

平成30年2月15日

日本原子力発電㈱

漂流物に係る検討について

1. 検討方針について

東海第二発電所における漂流物荷重に係る検討は、図-1に示す「漂流物評価フローにより評価する対象の施設・設備の配置」を考慮し、図-2に漂流物に係る全体的な検討フローを示す。

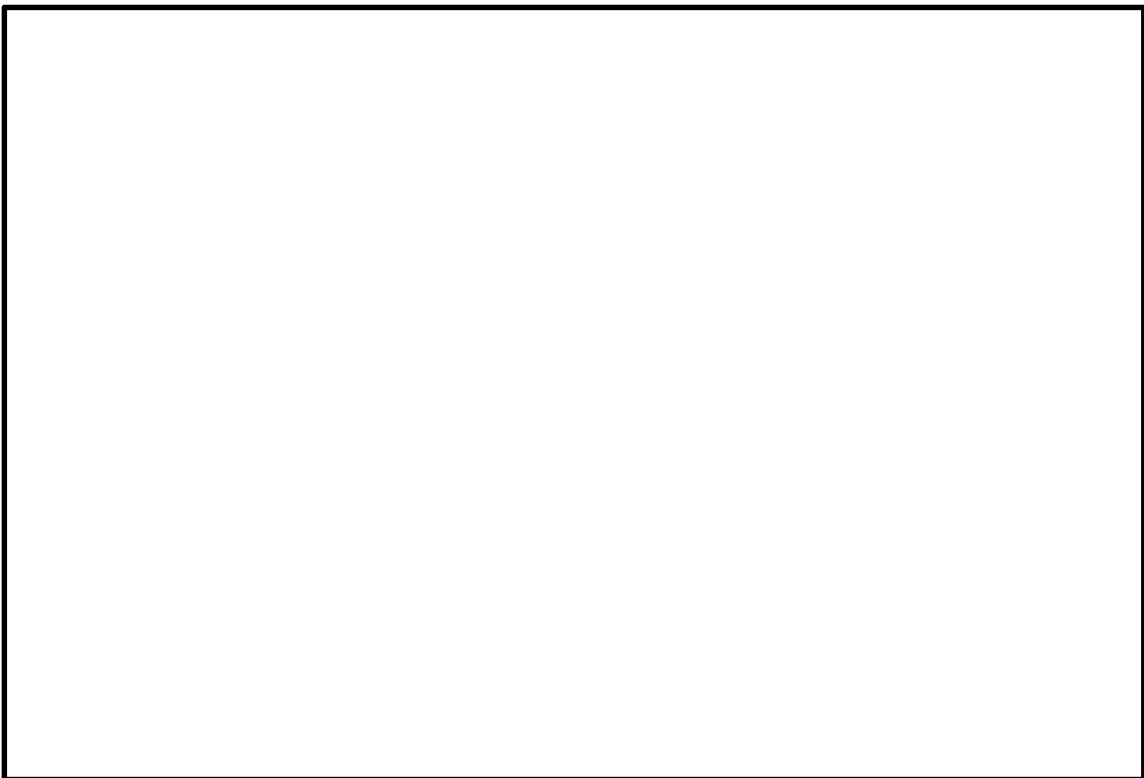


図-1 漂流物評価フローにより評価する対象の施設・設備の配置

は、商業機密又は防護上の観点から公開できません。

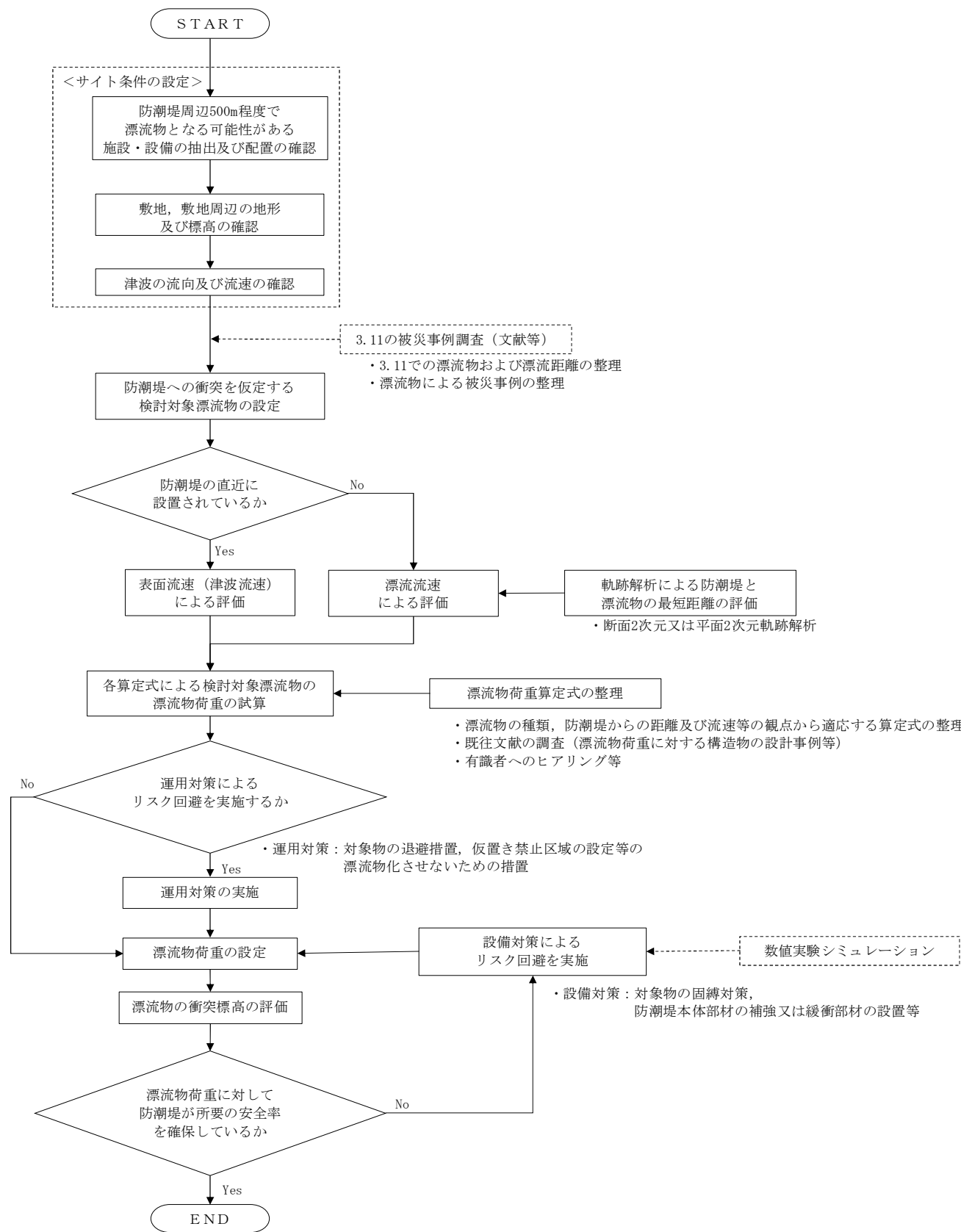
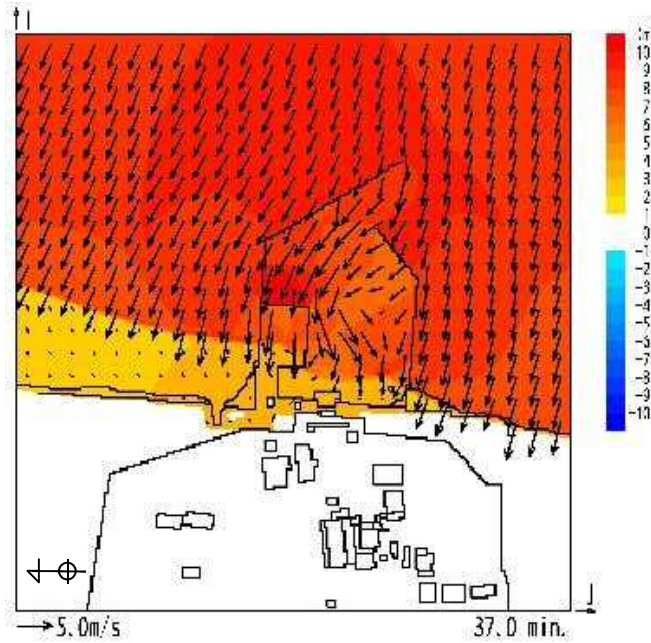


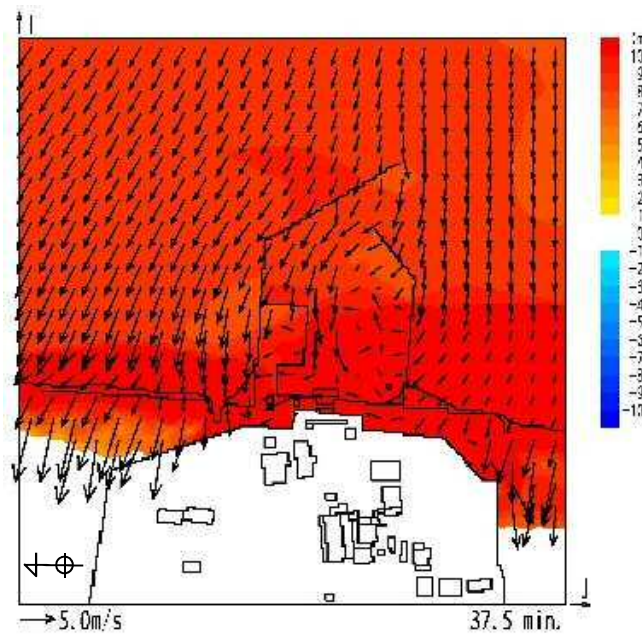
図-2 漂流物に係る全体的な検討フロー

2. 漂流物位置と地形と流況の整理

東海第二発電所での基準津波による発電所敷地前面海域の流向ベクトルを図-3 に示す。津波は、防潮堤東側の法線方向から遡上し、北側及び南側では防潮堤に沿うような流れとなっている。



(37.0 分※)



(37.5 分※)

※：津波の原因となる地震発生後の経過時間

図-3 発電所敷地前面海域の流向ベクトル（防波堤あり（既往モデル）の場合）

東海第二発電所の防潮堤周辺 500m 範囲において漂流物となる可能性が否定できない施設・設備の配置を図-4 に示す。防潮堤東側エリアについては、津波が法線方向に遡上することから、津波による漂流物の衝突を仮定するために、代表エリアとして検討対象漂流物の選定を行った。

検討対象漂流物は、漂流物となる可能性が否定できない施設・設備のうち、防潮堤の前面に仮置きや残置の可能性のあるものを選定した。表-1 に仮置きや残置の可能性があるものの一覧を示す。



図-4 漂流物となる可能性が否定できない施設・設備の配置（防潮堤から 500m の範囲）

表-1 漂流物となる可能性が否定できない仮置きや残置の可能性のあるもの

場所	種類	想定質量 (t)	防潮堤との距離	検討対象
東側	船舶	15 (排水トン数)	500m	○
	フェンス	0.9	100m 以内	×※1
	電源盤	0.6	100m 以内	×※1
	ケーブル等収納箱	0.04	100～300m	×※1
	ページング電話ボックス	0.02	100～300m	×※1
	室外機	0.3	100m 以内	×※1
	自動販売機	0.5	100m 以内	×※1
	オイルフェンス巻取機	1.5	100～300m	×※1
	オイルフェンス	0.07	100～300m	×※1
	廃材容器	0.04	100m 以内	×※1
	手洗いシンク	0.02	100m 以内	×※1
	仮設設備	0.2	100m 以内	×※1
	普通車	1.4	100m 以内	○

※1：想定質量が小さく，他の漂流物の評価に包含されることから検討対象としない。

3. 東海第二発電所のサイト特性を反映したソリトン分裂波発生位置の確認

漂流物は津波の襲来により発生するが、漂流物の移動は津波の砕波位置に漂流物が存在する場合に大きな移動距離となることが知られている。そこで、東海第二発電所のサイト特性を踏まえた、津波による分裂波や砕波の発生位置を確認するために、水理模型実験及び数値解析シミュレーションを実施した。

(1) 分裂波発生に関する検討

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当たっては、「防波堤の耐津波設計ガイドライン」において以下の2つの条件に合致する場合、ソリトン分裂波が発生するとされている。

- ① 概ね入射津波高さが水深の30%以上（津波数値解析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

東海第二発電所前面の海底地形は約1/200勾配で遠浅であり、入射波津波高さと水深の関係も入射津波高さが水深の30%以上であることから、両方の条件に合致する（図-5及び表-2）。そこで、沖合におけるソリトン分裂波及び砕波の発生の有無や陸上へ遡上する過程での減衰の状況を定量的に確認するため、東海第二発電所のサイト特性を考慮した水理模型実験を行った。

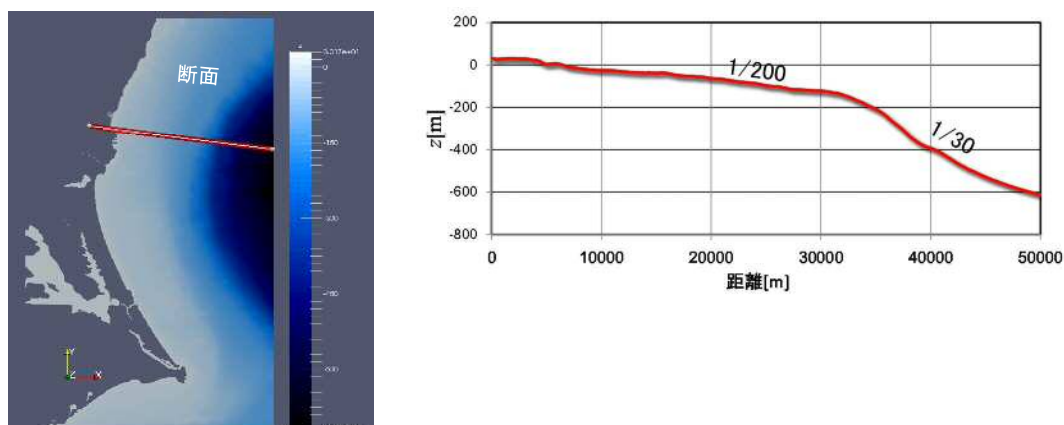


図-5 海底地形断面位置図及び海底地形断面図

表-2 津波高さと水深の関係

地点	(1)水深	(2)入射津波高さ*	(2)/(1)
東海第二発電所前面	7.5m	4.7m	62%

※津波数値解析による津波高さの1/2を入射津波高さとして定義（防潮堤の耐津波ガイドライン）

(2) 水理模型実験

1) 目的

基準津波の策定に用いた波源については、2011年東北地方太平洋沖地震で得られた知見を踏まえて設定した波源のすべり領域を拡大したり、すべり量の割増しを行うなどの保守的な設定を複数加えた波源である。

水理模型実験は、ソリトン分裂波が生じない沖合5.0kmにおける津波波形を入力し、ソリトン分裂波や砕波の発生の有無及び陸上へ遡上する過程での減衰状況の把握を目的に実施した。

2) 検討断面

東海第二発電所前面の海底地形は概ね一様の地形となっていることから、本実験では、津波水位が最大となる地点を基に、津波の伝播特性を踏まえ、等深線図に直交する断面を選定した(図-6)。

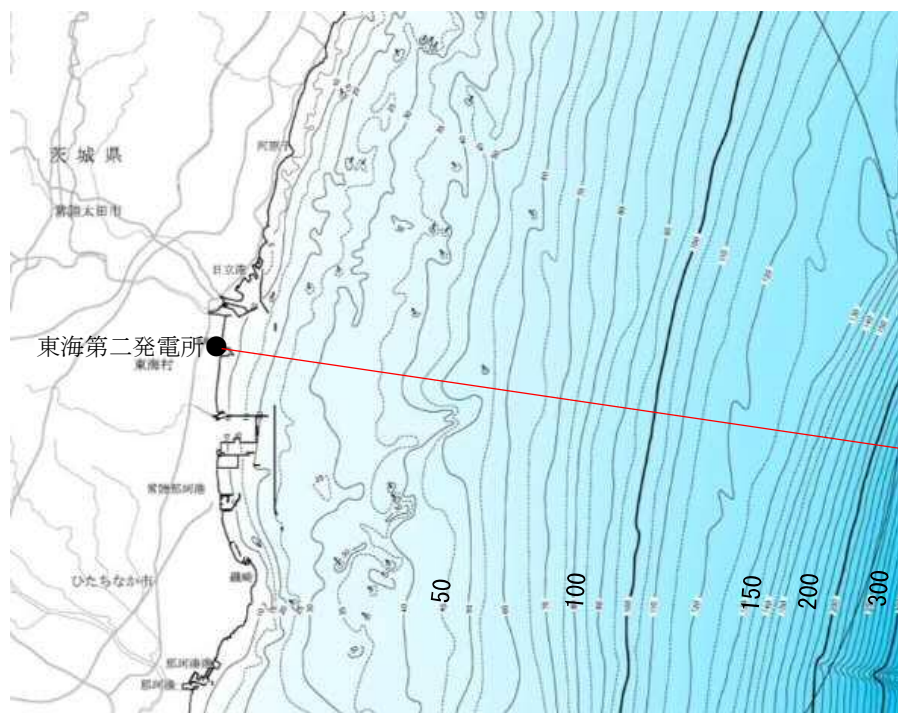


図-6 検討断面位置図

3) 実験条件

断面二次元実験施設の水路は、長さ 60m×幅 1.2m (貯水部は 1.8m) ×高さ 1.5m とし、沖合 5km から陸側の範囲を再現するために、実験縮尺 (幾何縮尺) は $\lambda=1/200$ とした (図-7)。

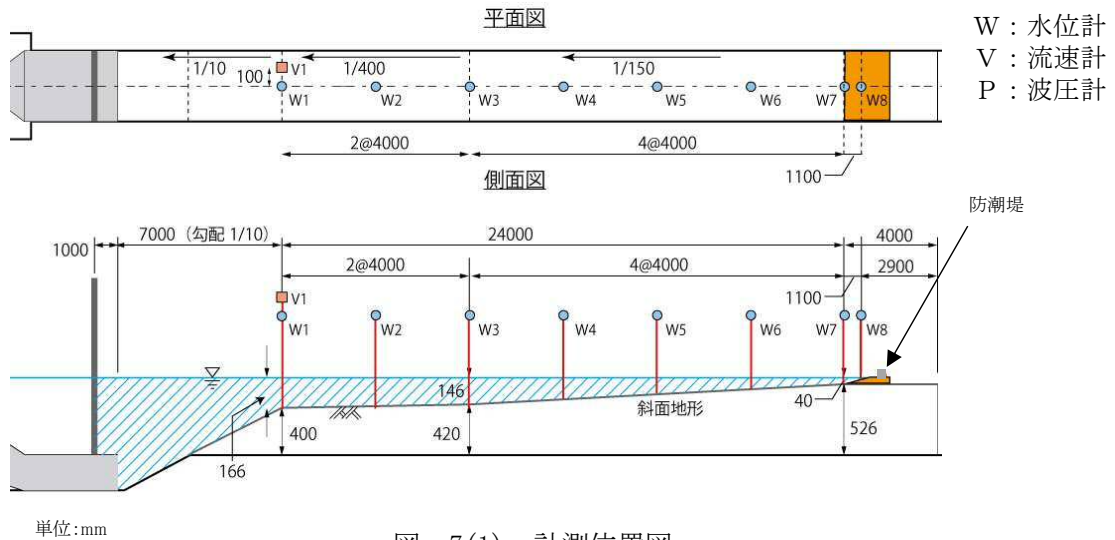


図-7(1) 計測位置図

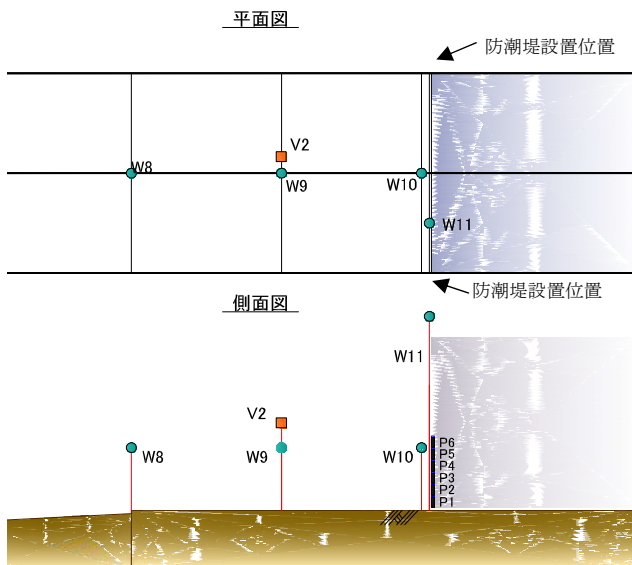


図-7(2) 防潮堤位置拡大図

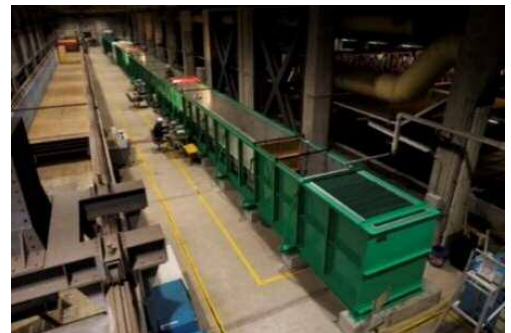


図-8 実験施設写真

4) 入射津波の造波

水理模型実験における再現範囲の最沖地点はソリトン分裂波が発生しない沖合 5.0km の位置とし、基準津波の波源モデルを用いた数値解析から求めた同地点における津波波形を入力した。また、この津波波形を防潮堤位置で平面二次元津波シミュレーション解析結果と同様の高さになるよう振幅を調整した (図-9)。

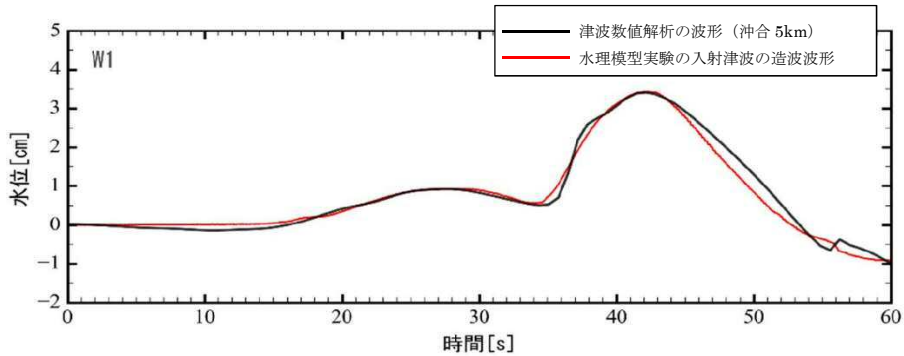


図-9 入射津波の造波波形図 (沖合 5km 地点)

5) 水理模型実験の結果 (水理模型実験におけるソリトン分裂波の確認)

平面二次元津波シミュレーション解析に即した津波波形を造波し、水理模型実験を行った。水理模型実験における時刻歴図を図-10 に示す。その結果、目視観察と波高計による計測により、沖合約 220m 地点 (W7) においてソリトン分裂波が生じることを確認したが、陸上に遡上する過程で分裂波は減衰している。

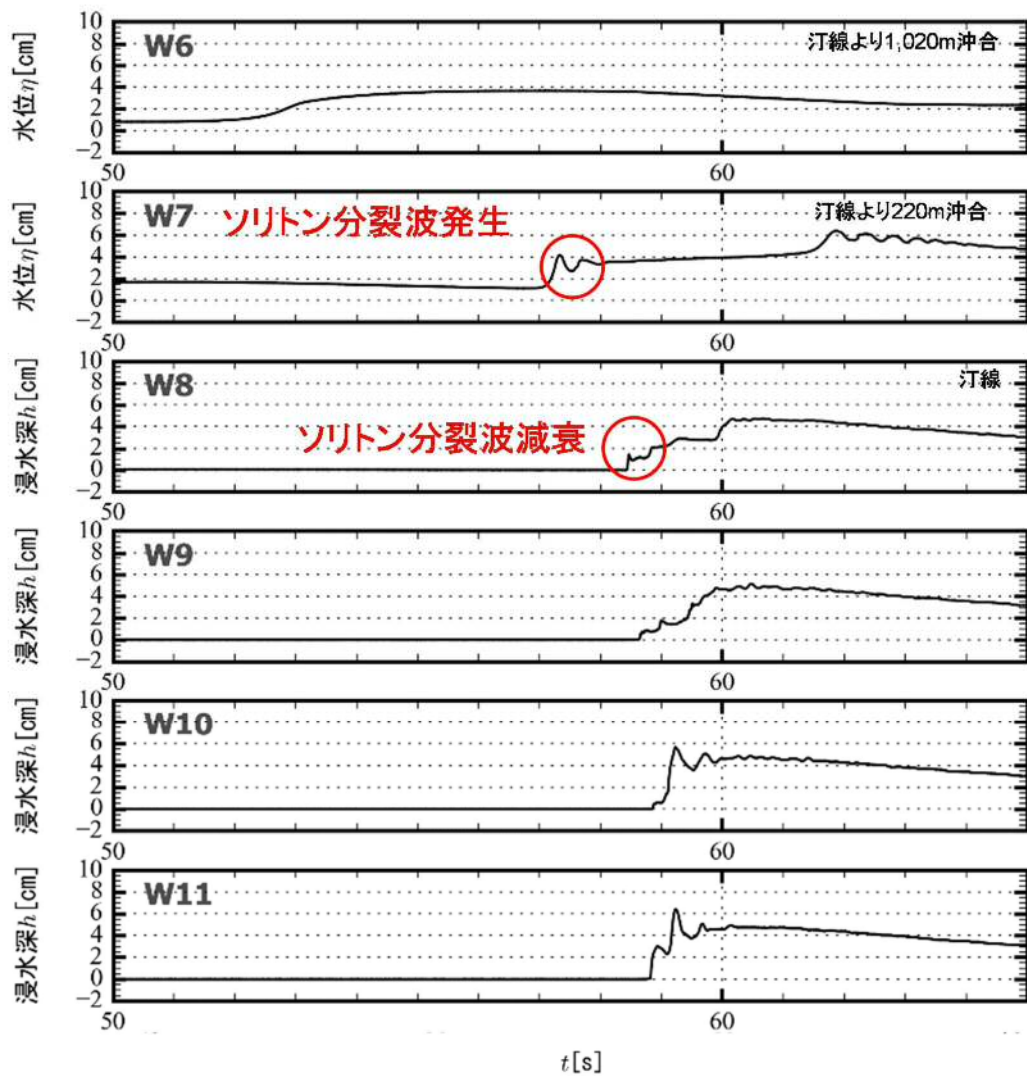


図-10 水理模型実験における時刻歴図

(3) 水理模型実験結果の検証（再現性検討）

水理模型実験結果について、断面二次元津波シミュレーション解析を実施した。断面二次元津波シミュレーション解析は、分散波理論に基づいた解析手法であり、ソリトン分裂波を表現可能な数値波動水路 CADMAS-SURF/2D (Ver. 5.1) を用いた。

1) 水理模型実験結果の再現性

水理模型実験でモデル化した区間と同じ区間を解析領域としてモデル化した（図-11）。また、入射波は水理模型実験の入力波形に合わせて作成した。

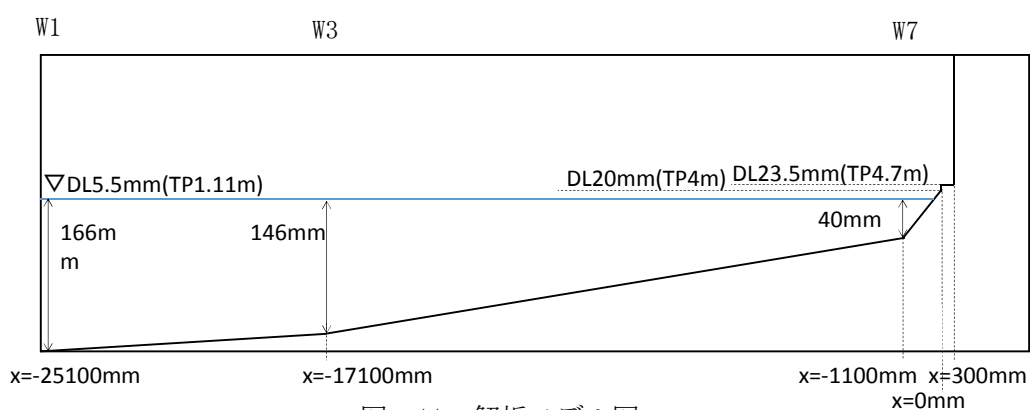


図-11 解析モデル図

断面二次元津波シミュレーション解析の結果を図-12に示す。水理模型実験結果と同様、沖合約220m地点（W7）においてソリトン分裂波を確認したが、陸上に遡上する過程で分裂波は減衰している。

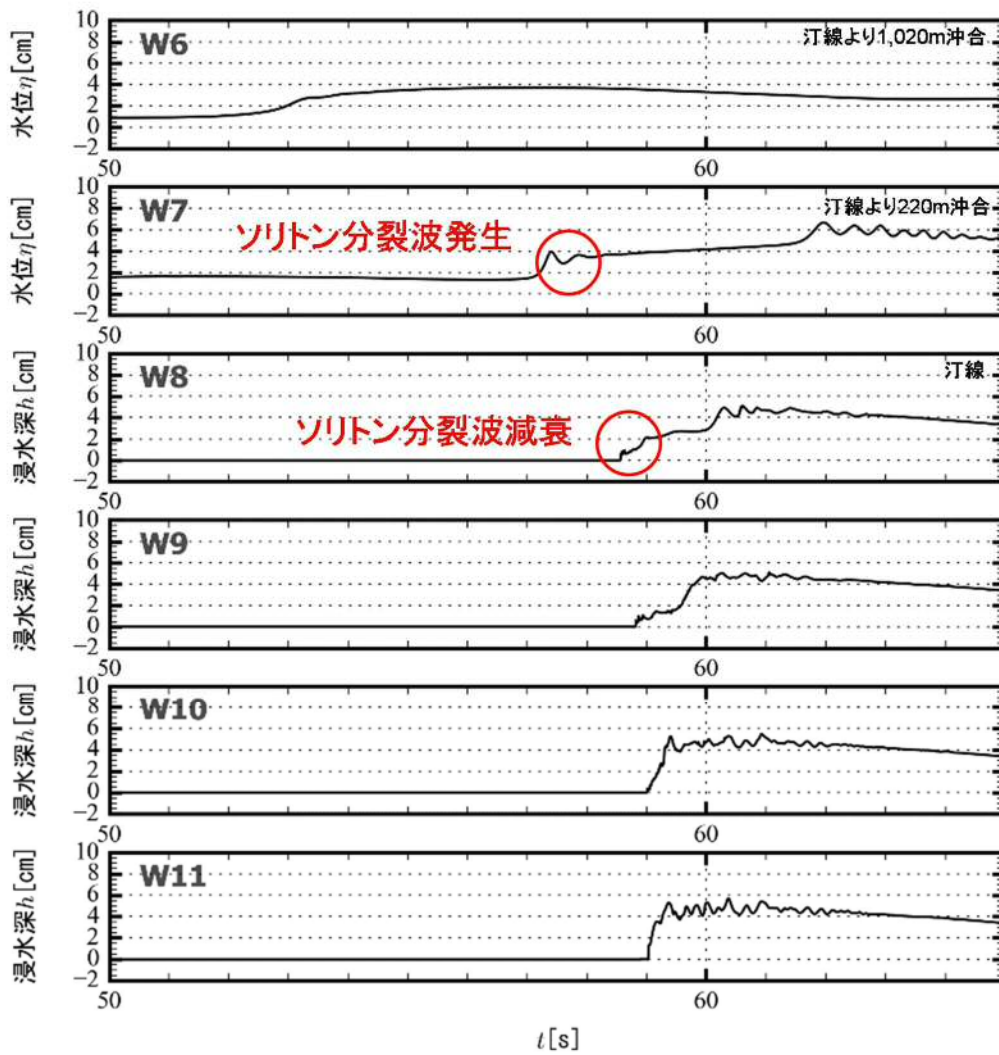


図-12 断面二次元津波シミュレーション解析における時刻歴図

4. 漂流物荷重の試算

漂流物の位置と地形及び流況の整理で抽出された漂流物となる可能性が否定できない施設・設備のうち、仮置きや残置の可能性のあるものについて、防潮堤への衝突を仮定した場合の漂流物荷重の試算を行う。各種基準類の漂流物荷重算定式を表-3に示す。漂流物荷重の試算は、漂流物の種類や想定質量等、漂流物荷重算定式の適用性考慮する。

表-3 各種基準類の漂流物荷重算定式の整理

	出典	種類	概要	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	津波による流木の漂流荷重を提案している。本式は円柱形状の流木が縦向きに衝突する場合の漂流荷重算定式である。	$F_m/(\gamma D^2 L) = (1.2 \sim 1.5) C_{MA} \{v_{A0}/(gD)^{0.5}\}^{1.2} (\sigma_v/\gamma L)^{0.4}$ 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_v ：木材の降伏応力	「実験に基づく推定式」 ・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） 流木の直径：4.8cm～12cm，流木の重量：305～8615gf ・衝突荷重に関する空中での実験
②	池野・田中（2003）	流木	円柱以外にも角柱，球の形状をした木材による漂流荷重を提案している。	$F_H/(gM) = S \cdot C_{MA} \cdot \{V_H/(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})\}^{2.5}$ F_H ：衝突力， g ：重力加速度， M ：漂流物の重量， 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	「実験に基づく推定式」 （縮尺1/100の模型実験） 漂流物の形状：円柱，角柱，球 漂流物重量：0.588N～29.792N
③	道路橋示方書（2002）	流木等	橋（橋脚）に自動車，流木あるいは船舶等による漂流荷重を定めている。	$P = 0.1WU$ P ：衝突力， W ：流送物の重量， U ：表面流速	新規基準に基づく審査において適用された実績がある。
④	FEMA（2012）	流木・コンテナ	漂流物による漂流荷重を正確に評価するのは困難としながら，一例として算定式を示している。	$F_i = 1.3 u_{max} \sqrt{k m_d (1 + c)}$ F_i ：衝突力， c ：付加質量係数， u_{max} ：漂流物を運ぶ流体の最大流速， m_d ， k ：漂流物の質量と有効軸剛性	「運動方程式に基づく衝突力方程式」
⑤	水谷ほか（2005）	コンテナ	漂流するコンテナの漂流荷重を提案している。	$F_m = 2\rho_w \eta_m B_c V_x^2 + \left(\frac{W V_x}{g dt}\right)$ ， $V_x \cong C_x = 2\sqrt{g \eta_m}$ F_m ：衝突力， g ：重力加速度， W ：コンテナの重量， B_c ：コンテナ幅， ρ_w ：遡上波の最大水位， dt ：衝突時間， ρ_w ：水の密度， V_x ：コンテナの漂流速度， C_x ：津波の遡上流速	「実験に基づく推定式」 （縮尺1/75の模型実験） 使用コンテナ：長さを20ftと40ft コンテナ重量：0.2N～1.3N程度 遡上流速：1.0m/s以下 材質：アクリル
⑥	有川ほか（2007, 2010）	流木・コンテナ	鋼製構造物（コンテナ等）による漂流荷重を提案している。	$F = \gamma_p x^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5}{4} \tilde{m}\right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}}$ ， $x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2}$ ， $k = \frac{(1-v^2)}{\pi E}$ ， $\tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ 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 ：コンクリートのヤング係数， 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	「実験に基づく推定式」 （縮尺1/5の模型実験） 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

〔参考〕道路橋示方書における漂流物荷重算定式の考察

1. 道路橋示方書における漂流物荷重算定式の変遷について

道路橋技術基準の変遷については、藤原（2009）^{※1}による下記の文献において整理されている。

藤原（2009）によれば、1956年（昭和31年）に鋼道路橋設計示方書が発刊され、1964年（昭和39年）の鋼道路橋設計示方書に荷重の種類として衝突荷重が考慮され始めている。

また、1972年（昭和47年）に鋼橋・コンクリート橋の技術基準が統一され、日本道路協会より道路橋示方書の初版が発刊されている。衝突力算定式は、1978年（昭和53年）版において記載があり、道路橋示方書の最新版である2012年（平成24年）版に至るまで、同様の形の算定式が示されている。1978年（昭和53年）版の道路橋示方書に記載されている衝突力算定式は次式(1)で表されている。

$$P = 0.1 \times m \times U \quad (1)$$

ここに、P：衝突力（tf）

m：流送物の質量（t）

U：表面流速（m/s）

※1：道路橋技術基準の変遷：既設橋保全のための歴代技術基準ガイド，技報堂出版（2009）

2. 道路橋示方書の衝突力算定式の導出

道路橋示方書の式(1)で表わされる衝突力算定式は、運動量と力積の関係に基づく式の形をなしている。物理における運動量と力積の関係は、次式(2)で表わされる。

$$m \times v_2 - m \times v_1 = P \times \Delta t \quad (2)$$

ここに、m：漂流物の質量（t）

v_1 ：漂流物の衝突直前の漂流流速（m/s）（≠水の表面流速U（m/s））

v_2 ：漂流物の衝突による停止時流速（ゼロ（m/s））

P：被衝突体が受ける衝突力（tf）

Δt ：被衝突体が受ける衝突力の作用時間（s）

すなわち、漂流物が有する運動量の衝突時の変化分 $m \times v_2 - m \times v_1$ は、被衝突体が受けた力積 $P \times \Delta t$ に等しい。

式(2)より、

$$P = \frac{m \times v_2 - m \times v_1}{\Delta t} \quad (3)$$

つまり、単位時間（1秒）あたりの運動量の変化分は、被衝突体が受ける衝突力に等しい。ここで、式(3)の v_2 がゼロであることを考慮し、被衝突体が受ける衝突力の絶対値をP

と表記し、漂流物の衝突直前の漂流流速を v と表記し、 $\Delta t = 1$ 秒にて、単位も含めて式(3)を改めて記述すると、

$$P = \frac{m(\text{ton}) \times (1000\text{kg/ton}) \times v(\text{m/s})}{1(\text{s})} = m \times v \text{ (kN)} \quad (4)$$

である。

ただし、上式の v は漂流物の衝突直前の漂流流速であり、一般に水の表面流速 U とは異なる定義の速度である。水の表面流速 U は比較的容易に与えることができるものの、漂流物が水の表面流速 U の流れを受けた結果、衝突直前にどのような漂流流速 v となるかを求めるには高度な解析を要する場合があることから、1978年当時においては、実務者への配慮のため表面流速 U をパラメータとして有する衝突力算定式として道路橋示方書に記載する必要があったものと考えられる。

そこで、式(4)に対して表面流速 U を入力できるようにするため、表面流速 U から漂流流速 v へ換算するための係数 $\alpha = v/U$ を考慮して、式(4)を次式(5)により表すことにしたものと考えられる。

$$P = \alpha \times m \times U \text{ (kN)} \quad (5)$$

ここに、 P ：衝突力 (kN)

α ：漂流物の衝突直前の漂流流速 $v(\text{m/s})$ と水の表面流速 $U(\text{m/s})$ の比率

m ：流送物の質量 (t)

U ：水の表面流速 (m/s)

漂流物の衝突直前の漂流流速 $v(\text{m/s})$ と水の表面流速 $U(\text{m/s})$ の比率 α について、電力中央研究所 (2017) ※²及び甲斐田ほか (2016) ※³によれば、漂流流速 v は表面流速 (津波流速) U に対して0~60%に低下するとされている。甲斐田ほか (2016) で述べられている構造物模型に衝突する漂流物の衝突速度 v の確率分布を図-1に示す。図-1の通り、 $\alpha = v/U = 0.1$ (10%程度) において相対頻度が最も高いことを示している。

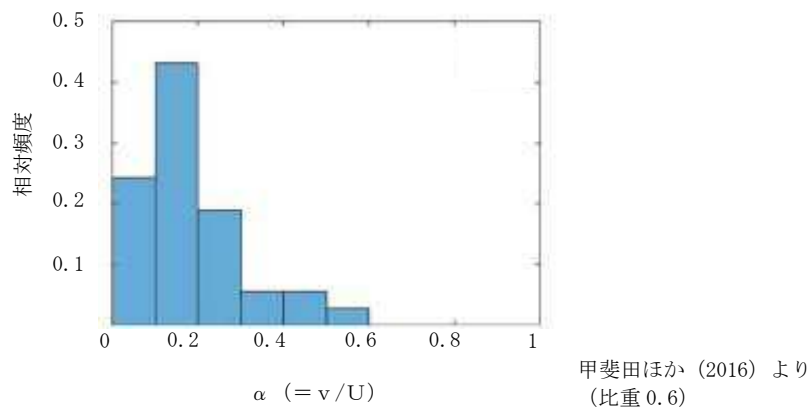


図-1 構造物模型に衝突する漂流物の速度比率 $\alpha (= v/U)$ の確率分布

道路橋示方書では、このような漂流流速 v と表面流速 U の比率 α として、代表的な値である0.1を適用したものと考えられる。ゆえに、

$$P = 0.1 \times m \times U \text{ (kN)} \quad (6)$$

ここに、 P ：衝突力 (kN)

係数0.1：漂流物の衝突直前の漂流流速 v (m/s)と水の表面流速 U (m/s)の比率であり、与えられた水の表面流速 U を衝突直前の漂流流速 v (m/s)へ換算するための係数

m ：流送物の質量 (t)

U ：水の表面流速 (m/s)

以上が道路橋示方書に示されている道路橋示方書の衝突力算定式の成り立ちであるものと考察される。

3. 道路橋示方書の衝突力算定式の適用性

力学的エネルギー保存則に基づく衝突力算定式は、衝突側と被衝突側の両者が完全な弾性衝突を前提としているため、衝突側が衝突時に常に完全な弾性体である場合にしか適用性がないが、道路橋示方書式に類似する運動量保存則に基づく衝突力算定式は、弾性衝突の場合のみでなく、衝突体が衝突時に塑性変形を呈する場合においても適用性があるのが主な特徴である。

そこで、運動学的な衝突力算定式（運動量と力積の関係から理論的に漂流物荷重が導かれる式）の代表例である、Haehnel and Daly (2004) ※4 と道路橋示方書式で求められる漂流物荷重について、対応関係を考察するための比較を行った。

Haehnel and Daly (2004) の算定式は、道路橋示方書式の導出過程で述べたのと同様に、漂流物がある速度で被衝突体に衝突する直前に有する運動量は、衝突時の力積に等しいとの仮定に基づいている。

Haehnel and Daly (2004) の算定式 (式(7)参照) を示し、それぞれの算定式により求められる漂流物荷重の比較結果を表-1 に示す。なお、道路橋示方書式では表面流速を10m/s、Haehnel and Daly (2004) の算定式では代表的な比率0.1を考慮して漂流流速を1m/s とし、衝突時間は被衝突側の一般的な土木構造物の1次固有振動モードとして多く見受けられる5Hzに対応する0.2s等とした。

$$P = \frac{\pi}{2} \times \frac{mv}{\Delta t} \quad (7)$$

ここで、 P ：漂流物荷重 (kN)

m ：漂流物の質量 (t)

v ：漂流流速 (m/s)

Δt ：衝突時間 (s)

表-1 のとおり道路橋示方書の算定式と Haehnel and Daly (2004) の算定式で算定される漂流物荷重は、1 次固有振動モード 5Hz 程度の被衝突体に対しては概ね同様の結果となった。

また、表-1 に示されるように、道路橋示方書式と Haehnel and Daly の算定式とで同じ衝突力 49kN となるのは、被衝突体の 1 次固有振動モードが 6.25Hz の場合であることから、運動学的に導出された Haehnel and Daly の算定式に照らして、道路橋示方書式は、被衝突体の 1 次固有振動モードが 6.25Hz 以下である場合において保守的な設計用衝突力を算定できる可能性があるものと評価する。

表-1 道路橋示方書と Haehnel and Daly の算定式の比較

算定式	道路橋示方書	Haehnel and Daly	
	$P=0.1mU$	$P=\frac{\pi}{2} \times \frac{mv}{\Delta t}$	
m : 質量 (t)	5	5	5
g : 重力加速度	9.80665	—	—
U : 表面流速 (m/s)	10	—	—
v : 漂流流速 (m/s)	—	1.0	1.0
Δt : 衝突時間 (s)	—	0.2 (5Hz)	0.16 (6.25Hz)
P : 漂流物荷重 (kN)	49	39	49

※2 : 原子力発電所における津波漂流物の影響評価技術—現状調査とその適用に関する考察—研究報告 : ○16010, 電力中央研究所報告書 (2017)

※3 : 陸上遡上津波中の漂流物挙動に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) (2016)

※4 : Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structure, ASCE (2004)

以上