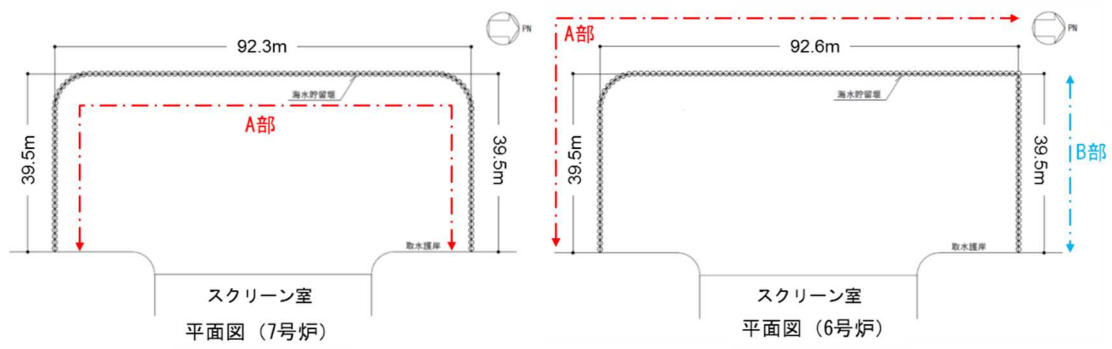


図 1.2-1 海水貯留堰の平面図

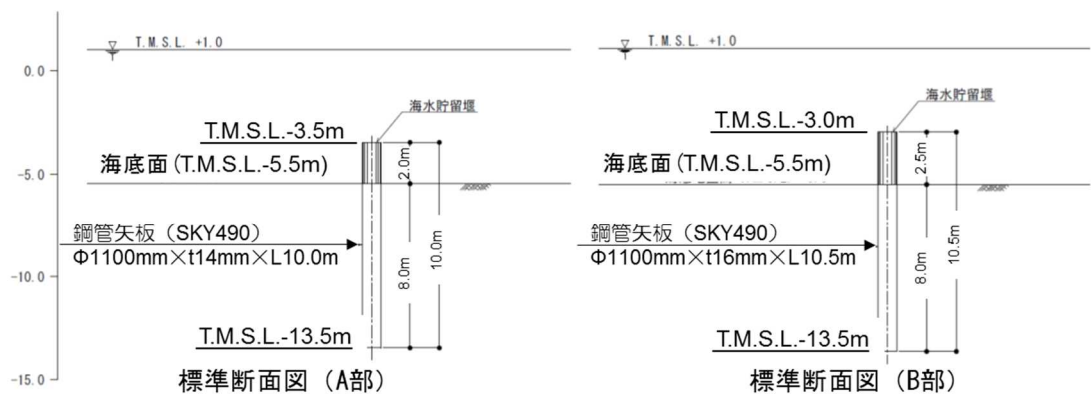


図 1.2-2 海水貯留堰の断面図

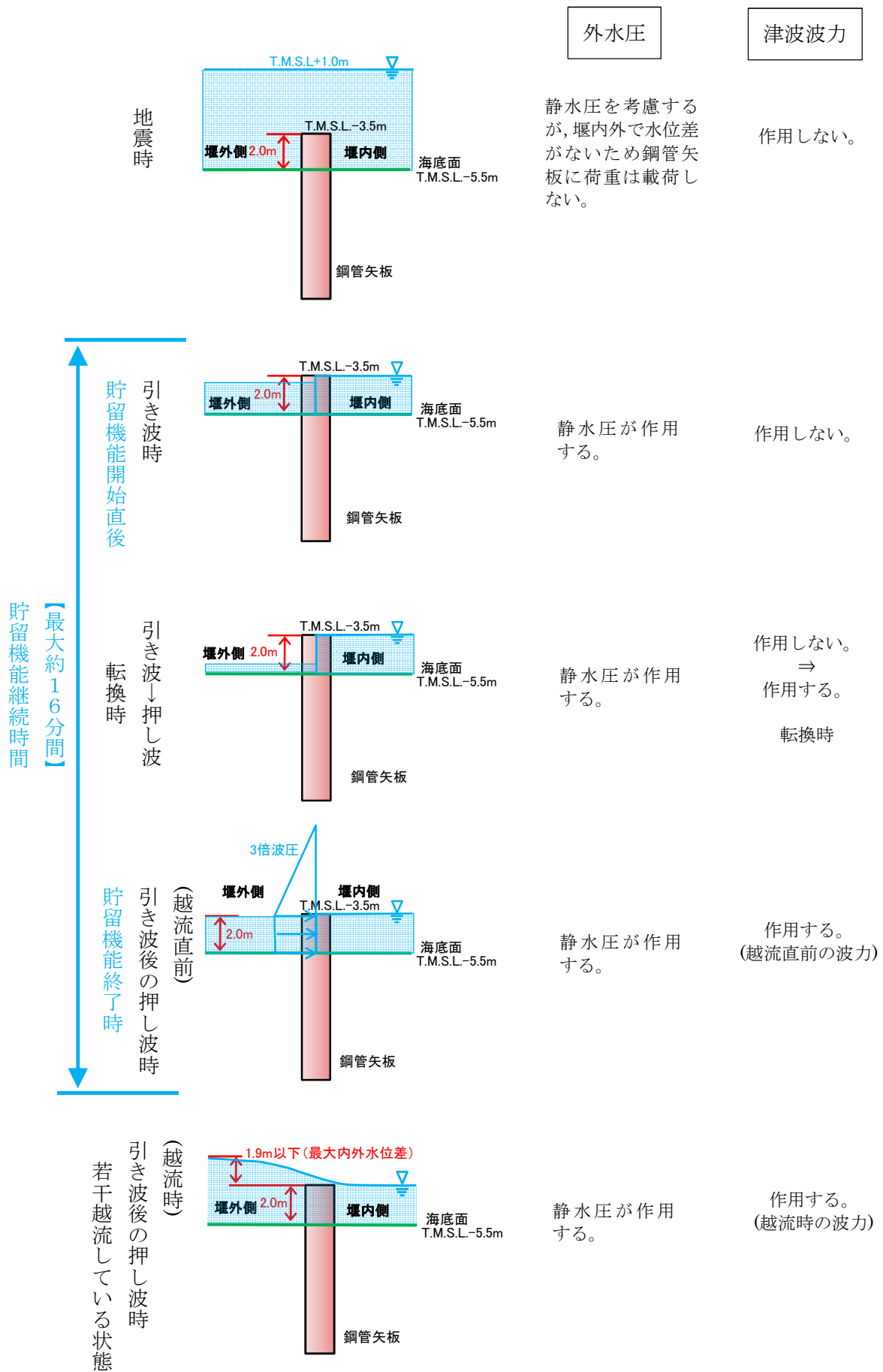
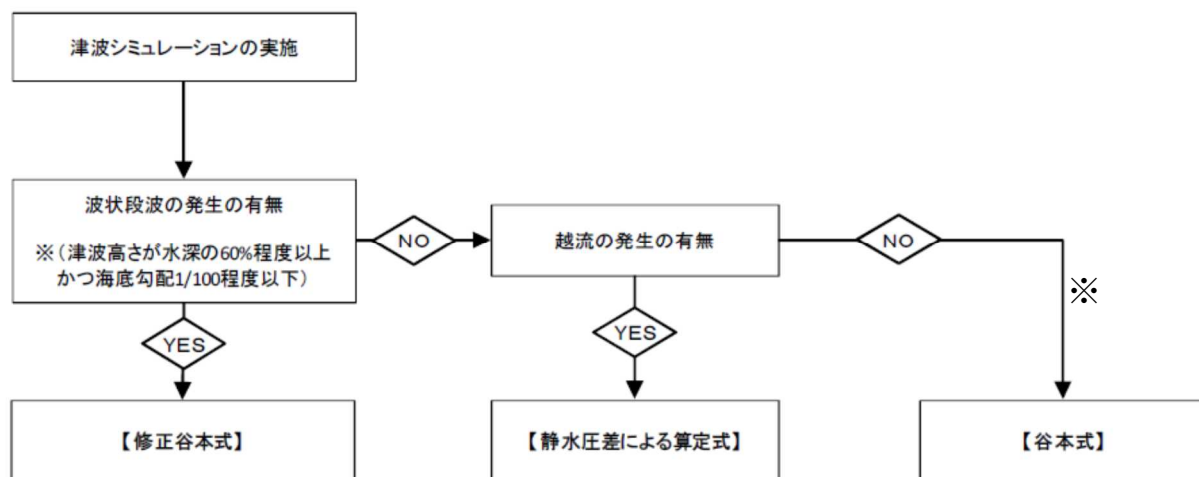


図 1.2-3 海水貯留堰の内外水位概念図



(※ 海水貯留堰に津波波力が作用するのは、引き波により海水貯留堰が海面から露出し、その後押し波が海水貯留堰に作用してから越流するまでの間に限定されることから、遡上波として取り扱う。)

図 1.2-4 防波堤に対する津波荷重算定手順 (1)に一部加筆)

(2) 越流直前の津波波力の設定方針

越流直前の津波波力の算定にあたっては、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」に基づき、若干越流した状態より水位の低い越流直前の状態として、進行波の高さの最大水位となる海水貯留堰天端高さまでを考慮することとし、津波波力が作用するのは、引き波により海水貯留堰が海面から露出し、その後押し波が海水貯留堰に作用してから越流するまでの間に限定されることから、遡上波として取り扱う。

図 1.2-5 に基準津波 2 における最低水位分布を示す。海水貯留堰前面は、若干の水位があるが、周囲の海域は海底面が露出しているため、越流直前の津波波力の設定においては、引き波時に海水貯留堰前面の海底が露出したと仮定し、その後の押し波を遡上波として津波波力を設定する。

具体的には、津波高さは、海水貯留堰に作用する津波波力が保守的になるように海水貯留堰前面の海底面 (T.M.S.L. -5.5m) まで水位が低下した後に襲来する津波を考慮することとし、海水貯留堰に津波が越流する直前の状態として、進行波の高さの最大水位となる海水貯留堰天端 (T.M.S.L. -3.5m 及び T.M.S.L. -3.0m) までを想定する。津波波力は、「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針」²⁾ の考え方に従って、津波高さの 3 倍の高さまでの静水圧荷重を考慮する。なお、図 1.2-6 に津波波力の作用イメージを示す。

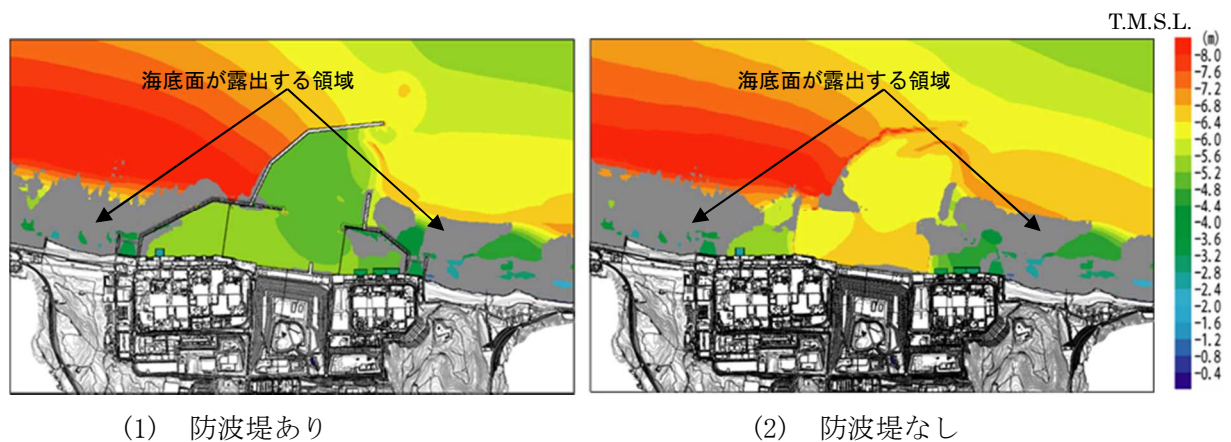


図 1.2-5 最低水位分布 (基準津波 2)

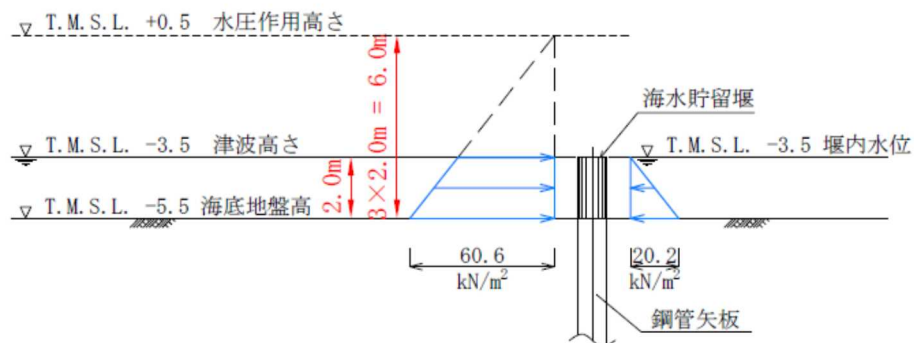


図 1.2-6 津波波力の作用イメージ
(海水貯留堰天端高さ T.M.S.L. -3.5m の場合)

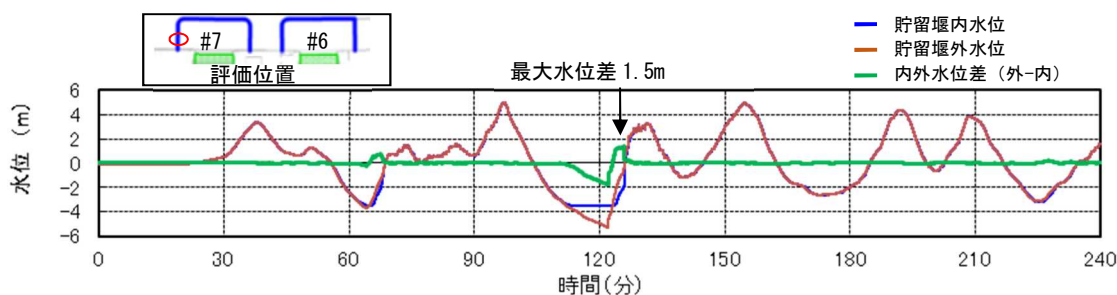
(3) 越流時の津波波力の設定方針

越流時の津波波力の算定にあたっては、設置変更許可申請書での津波水位評価で用いた平面2次元モデルによる津波シミュレーション解析により得られる津波水位のうち、海水貯留堰内外の水位差の最大値を抽出したものを静水圧差として考慮する。

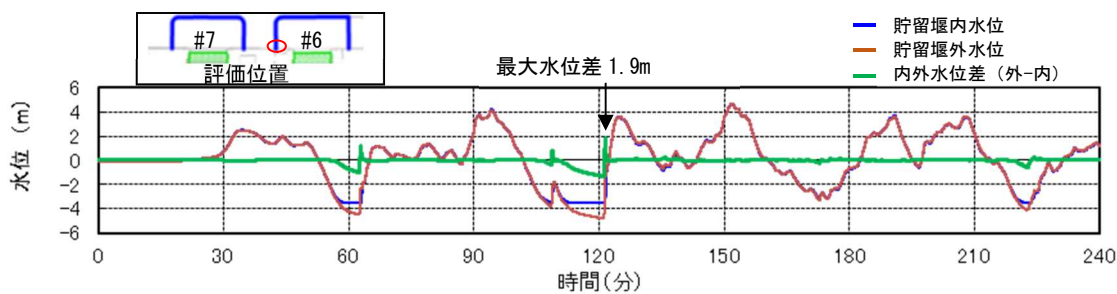
平面2次元モデルによる津波シミュレーション解析は、敷地前面に海水貯留堰や護岸などをモデル化し、構造物等の反射の影響を含めたものである。したがって、海水貯留堰内外の水位差の最大値は、構造物による反射の影響を含んだ津波水位より算出されたものであり、津波の進行波に伴う津波高さとは異なるものである。

越流する場合の静水圧差による算定にあたっては、構造物による反射等の影響を含んだ津波水位高さの内外水位差の最大値を保守的に考慮することとする。

図 1.2-7 に海水貯留堰の内外水位差のうち内外水位差が最大となる箇所の津波水位の時刻歴波形を示す。引き波後に襲来する津波が海水貯留堰を越流する際に、基準津波 2 において最大 1.9m の水位差が発生する。このため、津波高さとしては海水貯留堰天端 (T.M.S.L. - 3.5m 及び T.M.S.L. - 3.0m) から 2m の高さの越流を考慮して、「防波堤の耐津波設計ガイドライン(国土交通省港湾局)」(平成 25 年 9 月 (平成 27 年 12 月一部改訂))¹⁾ による静水圧差による算定式を参考に設定する。図 1.2-8 に津波波力の作用イメージを示す。なお、海水貯留堰の最大内外水位差は、基準津波 1~3 のうち、基準津波 2 が最も大きい。表 1.2-1 及び表 1.2-2 に、各ケースの最大内外水位差一覧表を示す。



(1) 防波堤あり



(2) 防波堤なし

図 1.2-7 海水貯留堰内外の津波水位の時刻歴波形
(内外水位差最大箇所)

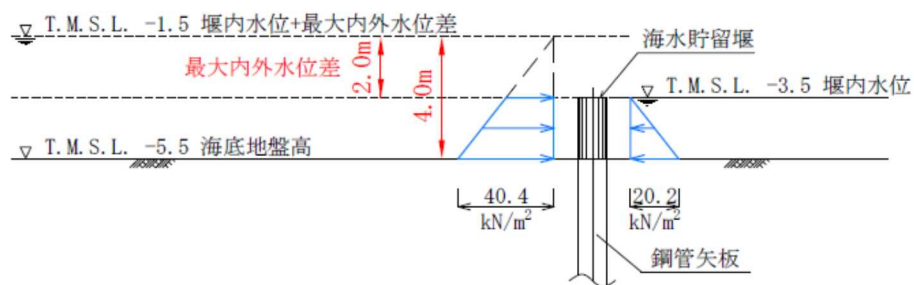


図 1.2-8 津波波力の作用イメージ
(海水貯留堰天端高さ T.M.S.L. -3.5m の場合)

表 1.2-1 最大内外水位差一覧表 (7号機海水貯留堰)

	基準津波 1	基準津波 2	基準津波 3
防波堤あり	0.8m	1.5m	0.5m
防波堤なし	1.1m	1.6m	0.8m

表 1.2-2 最大内外水位差一覧表 (6号機海水貯留堰)

	基準津波 1	基準津波 2	基準津波 3
防波堤あり	0.5m	1.0m	0.3m
防波堤なし	0.8m	1.9m	1.3m

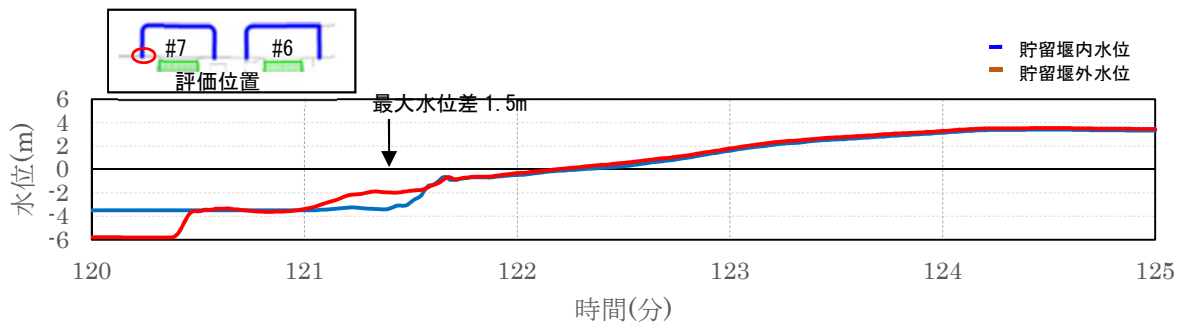


図 1.2-9 海水貯留堰内外の津波水位の時刻歴波形 (海水貯留堰南側接続部)
(防波堤なし 基準津波 2)

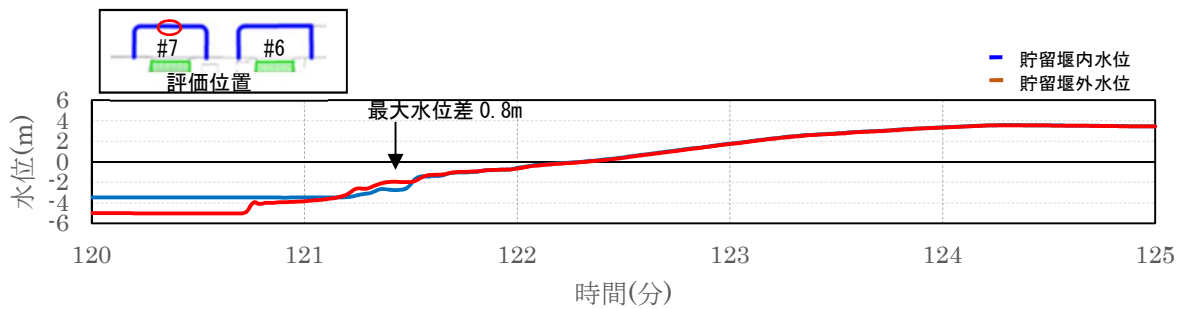


図 1.2-10 海水貯留堰内外の津波水位の時刻歴波形 (海水貯留堰中央部)
(防波堤なし 基準津波 2)

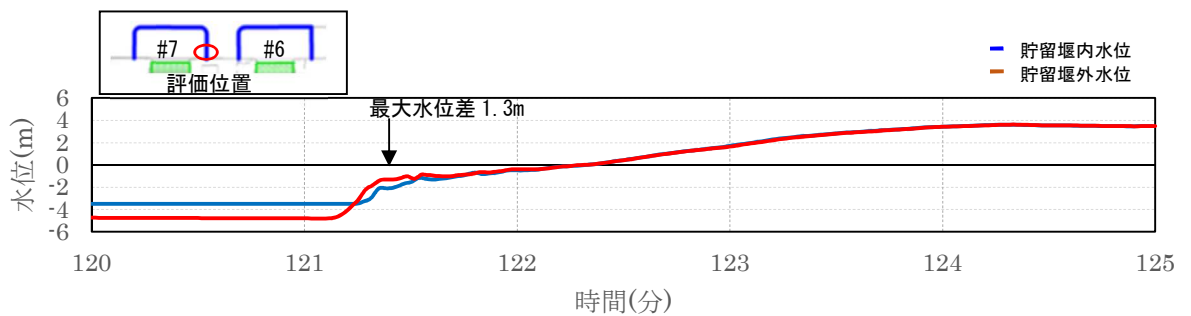


図 1.2-11 海水貯留堰内外の津波水位の時刻歴波形 (海水貯留堰北側接続部)
(防波堤なし 基準津波 2)

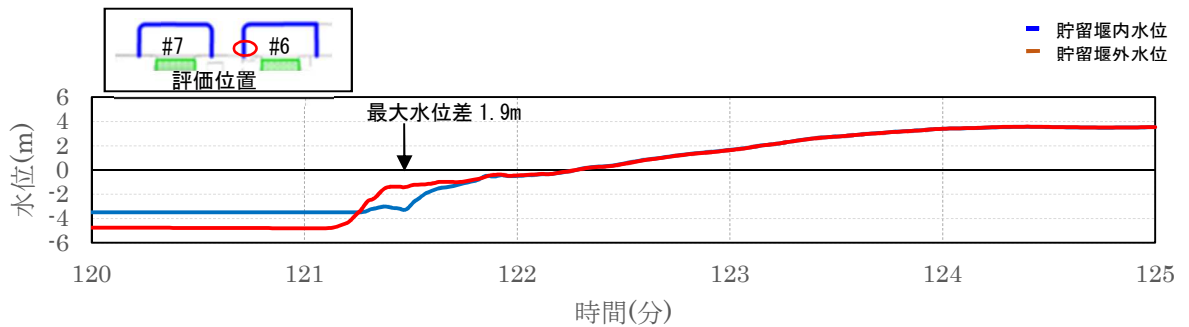


図 1.2-12 海水貯留堰内外の津波水位の時刻歴波形（6号機海水貯留堰南側接続部）
（防波堤なし 基準津波 2）

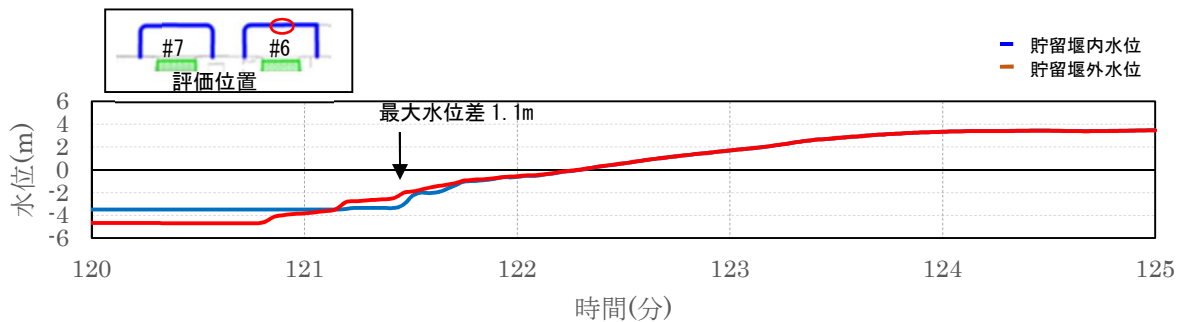


図 1.2-13 海水貯留堰内外の津波水位の時刻歴波形（6号機海水貯留堰中央部）
（防波堤なし 基準津波 2）

図 1.2-9～図 1.2-13 に海水貯留堰内外水位差の最大値を示したケース（基準津波 2 防波堤なし）における津波水位時刻歴波形の拡大図を示す。

引き波後の押し波により海水貯留堰天端高さ以上に水位が上昇すると瞬時に越流し、その後の内外の津波水位差は同程度の水位となることを確認した。

また、海水貯留堰外水位の水位時刻歴波形は、階段上に水位が上昇しており、海水貯留堰や護岸の構造物の反射による影響が現れていることがわかる。7号機海水貯留堰の内外水位差の最大値は、接続部では1.3m～1.5mを示しているのに対し、中央部では0.8mを示している。これは、接続部では海水貯留堰と護岸の両構造物の反射影響により、水位上昇量がより顕著であることを示している。なお、構造物による反射により海水貯留堰方向とは逆向きの流れが発生するものの、ここでは流向を考慮せず、内外水位差を算出している。

越流する場合の静水圧差による算定にあたっては、流向を考慮せず、構造物による反射による影響を含んだ津波水位高さの内外水位差のうち最大値を評価に用いており、保守的な水位差により算定されているものである。

(4) まとめ

海水貯留堰における津波波力について、越流直前の波力及び越流時の静水圧差について検討した。この結果、越流直前の波力の方が越流時の静水圧差を上回る結果となった。このため、海水貯留堰における津波波力として、保守的に越流直前の波力を考慮することとする。

津波波力の算定式に関する文献

a. 防波堤の耐津波設計ガイドライン(国土交通省 港湾局)

(平成 25 年 9 月 (平成 27 年 12 月一部改訂))¹⁾

- ① 波状段波が発生しない場合で、かつ越流が発生しない場合には、「基準・同解説」に記載されている谷本式を適用する。谷本式に用いる a_r (入射津波の静水面からの高さ) は、数値シミュレーション等による津波高さ (基準面からの高さ) の 1/2 を入射津波高さとして定義し、波力算定にはこれを用いるものとする。
- ② 波状段波が発生しない場合で、かつ越流発生の場合は、静水圧差による算定式を適用。

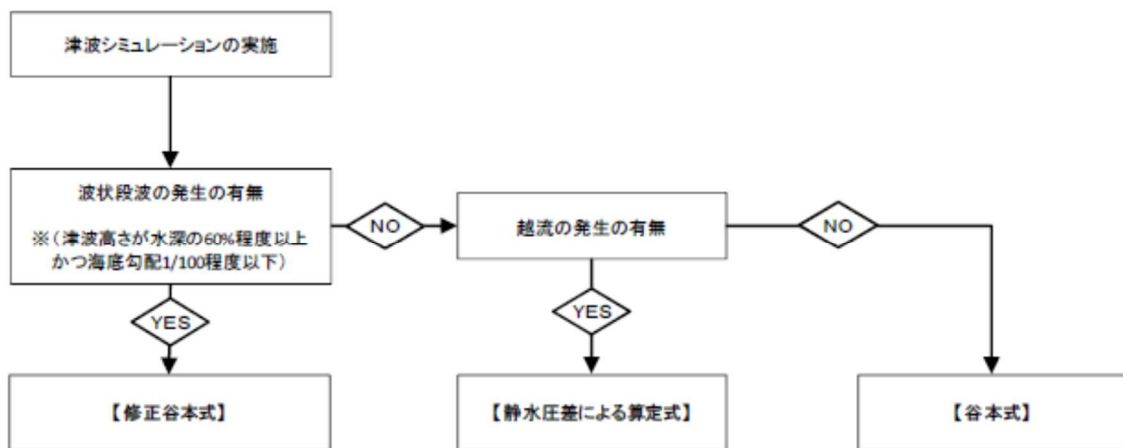


図 1 防波堤に対する津波荷重算定手順

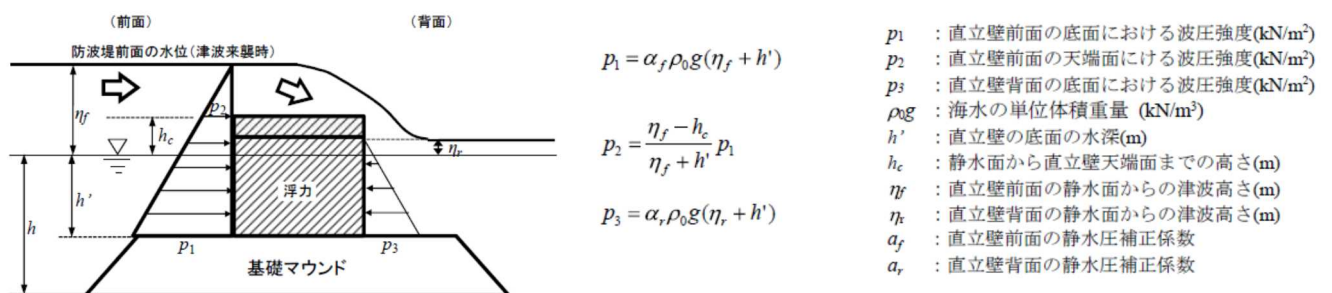


図 2 越流する場合の静水圧差による算定式

- b. 東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る
暫定指針（平成 23 年）²⁾

構造設計用の進行方向の津波波圧は、次式により算定する。

構造設計用の進行方向の津波波圧 $qz = \rho g (ah - z)$

h : 設計用浸水深

Z : 当該部分の地盤面からの高さ ($0 \leq Z \leq ah$)

a : 水深係数。3 とする。

ρg : 海水の単位体積重量

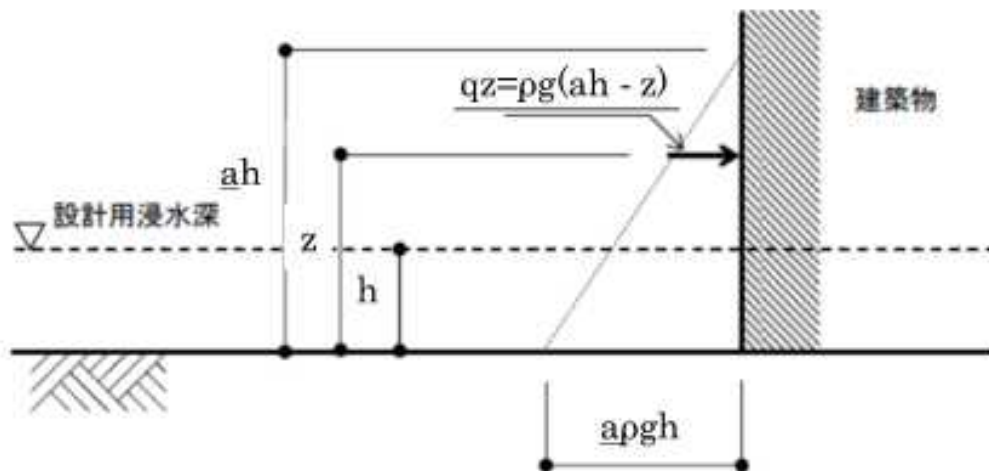


図 3 津波波圧算定の概念図

- c. 港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成 19 年）³⁾

直立壁に作用する津波力は、静水面上 $\eta^* = 3.0a_1$ の高さで $p=0$ 、静水位で $p = 2.2 \rho_0 g a_1$ となる直線分布で、静水位以下は、一様な波圧分布とする。非砕波の津波の場合には、入射津波の波高 H_1 とすれば、 $H_1 = 2a_1$ である。

静水面上の波圧作用高さ $\eta^* = 3.0a_1$

静水面における波圧強度 $p_1 = 2.2 \rho_0 g a_1$

a_1 : 入射津波の静水面上の高さ（振幅）

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量

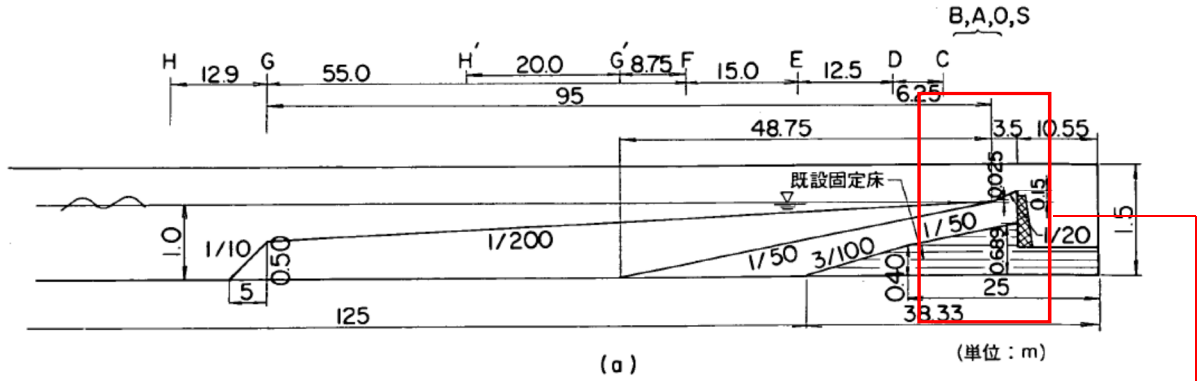
- d. 谷本ら(1983) : 1983 年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察、

港湾技研資料, No. 470 ⁴⁾

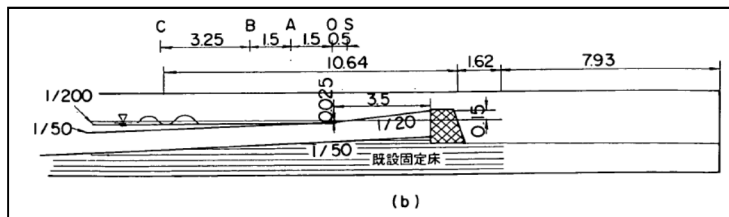
能代港の埋立地ケーソン護岸を想定した直立壁に作用する津波波力について検討している。

[実験水路]

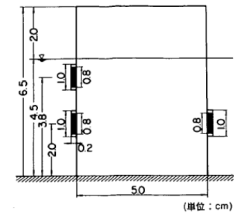
- ・長さ 163m, 幅 1m, 深さ 1.5m
- ・模型床勾配 水深 100m~水深 5m : 1/200, 水深 5m 以浅 : 1/20
- ・縮尺 : 1/200



水深 9m の位置に防波堤の模型を設置し、構造物に働く波圧を計測



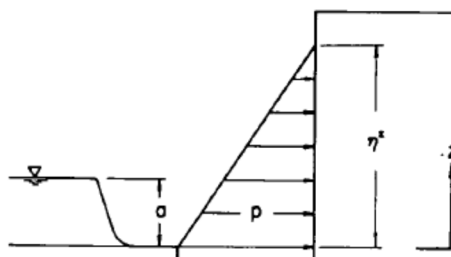
防波堤模型(水深 9m の位置に設置)



[実験条件]

周期 T (s)	波長 L (m)	振幅 a0	2a0/L
60	187.86	9 種類	$3.23 \times 10^{-5} \sim 8.52 \times 10^{-5}$
40	125.21	同上	$5.91 \times 10^{-5} \sim 2.40 \times 10^{-4}$
35	109.54	同上	$1.20 \times 10^{-4} \sim 3.22 \times 10^{-4}$

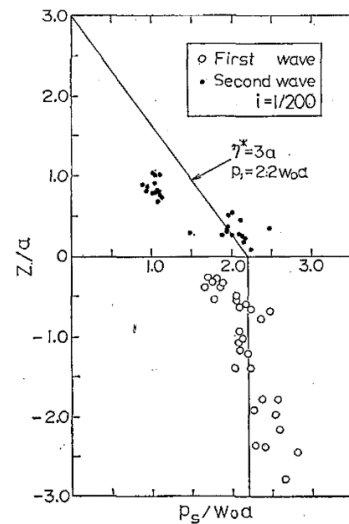
[実験結果]



波圧分布と座標軸
a は Z=0 からの段波の高さ

- 津波波圧 $P_1 = 2.2w_0a_1$
- 作用高さ $\eta^* = 3.0a_1$
- a_1 : 入射津波の静水面上の高さ (振幅)
- w_0 : 流体の単位体積重量

無次元最大波圧分布



- e. 朝倉ら(2000)：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，
海岸工学論文集，第47巻，土木学会，911-915⁵⁾

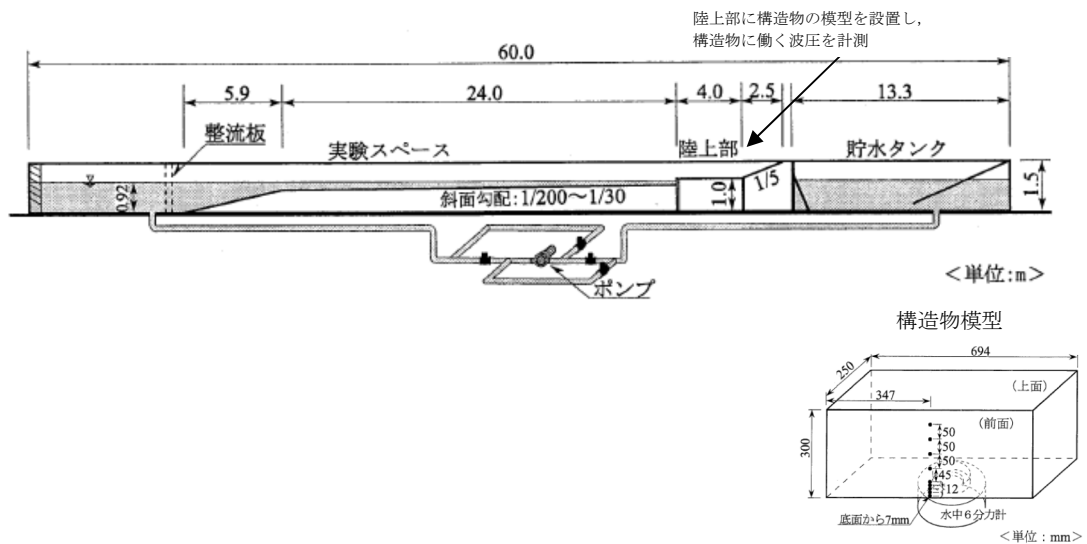
直立護岸を越流した津波の遡上特性から護岸背後の陸上構造物に作用する津波波力について検討している。

[実験水路]

- ・長さ 60m，幅 0.7m，深さ 1.5m
- ・模型床勾配 前面海域：1/200～1/30，陸上：フラット（背後斜面：1/5）
- ・縮尺：1/50*

注記*：秋山ら(2013)の類似の実験より類推。

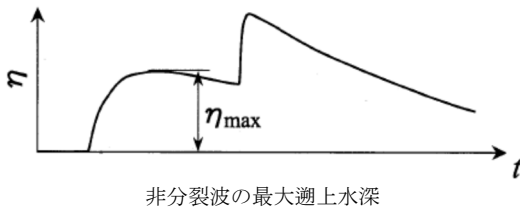
秋山義信，岩前伸幸，池谷毅：盛土上の防潮施設に作用する津波波力，土木学会論文
文集 B3(海洋開発)，Vol.69，No.2，2013



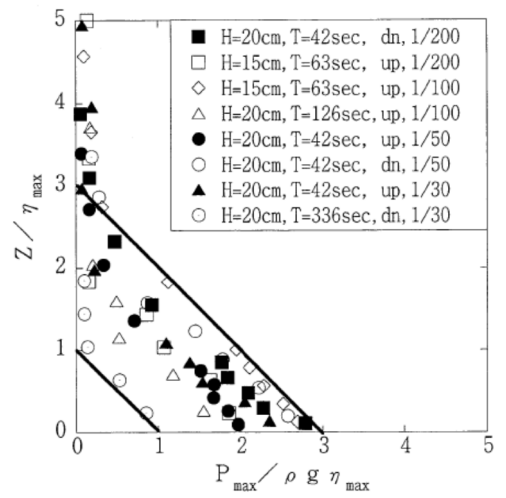
[実験条件]

波条件 (正弦波)	波高(cm)	10, 15, 20
	周期(秒)	42, 63, 126, 336
	初期位相	押し初動, 引き初動
構造物位置	護岸先端からの距離(cm)	50, 100, 150, 200
護岸前面の水深		11.0cm
護岸の天端高		静水面から 8.0cm

[実験結果]



- 津波波圧 $P_1 = 3.0 \rho g \eta_{max}$
- 作用高さ $Z = 3.0 \eta_{max}$
- η_{max} : 最大遡上水深 (振幅)
- ρg : 海水の単位体積重量



越流直前の津波波力の水深係数について

NRA 技術報告「防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について」⁶⁾において、フルード数が 1.5 程度を越える領域で、国土交通省の暫定指針等における水深係数 3 を超える場合があることが確認されていることから、海水貯留堰の前面海域におけるフルード数を確認した。

図 1 に海水貯留堰に対して引き波後に越流する直前の時刻における海水貯留堰前面海域の流向・流速図を示す。図 1 における最大流速箇所においてフルード数を評価した結果を表 1 に示す。海水貯留堰の前面海域におけるフルード数は 1.5 以下であり、越流直前の津波波力の評価において、水深係数 3 を用いることとした。

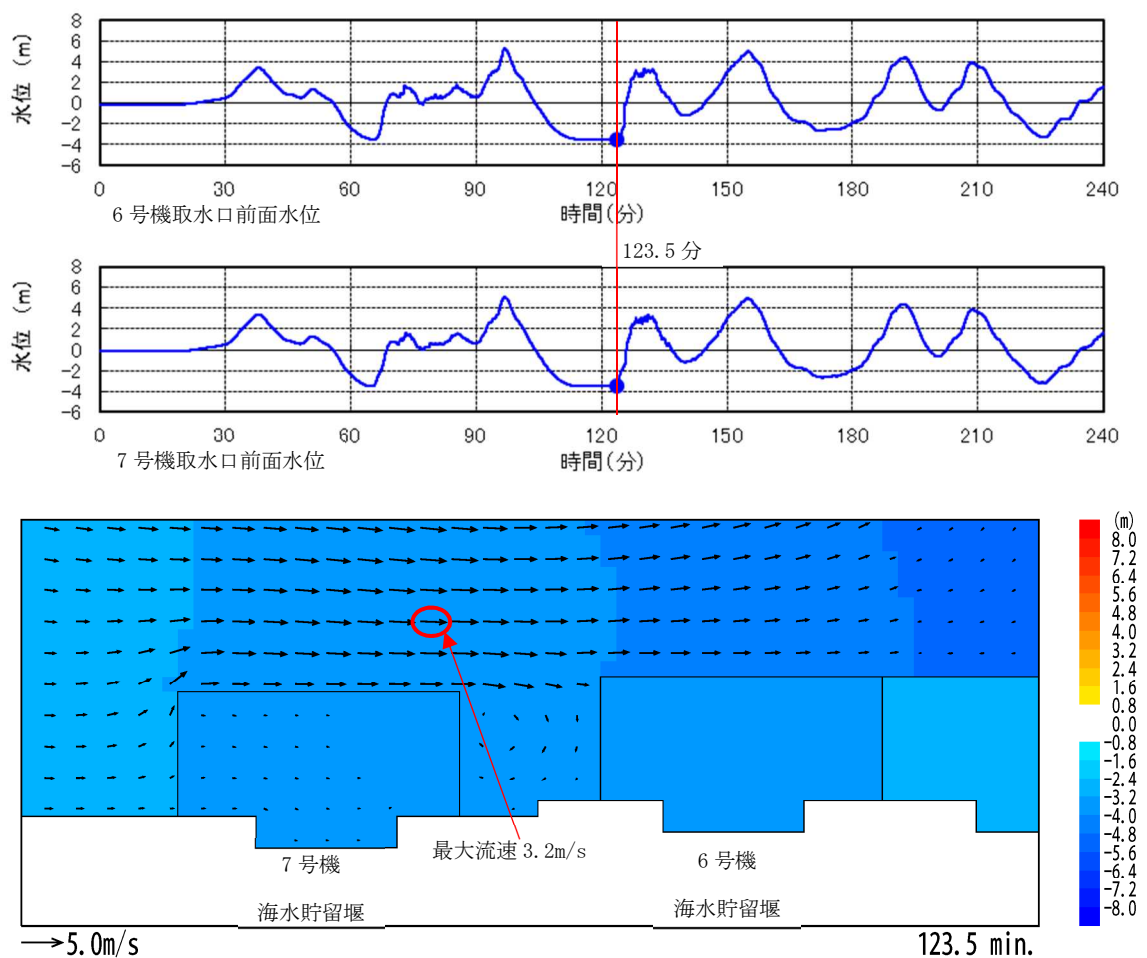


図 1 海水貯留堰越流直前の流向・流速分布 (1) 防波堤あり

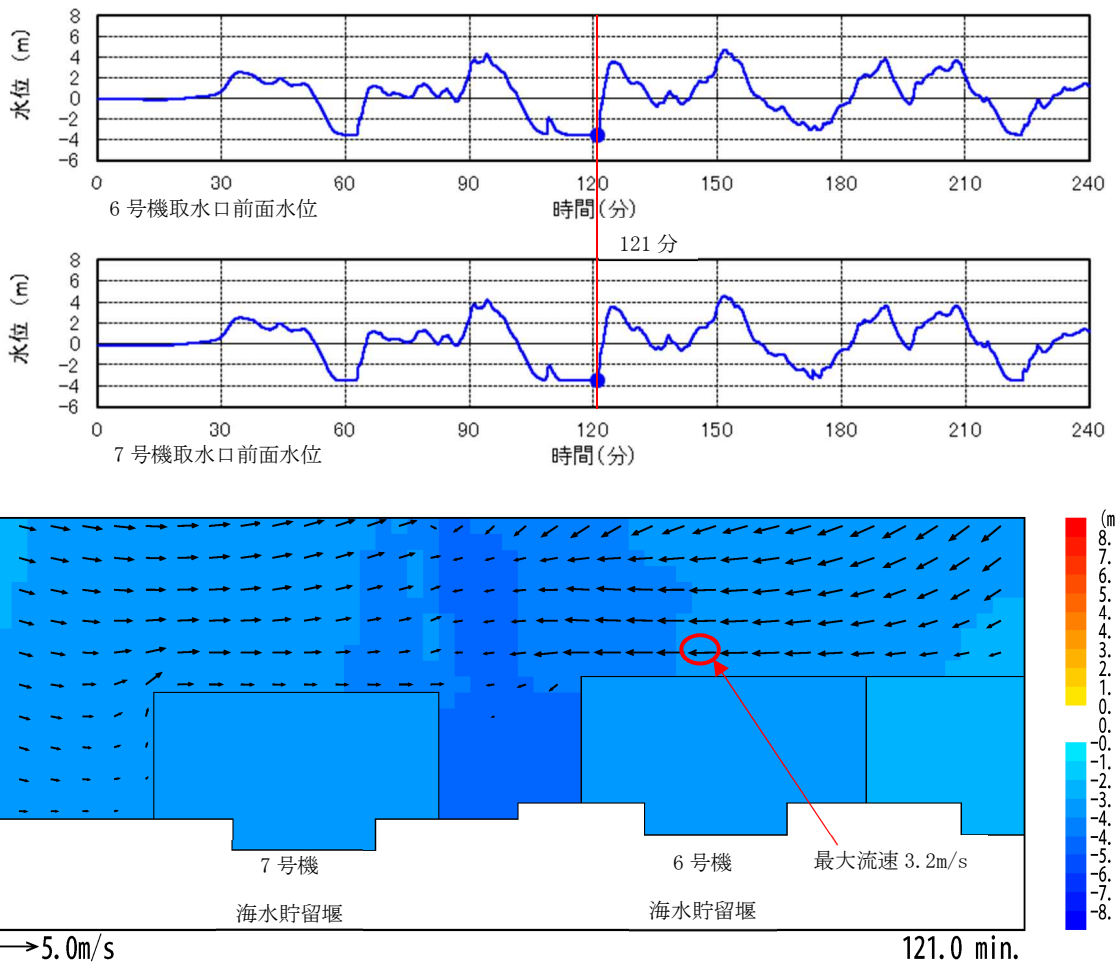


図1 海水貯留堰越流直前の流向・流速分布 (2) 防波堤なし

表1 海水貯留堰越流時のフルード数

	流速 (m/s)	水深 (m)	フルード数
防波堤あり	3.2	2.0	0.8
防波堤なし	3.2	1.9	0.8

浮遊砂濃度を考慮した場合の影響について

(1) 概要

引き波により海水貯留堰が海面から露出し、その後の押し波で海底土砂を巻き上げて襲来する可能性を考慮し、保守的に浮遊砂体積濃度が上限値(1%)のときの、浮遊砂が混じった海水の密度から津波波力及び衝突荷重等を算定した場合の構造物評価への影響について確認する。

(2) 浮遊砂濃度を考慮した場合の海水密度の算定

浮遊砂体積濃度の上限値は、設置変更許可申請書 審査資料「第5条：津波による損傷の防止 別添1：柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉耐津波設計方針について」及びKK7 補足-019-2「津波への配慮に関する説明書に係る補足説明資料 3.1 砂移動による影響確認について」と同様に、高橋ほか(1999)⁷⁾において示される浮遊砂体積濃度の上限値1%とした。

設置変更許可申請書 審査資料添付資料六まとめ資料「資料4-4-1 柏崎刈羽原子力発電所における津波評価について 9. 基準津波による安全性評価」では、論文整理に基づく浮遊砂体積濃度上限値に関する評価を実施している。表-1 に高橋ほか(1999)の検証事例を示す。検証結果から、浮遊砂体積濃度の上限値5%は過大評価であり、浮遊砂体積濃度の上限値は1%が妥当な設定値であると考え、砂移動評価を行っている。

また、FEMA(2012)の静水圧等の算定にあたっては、浮遊砂体積濃度を5%とした時の海水密度と仮定して、 1.10g/cm^3 を計算事例に用いているが、柏崎刈羽原子力発電所の浮遊砂体積濃度とは異なる仮定の下での設定となっている。

ここでは、津波が海底土砂を巻き上げて襲来する際の浮遊砂体積濃度の上限値は、設置変更許可申請書にて妥当な設定値として評価を実施した1%と仮定し、海水密度を算定した場合の影響について確認する。表2に海水密度の算定結果を示す。浮遊砂が混じった海水の密度は 1.05g/cm^3 である。

表1 高橋ほか(1999)の検証事例

実規模検証	文献	計算使用砂粒径	計算格子間隔	浮遊砂濃度上限	浮遊砂濃度上限に関する評価
気仙沼湾 (1960年 チリ地震津波)	玉田ほか (2009)	0.001~ 1mm	25m, 5m	1%, 5%	・ 計算格子間隔が5mの場合、浮遊砂濃度上限5%では実績値より侵食深を過大に評価
八戸港 (1960年 チリ地震津波)	藤田ほか (2010)	0.26mm	10.3m	1%, 2%, 5%	・ 浮遊砂濃度上限5%は過大に評価 ・ 浮遊砂濃度上限1~2%の場合の再現性が良好
宮古港 (2011年東北地方 太平洋沖地震津波)	近藤ほか (2012)	0.08mm	10m	1%	・ 土砂移動の全体的な傾向は良く一致 ・ 防波堤堤頭部の最大洗掘深や断面地形も定量的に概ね良い一致
気仙沼湾 (2011年東北地方 太平洋沖地震津波)	森下ほか (2014)	0.3mm	10m	1% $C_{surr} = \alpha \times \sqrt{U^2 \times V^2}$	・ 砂移動評価に影響を及ぼす因子として、無次元掃流力、流砂量式係数、飽和浮遊砂濃度の3つを抽出 ・ 上記の3つの因子を同時に変えたモデルにより、再現性が向上する可能性を示唆 ・ 飽和浮遊砂濃度については、摩擦速度の関数とすることで再現性向上につながることを示唆

C_{surr} : 飽和浮遊砂濃度 U, V : 断面平均流速成分 α : 係数 (0.01)

表 2 海水密度の算定結果

	密度 [g/cm ³]
海水	1.03
砂	2.69
海水+砂 1%	1.05

(3) 構造物評価への影響検討

表 2 に示す海水密度算定結果を用いたときの荷重を算定する。荷重の算定にあたっては、「V-3-別添 3-1-2 海水貯留堰の強度計算書」に示す 7 号機海水貯留堰鋼管矢板の照査値がもっとも厳しいケース（重畳時 2）の条件に基づき算定した。図 1 に荷重作用図を、表 3 に荷重の算定結果を示す。

衝突荷重の算定にあたっては、KK7 補足-019-2「津波への配慮に関する説明書に係る補足説明資料 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」に示すとおり、海水貯留堰への漂流物衝突荷重のうち最も大きい算出値として、軽自動車-FEMA（2012）より算出された値（499kN）を用いる。適用した FEMA（2012）を式（1）に示す。なお、衝突力 F_i は、漂流物の質量、有効軸剛性及び漂流物を運ぶ流体の最大流速から算出されることから、海水密度による影響はない。

浮遊砂濃度を考慮した場合に構造物の照査結果の影響を把握するため、津波波力算定時と同様に「V-3-別添 3-1-2 海水貯留堰の強度計算書」に示す 7 号機海水貯留堰鋼管矢板の照査値がもっとも厳しいケース（重畳時 2）について照査結果を比較した。表 4 及び表 5 に照査結果を示す。引き波後の押し波による海底土砂の巻き上げにより、海水密度が上昇したとしても、構造物の評価に影響がないことを確認した。

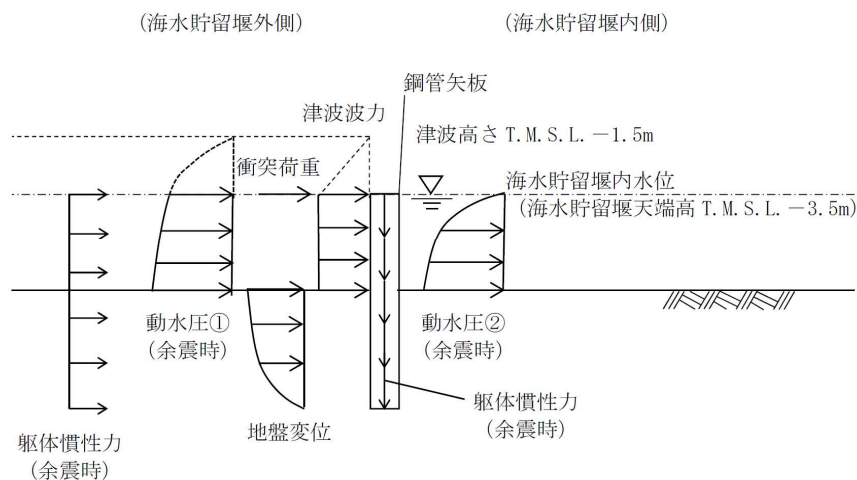


図 1 荷重作用図（鋼管矢板 重畳時 2）

表3 荷重の算定結果

ケース名		海水密度 [g/cm ³]	津波波力 [kN/m ²]	動水圧※ [kN/m ²]	(参考)	
					衝突荷重 [kN]	水平方向 慣性力 [kN/m ²]
基本 ケース	浮遊砂濃度を考 慮しない場合	1.03	20.2	27.0	499	8.6
影響検討 ケース	浮遊砂濃度を考 慮した場合	1.05	20.6	27.6		

※ 海水貯留堰の底面位置における動水圧

$$F_i = 1.3u_{max}\sqrt{km_d(1+c)} \dots \dots \text{式 (1)}$$

ここに、

F_i : 衝突力[kN]

u_{max} : 漂流物を運ぶ流体の最大流速 (=6.0 m/s)

k : 漂流物の有効軸剛性[N/m] (保守的に高畠ら (2015) により求められる k_3 (2.04×10^6 [N/m]) を用いる。)

m_d : 漂流物の質量 (=1000 kg)

c : 付加質量係数 (=1.0)

表4 曲げ軸力に対する照査結果 (重畳時2 断面②: 鋼管矢板端部)

ケース名		曲げモーメント (kN・m)	軸力 (kN)	曲げ軸 応力 (N/mm ²)	短期許容 応力度 (N/mm ²)	照査値
基本 ケース	浮遊砂濃度を考慮 しない場合	1485	80	171	277	0.62
影響検討 ケース	浮遊砂濃度を考慮 した場合	1490	80	172	277	0.62

表5 せん断力に対する照査結果 (重畳時2 断面②: 鋼管矢板端部)

ケース名		せん断力 (kN)	せん断応力 (N/mm ²)	短期許容 応力度 (N/mm ²)	照査値
基本 ケース	浮遊砂濃度を考慮 しない場合	557	34	157	0.22
影響検討 ケース	浮遊砂濃度を考慮 した場合	560	35	157	0.23

(4) まとめ

以上より、引き波後の押し波による海底土砂の巻き上げに伴う浮遊砂濃度の影響を考慮した場合、海水貯留堰に作用する荷重の増分は少なく、照査結果も余裕があり、海水貯留堰鋼管矢板の評価に影響がないことを確認した。

【参考文献】

- 1) 国土交通省 港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，平成 25 年 9 月。
- 2) 国土交通省住宅局長：東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針，平成 23 年 11 月 17 日。
- 3) 社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成 19 年 7 月。
- 4) 谷本勝利，高山知司，村上和男，村田繁，鶴谷広一，高橋重雄，森川雅行，吉本靖俊，中野晋，平石哲也：1983 年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察，港湾技研資料（運輸省港湾技術研究所），No. 470，Nov. 1983.
- 5) 朝倉良介，岩瀬浩二，池谷毅，高尾誠，金戸俊道，藤井直樹，大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海外工学論文集，第 47 卷，pp.911-915，2000.
- 6) 石田暢生，森谷寛，中村英孝，飯島亨，川内英史：防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について，NRA 技術報告（原子力規制委員会），NTEC-2014-4001，平成 26 年 12 月。
- 7) 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔：掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発，海岸工学論文集，46，606-610，1999.

地震荷重と風荷重の組合せの影響評価について

地震荷重と風荷重の組合せの影響評価について

工事計画に係る説明資料（発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書）のうち資料1「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する説明書に係る補足説明資料」（以下「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する説明書に係る補足説明資料」という。）の「1. 外部事象の重畳の考え方」別紙-1において述べているとおり、地震を主事象とし風を従事象とする組合せは「同時に発生する可能性が極めて低いもの」と整理している。また、同資料「2.2 積雪・降下火砕物堆積状態での地震発生時の評価について」で抽出したNo.1の重畳評価ケースである地震を主事象とし雪を従事象とする組合せにおいては、ベース負荷として新潟市の冬季の平均風速（4.1m/s）を考慮して設計している（別紙-1参照）。

このうち、積雪荷重が生じにくい形状の施設や除雪等に期待できる施設等については、 10^{-2} /年規模の積雪荷重の組合せを考慮していない。

これらの施設等に関しては、従事象としての積雪荷重を設計には加えていないものの、想定される地震とその際に生じうる外部事象に対し一定の裕度を有していることを確認するため、風荷重を大きくした場合の影響を確認する。

なお、本評価では、外部事象防護対象施設に加え、外部事象防護対象施設以外の設計基準対象施設及び重大事故等対処設備も必要に応じて同様の評価を実施する。

(1) 組み合わせる風速の条件について

設計基準となる風速は、保守的な値となるよう、新潟県各地の観測記録を比較し、その中でも大きい風速が観測される傾向がある新潟市の観測記録に基づき定めているが、地震荷重と組み合わせる風速については、ベース負荷として用いている冬季の平均風速よりも大きい値として、柏崎市の観測記録の既往最大である16m/s（10分間平均値、地上高10m）（別紙-2参照）を用いる。

なお、発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する説明書に係る補足説明資料の「1. 外部事象の重畳の考え方」別紙-1において述べているとおり、地震を主事象とし風を従事象とする組合せは「同時に発生する可能性が極めて低いもの」と整理しているが、本評価で用いる風速値は統計的には10分間平均値の年超過確率 2×10^{-2} /年に相当する値となる（別紙-5参照）。また、裕度確認においては、建築基準法及び建設省告示を参考に、高さに応じたガスト影響係数を乗じることで、突発的な風荷重についても考慮することとする。

(2) 対象となる施設の選定について

対象となる施設等については、外部事象防護対象施設に加え、耐震計算書の屋外対象物を参考に図1のフローにて選定した。選定結果を別紙-3にまとめる。

また、選定された対象のうち以下の観点で特に風の影響を受けやすいと考えられるものについて裕度の確認を行う（表1参照）。

- a. 重量が軽く耐震性能の裕度に対して風の影響が大きくなる可能性のある鉄骨造施設
- b. その他、屋外で風の影響を受けると推定される施設等

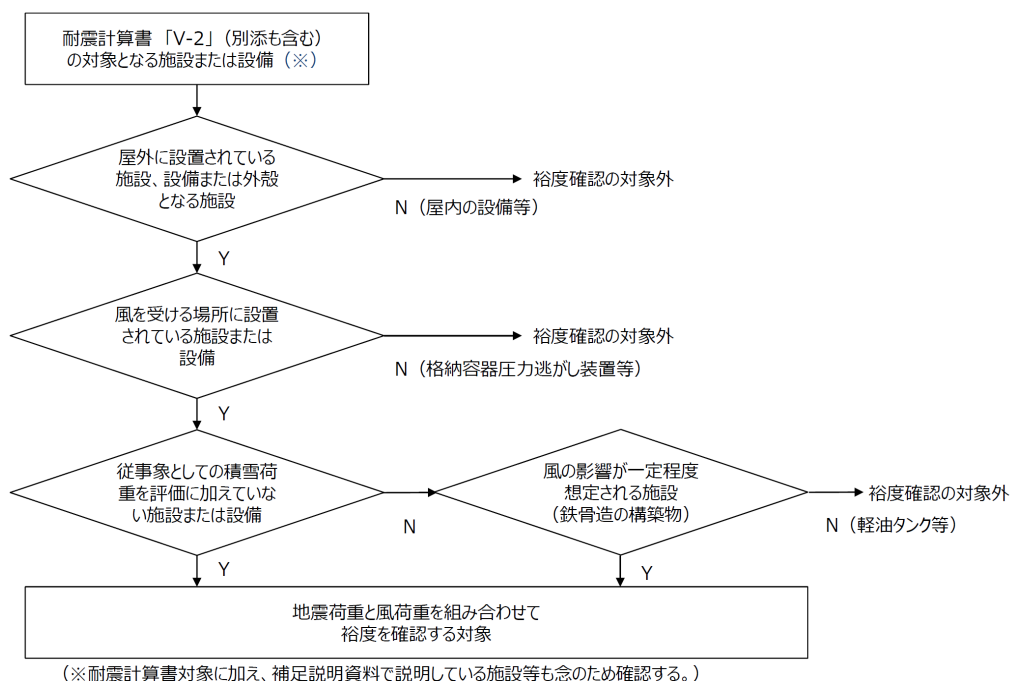


図1 地震荷重と風荷重を組み合わせる対象選定フロー

表1 対象施設等のうち、特に風の影響を受けやすいと推定される施設等一覧

カテゴリー	施設等	観点
外部事象防護対象施設	(該当施設等なし)	—
上記以外の設計基準対象施設	主排気筒 (7号機)	a.
	火災感知器 (熱感知カメラ)	b.
	衛星無線通信装置用アンテナ	b.
重大事故等対処設備	第一ガスタービン発電機	b.

(3) 確認の方法

以下の方法のうち、適切な手段を選択し確認を行うか、適用できない場合には個別で評価を行うこととする。

方法①：耐震計算書の最小裕度部材について、地震+風荷重の評価を行う。

方法②：「耐震計算書（地震荷重）の評価結果（裕度）」と「地震荷重 ($m \cdot C_H \cdot g$) と風荷重 (W) の比」の比較を行う。

方法③：「加振試験 FRS の裕度」と「風荷重 (W)」の比較を行う。

(4) 確認の結果

対象とした施設のうち、主排気筒（7号機）についてはV-2-7-2-1「主排気筒の耐震性についての計算書」の補足説明資料の別紙5「地震荷重と風荷重を重畳させた場合の影響検討」に示すように、主排気筒のモデル化における保守性を、実状に合わせた解析モデルへと見直すことで、基準地震動S_s及び風荷重（16m/sに基づく）の組合せを考慮した場合であっても、最も厳しい部材において裕度を有することを確認した。

また、表2に示すとおり、機器・配管系の設備の一部も地震荷重に加え16m/sの風荷重を考慮しても、裕度の範囲に含まれることが確認された。

表2 地震荷重と風荷重を組み合わせた際の裕度の確認結果

施設等	確認方法	基準地震動S _s の評価			基準地震動S _s + 風荷重（16m/s）の評価			確認結果
		評価値	判定値	裕度	評価値	判定値	裕度	
火災感知器 （熱感知カメラ）	①	29 MPa	154 MPa	5.3	32 MPa	154 MPa	4.8	現設計の裕度に包絡されることを確認
衛星無線通信装置 用アンテナ	②	21 MPa	193 MPa	9.1	26.6 MPa	193 MPa	7.2	現設計の裕度に包絡されることを確認
第一ガスタービン 発電機（発電機車）	③	100%	158%	58%*	102%	158%	56%	現設計の裕度に包絡されることを確認
第一ガスタービン 発電機（制御車）	③	100%	145%	45%*	104%	145%	41%	現設計の裕度に包絡されることを確認

注記*：設計用FRSに対して加振試験波が含む裕度を示す。

(5) まとめ

地震を主事象とし風を従事象とする組合せは「同時に発生する可能性が極めて低いもの」と整理してきているが、地震とその他自然現象の組合せのうち、積雪荷重の影響を受けにくい施設等について、設計の裕度を確認するため柏崎市の観測記録の既往最大である16m/sの風荷重と地震荷重を組み合わせた確認の方針を検討し確認を行った。対象となり評価を行ったいずれの施設等においても、一定の裕度を有していることが確認された。今後、残りの施設等についても確認を実施する。

なお、地震荷重と組み合わせる風速16m/sは年超過確率で 2×10^{-2} /年に相当する風速であるが、別紙-4に記載するとおり、継続時間を考慮すると組み合わせた際の掛け

合わせた結果は、 4×10^{-11} / 年となる。

(6) 別紙

- 別紙-1 「冬季の平均的な風速」の算出について
- 別紙-2 柏崎市の既往最大の風速（10分間平均値）
- 別紙-3 対象施設の選定結果及び裕度評価結果について
- 別紙-4 地震（Ss）と風（16m/s）の組合せに関する統計的考察について
- 別紙-5 柏崎市における既往最大風速 16m/s の年超過確率評価方法

以上

「冬季の平均的な風速」の算出について

1. インプットデータ入手元

気象庁 HP「過去の気象データ・ダウンロード」からデータをダウンロード

(<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>)

2. インプットデータ概要

- ・新潟市

- ・1961年10月～2012年3月までの冬季（10月，11月，12月，1月，2月，3月）の月平均風速データ ^(※) 306点

※：月平均風速データは，毎10分の観測値（144回/日）の平均である日平均風速値を月の日数で平均して求められている

- ・正常値（統計のもととなるデータに欠損がない）及び準正常値（統計を行う対象資料が許容範囲で欠けている）を使用

3. 算出方法

- ・306点の風速データを足して，サンプル数306で単純平均（荷重平均を考慮せず）し算出

4. 算出結果

上記算出方法により算出し，4.1m/sとの結果を得た。

表1 「冬季の平均的な風速」算出に使用したデータ

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1961	10	3.7	3.7
1961	11	4.2	4.2
1961	12	5	5
1962	1	5.4	5.4
1962	2	5.3	5.3
1962	3	4.9	4.9
1962	4	4.3	-
1962	5	3.3	-
1962	6	2.9	-
1962	7	3.2	-
1962	8	3.6	-
1962	9	3.4	-
1962	10	2.9	2.9
1962	11	4	4
1962	12	4.5	4.5
1963	1	6.5	6.5
1963	2	4.6	4.6
1963	3	4.2	4.2
1963	4	3.9	-
1963	5	3.2	-
1963	6	3.2	-
1963	7	2.8	-
1963	8	3	-
1963	9	3.5	-
1963	10	3.4	3.4
1963	11	3.8	3.8
1963	12	4.5	4.5
1964	1	4.1	4.1
1964	2	5.2	5.2
1964	3	4.2	4.2

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1964	4	4	-
1964	5	3.4	-
1964	6	3.6	-
1964	7	2.9	-
1964	8	3.3	-
1964	9	2.9	-
1964	10	3.3	3.3
1964	11	4.1	4.1
1964	12	4.4	4.4
1965	1	5.1	5.1
1965	2	6.1	6.1
1965	3	5.2	5.2
1965	4	4.1	-
1965	5	3.2	-
1965	6	2.7	-
1965	7	3	-
1965	8	2.9	-
1965	9	3.3	-
1965	10	3.1	3.1
1965	11	5.1	5.1
1965	12	5.6	5.6
1966	1	6.6	6.6
1966	2	5.1	5.1
1966	3	5.1	5.1
1966	4	4.1	-
1966	5	4	-
1966	6	3.6	-
1966	7	3.4	-
1966	8	3	-
1966	9	3.4	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1966	10	3.5	3.5
1966	11	4.2	4.2
1966	12	5.1	5.1
1967	1	6.4	6.4
1967	2	4.3	4.3
1967	3	4.2	4.2
1967	4	4.4	-
1967	5	3.2	-
1967	6	3.4	-
1967	7	2.9	-
1967	8	3.2	-
1967	9	3.4	-
1967	10	3.5	3.5
1967	11	3.8	3.8
1967	12	5.3	5.3
1968	1	6.1	6.1
1968	2	4.9	4.9
1968	3	4.4	4.4
1968	4	3.4	-
1968	5	3.6	-
1968	6	3.3	-
1968	7	3.7	-
1968	8	3.7	-
1968	9	4	-
1968	10	2.9	2.9
1968	11	3.8	3.8
1968	12	4.4	4.4
1969	1	4.5	4.5
1969	2	4.5	4.5
1969	3	4.4	4.4
1969	4	3.7	-
1969	5	4.2	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1969	6	3.2	-
1969	7	3.1	-
1969	8	3.1	-
1969	9	2.9	-
1969	10	3.5	3.5
1969	11	4.2	4.2
1969	12	5.3	5.3
1970	1	5	5
1970	2	5.8	5.8
1970	3	5.5	5.5
1970	4	3.6	-
1970	5	3.8	-
1970	6	2.9	-
1970	7	3.3	-
1970	8	3.2	-
1970	9	3	-
1970	10	3.2	3.2
1970	11	4.4	4.4
1970	12	4.8	4.8
1971	1	5	5
1971	2	4.1	4.1
1971	3	4.9	4.9
1971	4	3.6	-
1971	5	3.5	-
1971	6	3	-
1971	7	3.1	-
1971	8	3.3	-
1971	9	3.2	-
1971	10	3.2	3.2
1971	11	3.7	3.7
1971	12	4.5	4.5
1972	1	4.1	4.1

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1972	2	4.8	4.8
1972	3	3.5	3.5
1972	4	3.6	-
1972	5	3.7	-
1972	6	3.3	-
1972	7	3.3	-
1972	8	2.9	-
1972	9	3.5	-
1972	10	3.6	3.6
1972	11	5.1	5.1
1972	12	4.5	4.5
1973	1	4.5	4.5
1973	2	4.9	4.9
1973	3	4.9	4.9
1973	4	3.9	-
1973	5	3.5	-
1973	6	2.8	-
1973	7	2.7	-
1973	8	3	-
1973	9	3.2	-
1973	10	3.5	3.5
1973	11	5	5
1973	12	5.4	5.4
1974	1	6.1	6.1
1974	2	4.4	4.4
1974	3	3.9	3.9
1974	4	4.3	-
1974	5	3.4	-
1974	6	3.2	-
1974	7	2.6	-
1974	8	3.1	-
1974	9	3.2	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1974	10	3.4	3.4
1974	11	4.9	4.9
1974	12	4.8	4.8
1975	1	4.1	4.1
1975	2	4.2	4.2
1975	3	3.8	3.8
1975	4	3.3	-
1975	5	3.1	-
1975	6	2.7	-
1975	7	2.5	-
1975	8	2.8	-
1975	9	2.6	-
1975	10	2.8	2.8
1975	11	3.3	3.3
1975	12	3.5	3.5
1976	1	4.8	4.8
1976	2	3.5	3.5
1976	3	3.3	3.3
1976	4	2.8	-
1976	5	3	-
1976	6	2.7	-
1976	7	2.4	-
1976	8	2.6	-
1976	9	2.6	-
1976	10	3.3	3.3
1976	11	3.9	3.9
1976	12	4.5	4.5
1977	1	4.9	4.9
1977	2	3.9	3.9
1977	3	3.2	3.2
1977	4	3.4	-
1977	5	3.2	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1977	6	2.7	-
1977	7	2.3	-
1977	8	2.7	-
1977	9	2.4	-
1977	10	2.2	2.2
1977	11	2.9	2.9
1977	12	3.6	3.6
1978	1	4.2	4.2
1978	2	4	4
1978	3	3.5	3.5
1978	4	3.3	-
1978	5	3	-
1978	6	2.4	-
1978	7	2.5	-
1978	8	2.8	-
1978	9	2.4	-
1978	10	2.9	2.9
1978	11	2.5	2.5
1978	12	3.3	3.3
1979	1	3.4	3.4
1979	2	3.1	3.1
1979	3	3.3	3.3
1979	4	3.5	-
1979	5	2.8	-
1979	6	2.2	-
1979	7	2.5	-
1979	8	2.6	-
1979	9	2.3	-
1979	10	2.6	2.6
1979	11	3.1	3.1
1979	12	3	3
1980	1	4	4

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1980	2	3.8	3.8
1980	3	2.7	2.7
1980	4	2.4	-
1980	5	2.6	-
1980	6	2.5	-
1980	7	2.1	-
1980	8	2.2	-
1980	9	2.1	-
1980	10	3.3	3.3
1980	11	2.5	2.5
1980	12	4.4	4.4
1981	1	5.4	5.4
1981	2	4	4
1981	3	3.8	3.8
1981	4	3.7	-
1981	5	3.7	-
1981	6	2.4	-
1981	7	2.7	-
1981	8	3.1	-
1981	9	2.7	-
1981	10	3.6	3.6
1981	11	4.2	4.2
1981	12	4.5	4.5
1982	1	4.7	4.7
1982	2	4.3	4.3
1982	3	3.8	3.8
1982	4	3.9	-
1982	5	3.5	-
1982	6	3.2	-
1982	7	3	-
1982	8	3.4	-
1982	9	3.5	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1982	10	3.5	3.5
1982	11	3.9	3.9
1982	12	4.3	4.3
1983	1	4.5	4.5
1983	2	4.6	4.6
1983	3	4.1	4.1
1983	4	3.5	-
1983	5	3.6	-
1983	6	3.4	-
1983	7	3.1	-
1983	8	3.1	-
1983	9	3	-
1983	10	3.4	3.4
1983	11	4	4
1983	12	4.8	4.8
1984	1	4.4	4.4
1984	2	4.9	4.9
1984	3	3.8	3.8
1984	4	2.9	-
1984	5	3.2	-
1984	6	3	-
1984	7	2.9	-
1984	8	3.3	-
1984	9	3	-
1984	10	3.7	3.7
1984	11	3.3	3.3
1984	12	4.4	4.4
1985	1	5.1	5.1
1985	2	4.8	4.8
1985	3	3.3	3.3
1985	4	3.2	-
1985	5	3	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1985	6	3	-
1985	7	2.8	-
1985	8	3.2	-
1985	9	2.9	-
1985	10	3.3	3.3
1985	11	4	4
1985	12	4.2	4.2
1986	1	5.1	5.1
1986	2	4.4	4.4
1986	3	4.1	4.1
1986	4	3.8	-
1986	5	3.5	-
1986	6	3	-
1986	7	2.9	-
1986	8	3.1	-
1986	9	3.1	-
1986	10	3.2	3.2
1986	11	3.9	3.9
1986	12	4.6	4.6
1987	1	5.1	5.1
1987	2	4.8	4.8
1987	3	4.1	4.1
1987	4	3.5	-
1987	5	3.3	-
1987	6	3.2	-
1987	7	3.2	-
1987	8	3.1	-
1987	9	3.5	-
1987	10	3.4	3.4
1987	11	4	4
1987	12	4.1	4.1
1988	1	4.7	4.7

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1988	2	4.7	4.7
1988	3	3.9	3.9
1988	4	3.7	-
1988	5	3.5	-
1988	6	3.3	-
1988	7	3.1	-
1988	8	3	-
1988	9	3	-
1988	10	3.6	3.6
1988	11	3.9	3.9
1988	12	4.7	4.7
1989	1	4.1	4.1
1989	2	3.8	3.8
1989	3	3.9	3.9
1989	4	3.8	-
1989	5	3.4	-
1989	6	3.3	-
1989	7	3.3	-
1989	8	3.2	-
1989	9	2.7	-
1989	10	3.4	3.4
1989	11	3.7	3.7
1989	12	4.4	4.4
1990	1	4.6	4.6
1990	2	3.3	3.3
1990	3	4.1	4.1
1990	4	3.5	-
1990	5	3	-
1990	6	3.4	-
1990	7	3.1	-
1990	8	3.2	-
1990	9	3.2	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1990	10	2.8	2.8
1990	11	3.8	3.8
1990	12	4.9	4.9
1991	1	4.7	4.7
1991	2	5	5
1991	3	3.6	3.6
1991	4	3.2	-
1991	5	3.4	-
1991	6	3.2	-
1991	7	3.4	-
1991	8	3.1	-
1991	9	3.1	-
1991	10	3.1	3.1
1991	11	3.4	3.4
1991	12	3.9	3.9
1992	1	3.9	3.9
1992	2	4.3	4.3
1992	3	3.3	3.3
1992	4	3.9	-
1992	5	3.5	-
1992	6	3	-
1992	7	3.1	-
1992	8	3.2	-
1992	9	3.7	-
1992	10	3	3
1992	11	3.7	3.7
1992	12	4.5	4.5
1993	1	4.3	4.3
1993	2	5.3	5.3
1993	3	3.7	3.7
1993	4	4.1	-
1993	5	3.3	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1993	6	3.1	-
1993	7	3	-
1993	8	3.1	-
1993	9	3	-
1993	10	3.4	3.4
1993	11	3.7	3.7
1993	12	4.7	4.7
1994	1	4.3	4.3
1994	2	5.7	5.7
1994	3	4	4
1994	4	3.8	-
1994	5	3.7	-
1994	6	3	-
1994	7	3.3	-
1994	8	3.1	-
1994	9	3.1	-
1994	10	3	3
1994	11	3.1	3.1
1994	12	4.4	4.4
1995	1	4.9	4.9
1995	2	3.7	3.7
1995	3	3.7	3.7
1995	4	4.1	-
1995	5	3.3	-
1995	6	2.9	-
1995	7	2.9	-
1995	8	3.2	-
1995	9	3.1	-
1995	10	3.3	3.3
1995	11	4.7	4.7
1995	12	5.1	5.1
1996	1	4.8	4.8

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1996	2	4.3	4.3
1996	3	4.2	4.2
1996	4	3.9	-
1996	5	3.2	-
1996	6	3.2	-
1996	7	3	-
1996	8	3.3	-
1996	9	3	-
1996	10	3	3
1996	11	3.7	3.7
1996	12	3.8	3.8
1997	1	5.1	5.1
1997	2	4.5	4.5
1997	3	3.9	3.9
1997	4	3.5	-
1997	5	3.5	-
1997	6	3.1	-
1997	7	3.3	-
1997	8	3	-
1997	9	3.2	-
1997	10	3.5	3.5
1997	11	3.6	3.6
1997	12	3.6	3.6
1998	1	4.4	4.4
1998	2	3.6	3.6
1998	3	3.9	3.9
1998	4	3	-
1998	5	3.2	-
1998	6	3.8	-
1998	7	3.2	-
1998	8	2.9	-
1998	9	3	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
1998	10	3.4	3.4
1998	11	4	4
1998	12	4.2	4.2
1999	1	4.9	4.9
1999	2	4.5	4.5
1999	3	3.8	3.8
1999	4	3.8	-
1999	5	3.5	-
1999	6	2.9	-
1999	7	2.8	-
1999	8	3.2	-
1999	9	3.2	-
1999	10	3.3	3.3
1999	11	3.4	3.4
1999	12	4.2	4.2
2000	1	4.3	4.3
2000	2	5.2	5.2
2000	3	4.8	4.8
2000	4	4.7	-
2000	5	3.2	-
2000	6	2.7	-
2000	7	3	-
2000	8	3	-
2000	9	3.5	-
2000	10	2.8	2.8
2000	11	3.7	3.7
2000	12	4.6	4.6
2001	1	5.2	5.2
2001	2	4.4	4.4
2001	3	4.3	4.3
2001	4	3.4	-
2001	5	3	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
2001	6	3	-
2001	7	3.2	-
2001	8	3.1	-
2001	9	3.1	-
2001	10	3.4	3.4
2001	11	3.4	3.4
2001	12	4.9	4.9
2002	1	4.9	4.9
2002	2	3.9	3.9
2002	3	3.9	3.9
2002	4	3.5	-
2002	5	3.1	-
2002	6	3.1	-
2002	7	2.8	-
2002	8	3.4	-
2002	9	2.9	-
2002	10	3.6	3.6
2002	11	4.2	4.2
2002	12	3.1	3.1
2003	1	4.3	4.3
2003	2	3.1	3.1
2003	3	3.7	3.7
2003	4	3.2	-
2003	5	3.1	-
2003	6	3	-
2003	7	3	-
2003	8	2.8	-
2003	9	2.8	-
2003	10	3.4	3.4
2003	11	3.2	3.2
2003	12	4.6	4.6
2004	1	4.4	4.4

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
2004	2	4.1	4.1
2004	3	3.4	3.4
2004	4	3.7	-
2004	5	3.2	-
2004	6	2.5	-
2004	7	3.4	-
2004	8	3.6	-
2004	9	3.2	-
2004	10	2.8	2.8
2004	11	3	3
2004	12	3.8	3.8
2005	1	4.3	4.3
2005	2	4.2	4.2
2005	3	3.8	3.8
2005	4	3.5	-
2005	5	3.3	-
2005	6	2.8	-
2005	7	2.9	-
2005	8	2.6	-
2005	9	3.1	-
2005	10	2.6	2.6
2005	11	3.3	3.3
2005	12	4.6	4.6
2006	1	3.8	3.8
2006	2	3.9	3.9
2006	3	3.8	3.8
2006	4	3.8	-
2006	5	3	-
2006	6	2.9	-
2006	7	2.8	-
2006	8	2.8	-
2006	9	2.9	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
2006	10	2.6	2.6
2006	11	3	3
2006	12	3.4	3.4
2007	1	3.5	3.5
2007	2	3.7	3.7
2007	3	3.8	3.8
2007	4	3	-
2007	5	3.6	-
2007	6	2.5	-
2007	7	2.5	-
2007	8	2.5	-
2007	9	3.1	-
2007	10	2.6	2.6
2007	11	3.3	3.3
2007	12	3.3	3.3
2008	1	3.7	3.7
2008	2	4	4
2008	3	3.1	3.1
2008	4	3.3	-
2008	5	3.9	-
2008	6	2.6	-
2008	7	2.2	-
2008	8	2.9	-
2008	9	2.5	-
2008	10	2.9	2.9
2008	11	3	3
2008	12	3.9	3.9
2009	1	3.9	3.9
2009	2	3.5	3.5
2009	3	3.6	3.6
2009	4	3.4	-
2009	5	3.1	-

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
2009	6	2.7	-
2009	7	2.5	-
2009	8	2.3	-
2009	9	2.8	-
2009	10	2.9	2.9
2009	11	3.4	3.4
2009	12	3.8	3.8
2010	1	4.3	4.3
2010	2	3.1	3.1
2010	3	3.5	3.5
2010	4	3.9	-
2010	5	2.9	-
2010	6	2.2	-
2010	7	2.4	-
2010	8	2.4	-
2010	9	2.9	-
2010	10	3	3

年	月	気象庁 風速データ (m/s)	算出に使用 したデータ (m/s)
2010	11	3.3	3.3
2010	12	4.4	4.4
2011	1	4.3	4.3
2011	2	3	3
2011	3	3.6	3.6
2011	4	3.1	-
2011	5	3.1	-
2011	6	2.6	-
2011	7	3	-
2011	8	2.7	-
2011	9	3.2	-
2011	10	3	3
2011	11	2.8	2.8
2011	12	4	4
2012	1	3.7	3.7
2012	2	3.4	3.4
2012	3	3.3	3.3

以上

柏崎市の既往最大の風速（10 分間平均値）

要素名/順位	1位	2位	3位	4位	5位	6位	7位	8位	9位	10位	統計期間
日降水量 (mm)	256 (2005/6/28)	141 (1984/8/30)	137.5 (2017/7/3)	123 (1978/6/26)	121 (2004/10/20)	121 (1999/3/15)	113 (1985/7/8)	111 (1996/8/15)	108.0 (2017/7/4)	108 (1993/7/10)	1976/4 2020/5
日最大10分間降水量 (mm)	17.5 (2018/8/28)	17.0 (2013/7/7)	17.0 (2010/8/14)	16.5 (2014/8/21)	16.5 (2013/8/2)	16.0 (2013/8/2)	15.5 (2013/7/14)	15.5 (2011/7/6)	13.5 (2011/10/1)	13.0 (2009/8/2)	2008/3 2020/5
日最大1時間降水量 (mm)	52 (2007/8/22)	50 (1976/8/14)	48 (1991/8/8)	46 (1984/8/30)	43.5 (2013/7/14)	41.0 (2010/9/14)	39.0 (2008/7/26)	39 (1993/7/10)	38 (2006/9/10)	38 (2006/6/28)	1976/4 2020/5
月降水量の多い方から (mm)	627.5 (2014/12)	595 (1999/12)	594 (1985/11)	584 (1980/12)	544 (2002/11)	516.0 (2010/1)	504.0 (2013/11)	488 (2006/7)	486 (1995/7)	480.0 (2017/7)	1976/4 2020/4
月降水量の少ない方から (mm)	15 (1994/8)	21 (1985/8)	23 (1994/4)	27 (1984/4)	31.0 (2010/8)	33.5 (2018/7)	37 (1994/5)	40 (1990/5)	40 (1978/5)	41 (2000/8)	1976/4 2020/4
年降水量の多い方から (mm)	2955 (1985)	2911 (2002)	2804.0 (2017)	2774.5 (2010)	2765 (1999)	2720 (1981)	2713 (1980)	2707.0 (2013)	2707 (1993)	2681 (1995)	1976年 2019年
年降水量の少ない方から (mm)	1806 (1994)	1855 (1990)	1874 (1986)	1922.5 (2015)	1935 (1987)	2005 (2000)	2075 (1982)	2086.0 (2016)	2114 (1992)	2117 (1984)	1976年 2019年
日最高気温の高い方から (℃)	37.6 (1994/8/11)	37.5 (2006/8/17)	37.4 (2018/8/23)	37.4 (1985/8/30)	37.3 (1994/8/12)	37.1 (1986/8/29)	37.0 (2018/7/29)	36.9 (2015/7/13)	36.8 (2019/8/14)	36.8 (1999/8/7)	1978/11 2020/5
日最高気温の低い方から (℃)	-2.1 (1981/2/26)	-1.8 (2014/2/5)	-1.6 (1984/2/7)	-1.4 (1984/2/6)	-1.4 (1984/2/4)	-1.4 (1983/2/13)	-1.0 (1990/1/25)	-0.9 (1984/2/8)	-0.8 (1988/2/3)	-0.8 (1984/2/17)	1978/11 2020/5
日最低気温の高い方から (℃)	28.6 (2019/8/15)	27.0 (2011/8/11)	26.6 (1994/8/3)	26.5 (1984/8/22)	26.1 (2007/8/3)	26.0 (2019/8/16)	26.0 (2004/8/5)	26.0 (2002/8/2)	26.0 (1994/8/4)	25.9 (2004/7/20)	1978/11 2020/5
日最低気温の低い方から (℃)	-11.3 (1983/2/15)	-11.2 (1984/2/12)	-11.1 (1987/2/2)	-11.1 (1986/2/2)	-10.7 (1981/2/18)	-10.6 (1983/2/14)	-10.3 (1986/2/8)	-9.9 (2016/2/8)	-9.9 (1985/1/9)	-9.8 (1988/2/22)	1978/11 2020/5
月平均気温の高い方から (℃)	27.8 (2010/8)	27.8 (1985/8)	27.4 (1994/8)	27.0 (1999/8)	26.9 (2019/8)	26.8 (2012/8)	26.8 (2000/8)	26.7 (2018/7)	26.3 (2006/8)	26.3 (1984/8)	1978/11 2020/4
月平均気温の低い方から (℃)	-0.2 (1984/2)	0.0 (1985/1)	0.4 (1986/2)	0.5 (1984/1)	0.9 (1988/2)	0.9 (1983/2)	0.9 (2012/2)	1.0 (1986/1)	1.0 (1981/1)	1.1 (1980/2)	1978/11 2020/4
年平均気温の高い方から (℃)	14.1 (2019)	14.1 (2004)	14.1 (1998)	14.1 (1990)	14.0 (2018)	13.8 (2015)	13.8 (2000)	13.8 (1999)	13.8 (1994)	13.7 (2016)	1978年 2019年
年平均気温の低い方から (℃)	11.8 (1981)	12.0 (1984)	12.0 (1980)	12.3 (1986)	12.5 (1982)	12.6 (1986)	12.6 (1993)	12.7 (1985)	12.7 (1983)	13.0 (2006)	1978年 2019年
日最大風速・風向 (m/s)	16 南南東 (2006/4/11)	15.2 南南東 (2016/4/17)	15.2 西 (2012/4/4)	14.6 西南西 (2012/4/3)	14.2 南西 (2019/10/4)	14 南西 (1994/4/12)	13.9 西 (2013/4/7)	13.6 西南西 (2018/3/1)	13.6 南南西 (2010/3/21)	13.5 南南東 (2010/5/23)	1978/11 2020/5

出典：気象庁 HP より

(http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rank_a.php?prec_no=54&block_no=0532&year=&month=&day=&view=)

以上

対象施設の選定結果及び裕度評価結果について

工認図書番号	工認図書名称	確認手法	確認結果
V-2-2-7	主排気筒の地震応答計算書	個別評価	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-2-8	主排気筒の耐震性についての計算書	個別評価	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-6-7-6(3)	メッシュ型アンテナの耐震性についての計算書 (安全パラメータ表示システム (SPDS) (6,7 号機共用) の耐震性についての計算書)	①	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-6-7-9(1)	アンテナの耐震性についての計算書 (衛星電話設備 (常設) の耐震性についての計算書)	①	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-6-7-10(1)	アンテナの耐震性についての計算書 (衛星電話設備 (常設) (中央制御室待避室) の耐震性についての計算書)	①	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-6-7-11(1)	アンテナの耐震性についての計算書 (衛星電話設備 (常設) (6,7 号機共用) の耐震性についての計算書)	①	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-6-7-12(1)	アンテナの耐震性についての計算書 (無線連絡設備 (常設) の耐震性についての計算書)	①	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-6-7-13(1)	アンテナの耐震性についての計算書 (無線連絡設備 (常設) (中央制御室待避室) の耐震性についての計算書)	①	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-6-7-14(1)	アンテナの耐震性についての計算書 (無線連絡設備 (常設) (6,7 号機共用) の耐震性についての計算書)	①	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-6-7-15(1)	衛星無線通信装置用アンテナの耐震性についての計算書	②	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-7-2-1	主排気筒の耐震性についての計算書	個別評価	現設計の裕度に包絡されることを確認
V-2-8-2-1-3	フィルタ装置出口放射線モニタの耐震性についての計算書	①	現設計の裕度に包絡されることを確認

V-2-8-4-7	配管遮蔽の耐震性についての計算書（格納容器 圧力逃がし装置）	（確認中）	
V-2-10-1-2-2-1	第一ガスタービン発電機の耐震性についての計 算書	③	現設計の裕度に包絡 されることを確認
V-2-10-1-2-2-2	第一ガスタービン発電機用燃料移送ポンプの耐 震性についての計算書	②	現設計の裕度に包絡 されることを確認
V-2-10-1-4-1	緊急用断路器の耐震性についての計算書	①	現設計の裕度に包絡 されることを確認
V-2-別添 1-2	火災感知器の耐震計算書	①	現設計の裕度に包絡 されることを確認
V-2-別添 3-3	可搬型重大事故等対処設備のうち車両型設備の 耐震計算書	③	現設計の裕度に包絡 されることを確認
V-2-別添 3-5	可搬型重大事故等対処設備のうちその他設備の 耐震計算書	③	現設計の裕度に包絡 されることを確認
V-2-2-5	タービン建屋の地震応答計算書	個別評価	（確認中）
V-2-2-6	タービン建屋の耐震性についての計算書	個別評価	（確認中）
V-2-2-11	廃棄物処理建屋の地震応答計算書	個別評価	（確認中）
V-2-2-12	廃棄物処理建屋の耐震性についての計算書	個別評価	（確認中）
KK7 補足-024-3	下位クラス施設の波及的影響の検討について 5号機主排気筒の波及的影響について	個別評価	（確認中）
KK7 補足-024-3	下位クラス施設の波及的影響の検討について 5号機タービン建屋の波及的影響について	個別評価	（確認中）

以上

地震 (Ss) と風 (16m/s) の組合せに関する統計的考察について

地震 (Ss) と組み合わせる風速を柏崎市の観測記録の既往最大である 16m/s (10 分間平均値, 地上高 10m) を採用している。この風速に関する統計的考察の結果を示す。

- ・地震 (Ss) の年超過確率 : 1×10^{-4} / 年
- ・風 (16m/s) の年超過確率 : 2×10^{-2} / 年
- ・風の継続時間 : 10 分 $\div 2 \times 10^{-5}$ 年

これらを掛け合わせると, 4×10^{-11} / 年となる。

(参考) 「同時に発生する可能性が極めて低いもの」として整理した主事象 (地震 : Ss) と従事象 (風 : 27.9m/s) に関する統計的考察

- ・地震 (Ss) の年超過確率 : 1×10^{-4} / 年
- ・風 (27.9m/s) の年超過確率 : 1×10^{-2} / 年 (ただし, 新潟市の観測記録に基づく)
- ・風の継続時間 : 10 分 $\div 2 \times 10^{-5}$ 年

これらを掛け合わせると, 2×10^{-11} / 年となる。

以上

柏崎市における既往最大風速 16m/s の年超過確率評価方法

1. 評価方法

参考資料に記載

2. 統計処理に用いる観測記録

統計処理に用いる観測記録は、以下のとおり気象庁 HP で公開されている観測記録を用いる。

- ・ 柏崎市：年最大風速 1979～2012 年の記録（表 1 参照）

（気象庁 HP には 1978 年からの観測記録が掲載されているが、1978 年の記録は 11 月から観測開始されたものであるため、年間を通して観測されるようになった 1979 年からの観測記録を採用する）

表 1 柏崎市の観測記録（1979～2012 年）
（気象庁 HP より）

年	年最大風速 [m/s]	年	年最大風速 [m/s]
1979	13	1996	12
1980	11	1997	13
1981	12	1998	11
1982	12	1999	11
1983	13	2000	10
1984	10	2001	10
1985	10	2002	11
1986	10	2003	11
1987	12	2004	12
1988	12	2005	11
1989	12	2006	16
1990	10	2007	11
1991	11	2008	10.7
1992	11	2009	11.5
1993	10	2010	13.6
1994	14	2011	11.2
1995	11	2012	15.2

3. 統計処理の結果

柏崎市の最大風速の観測記録の平均，分散等を算出し，Gumbel 分布，平方根指数型最大値分布及び一般化極値分布に当てはめ，適合度評価（SLSC 値）を行った。その結果，一般化極値分布が基準に適合することを確認した（表 2）。

また，評価より得られたハザード曲線を図 1 に示す。この曲線に基づき，柏崎市における既往最大風速（16m/s）の年超過確率を確認した結果， 2.0×10^{-2} /年となった。

表 2 柏崎市における観測記録を各分布適用させた場合の SLSC 値

	Gumbel 分布	一般化 極値分布	平方根指数型 最大値分布
SLSC	0.044	0.034	※

(※SLSC を求めるための関数の定義域外となるため算出不可)

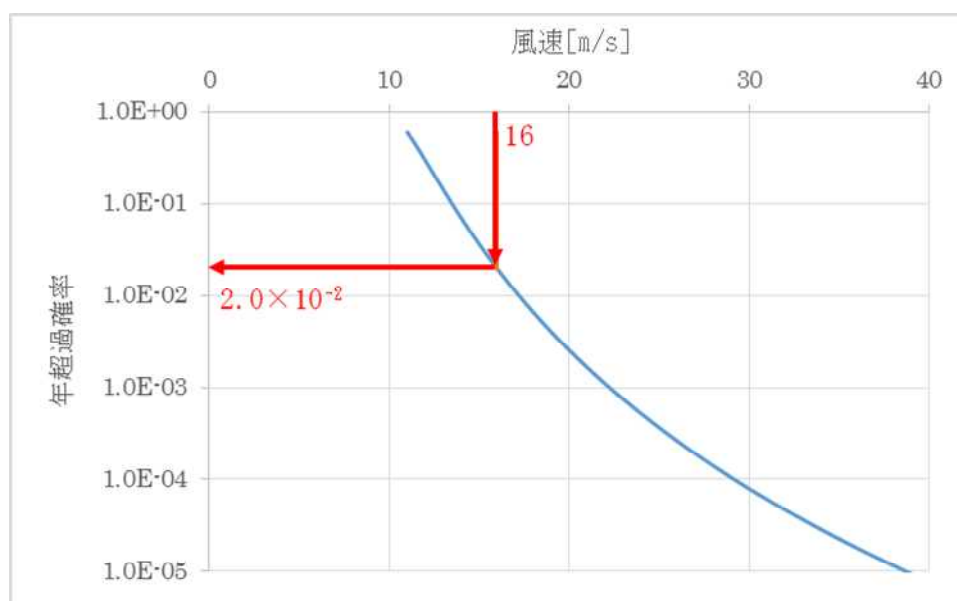


図 1 柏崎市の最大風速ハザード曲線（一般化極値分布）

以上

【参考】（設置許可申請書まとめ資料より）

年超過確率の推定は、気象庁の「異常気象リスクマップ」⁽¹⁾の確率推定方法を採用して評価を実施する。

評価フローを図1に示す。

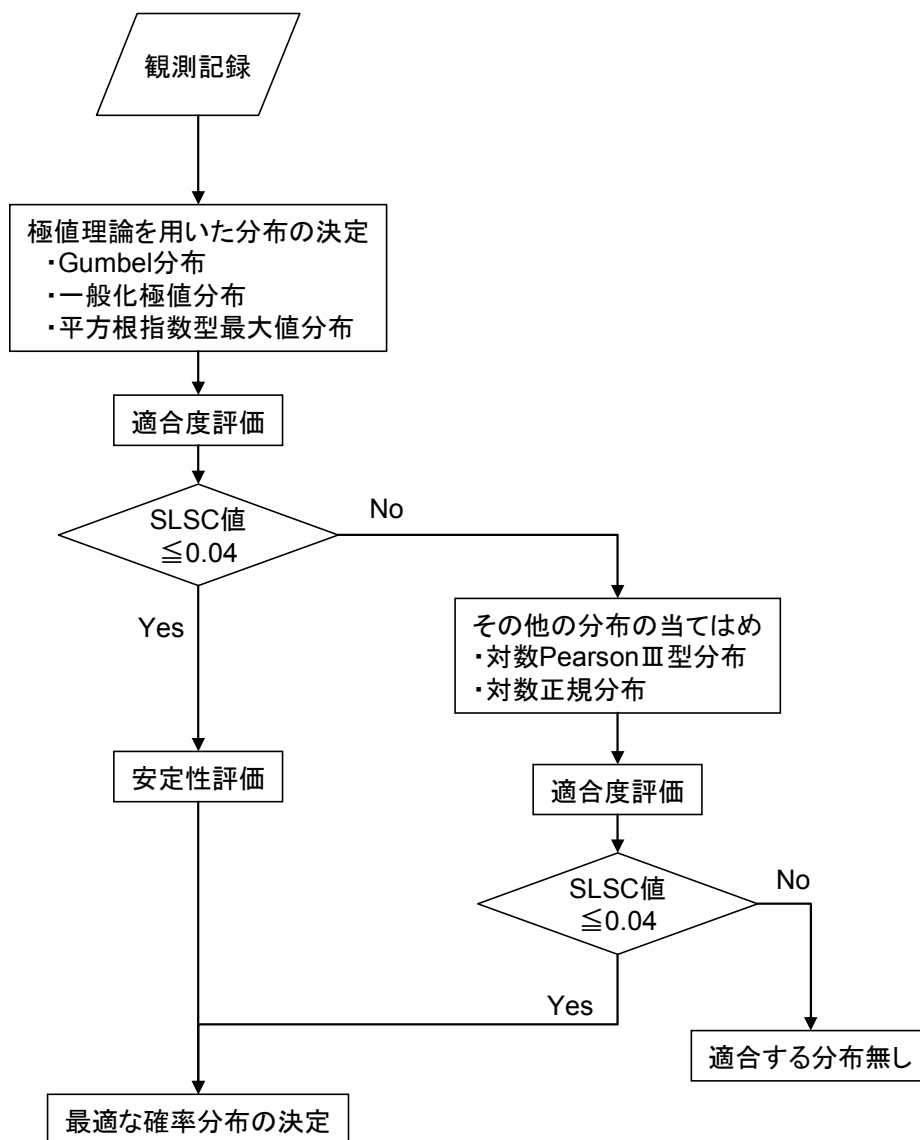


図1 年超過確率評価フロー

(1) 確率分布の算出

観測記録から確率分布の分布特性を表す母数を推定し、確率分布形状を特定する。ここでは、極値理論からの分布（Gumbel 分布、平方根指数型最大値分布、一般化極値分布）や従来から使用されている分布（対数 PearsonⅢ型分布、対数正規分布）の中から最適な確率分布を決定する。

確率分布モデルの母数推定については、以下に示す L 積率法（L Moments）や最尤法等の手法を用いる。⁽²⁾

L 積率法

第 1 次の L 積率 λ_1 、第 2 次の L 積率 λ_2 、第 3 次の L 積率 λ_3 はそれぞれ以下のように定義される。

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= b_0 \\ \lambda_2 &= 2b_1 - b_0 \\ \lambda_3 &= 6b_2 - 6b_1 + b_0\end{aligned}$$

ここで、

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j$$

$$b_1 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N (j-1) x_j$$

$$b_2 = \frac{1}{N(N-1)(N-2)} \sum_{j=1}^N (j-1)(j-2) x_j$$

N ：標本数

x_j ： N 個の標本を昇順に並び替えたときの小さい方から j 番目の値

最尤法

以下に示す対数尤度関数 L が最大となる a, b を算出

$$L(a, b) = \sum_{j=1}^N \ln f(x_j)$$

$f(x)$ ：確率密度関数

また、例として極値理論からの分布（Gumbel 分布、平方根指数型最大値分布、一般化極値分布）の母数推定方法、及び非超過確率 p に対応する値の算出方法を表 1 に示す。

表 1 極値分布の母数推定法について

分布	母数推定法	母数	クオンタイル (非超過確率 p に対応する値)
Gumbel 分布	L 積率法 (2 母数)	$a = \frac{\lambda_2}{\ln 2}$ $c = \lambda_1 - 0.5772157a$	$x_p = c - a \cdot \ln[-\ln(p)]$
一般化 極値分布 (GEV 分布)	L 積率法 (3 母数)	$k = 7.859d + 2.9554 * d^2$ ここで $d = \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} - \frac{\ln 2}{\ln 3}$ $a = \frac{k\lambda_2}{(1 - 2^{-k}) \cdot \Gamma(1 + k)}$ $c = \lambda_1 - \frac{a}{k} \cdot [1 - \Gamma(1 + k)]$	$x_p = c + \frac{a}{k} \cdot \{1 - [-\ln(p)]^k\}$
平方根指数型 最大値分布	最尤法 (2 母数)	$L(a, b) = \sum_{j=1}^N \ln f(x_j)$ $= N \ln a + N \ln b - N \ln 2 - \sum_{j=1}^N \sqrt{bx_j}$ $- a \left[\sum_{j=1}^N \exp(-\sqrt{bx_j}) \right]$ $+ \sum_{j=1}^N \left[\sqrt{bx_j} \exp(-\sqrt{bx_j}) \right]$ L が最大となる a, b	$x_p = \frac{t_p^2}{b}$ ここで $\ln(1 + t_p) - t_p = \ln\left[-\frac{1}{a} \ln(p)\right]$

(2) 適合度評価

算出した分布がどの程度、観測記録と適合しているかを確認し分布の適合度を評価する。

本評価では、分布の適合度を SLSC (Standard Least Squares Criterion) と呼ばれる指標で評価する。

SLSC は、観測値をプロットイングポジション公式で並べた場合と、確率分布から推定した場合との確率の差を指標化した値である。(図 2)

SLSC が小さいほど、適合度が高く、経験的な分布とよくフィットする。本評価では SLSC が 0.04 以下で適合していると判断する。

プロットイングポジション公式とは、経験的に求められた公式であり、観測値の個数、大きさの順に並べたときの順位と再現期間との関係を数式化したものである。同公式では、いくつかの式が提案されているが、本評価においては多くの分布系によく適合する以下の式を採用する。

$$T(i) = \frac{N + 0.2}{i - 0.4}$$

ここで、 N はデータの個数であり、大きい方から i 番目のデータの再現期間* (最大風速の確率年) $T(i)$ とする。

※ : ある現象 (例えば 30m/s の風が吹くこと) が 1 回起こり得る「50 年」「100 年」という期間⁽¹⁾

このとき、SLSC 値は、データ値と関数値 (それぞれ標準化した値) を 2 乗平均した以下の式で表される。⁽²⁾

$$SLSC = \frac{\sqrt{\xi^2}}{|s_{0.99} - s_{0.01}|}$$

ここで、

$$\xi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - r_i)^2$$

$s_{0.99}$, $s_{0.01}$: それぞれ非超過確率 0.99 と 0.01 に対する当該確率分布の標準変量

s_i : 順序統計量データ x_i を推定母数で変換した標準変量

r_i : プロットインゴポジションに対応した理論クオンタイルを推定母数で変換した標準変量

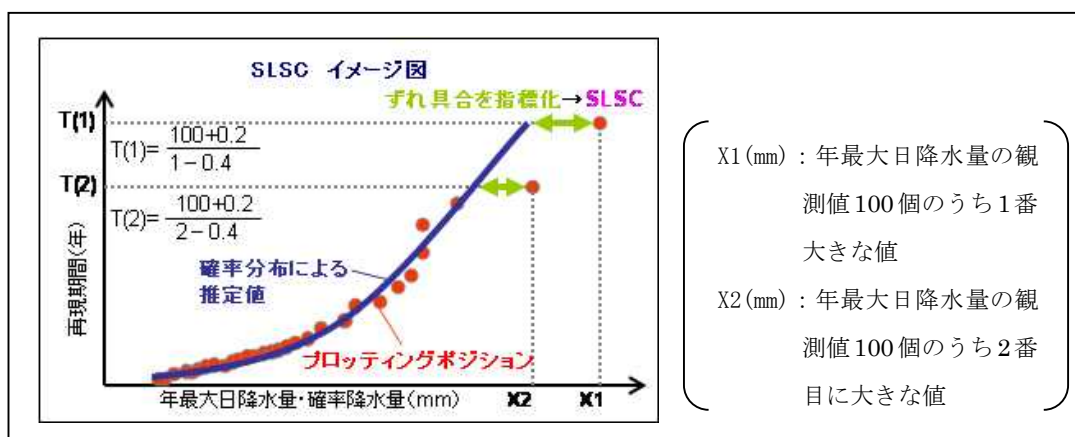


図 2 SLSC のイメージ図 (確率降水量の場合の例) ⁽¹⁾

(3) 安定性評価

(2)で分布の適合度を評価し、SLSC が 0.04 以下を満足した場合には、次に分布の安定性を評価する。現在得られている観測値をランダムに抜き取った場合に、結果が大きく変化しないことを評価する。本評価では安定性評価には Jack knife 法を用いる。

[参考文献]

(1) 気象庁：

<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/index.html>

(2) 星清，1998：水文統計解析，開発土木研究所月報 No. 540