

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	O2-他-F-24-0005_改2
提出年月日	2021年4月19日

女川原子力発電所第2号機 津波漂流物の衝突荷重について

2021年4月19日
東北電力株式会社

- 第876回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合(令和2年7月14日)において説明した主要説明項目における「詳細設計申送り事項 No.2-5 津波漂流物の衝突荷重」を説明する。

【2-5】津波漂流物の衝突荷重

12

1. 概要

詳細設計段階で設定することとしていた津波漂流物の衝突荷重について、浸水防護施設のうち漂流物の衝突荷重を考慮する防潮堤、屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)及び貯留堰を対象とした衝突荷重の設定の妥当性を説明する。

- 女川のサイト特性から、防潮堤及び屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)には、津波の第一波のみが到達するため、津波第一波により漂流するものが衝突することを説明する。また、貯留堰は、海中に設置していることから、引き波によって貯留堰が露出した後の押し波によって漂流物が衝突することを説明する。
- 既往の研究論文の漂流物荷重算定式を整理した結果、漂流物荷重には道路橋示方書及びFEMA(2019)に従いASCE(2016)を適用することを説明する。

2. 今後の説明予定

サイト特性、津波の水位・流速・流向の特徴、衝突を考慮する漂流物の選定、衝突荷重算定式の整理について、2020年5月提出の津波への配慮に関する説明書等にて説明予定。

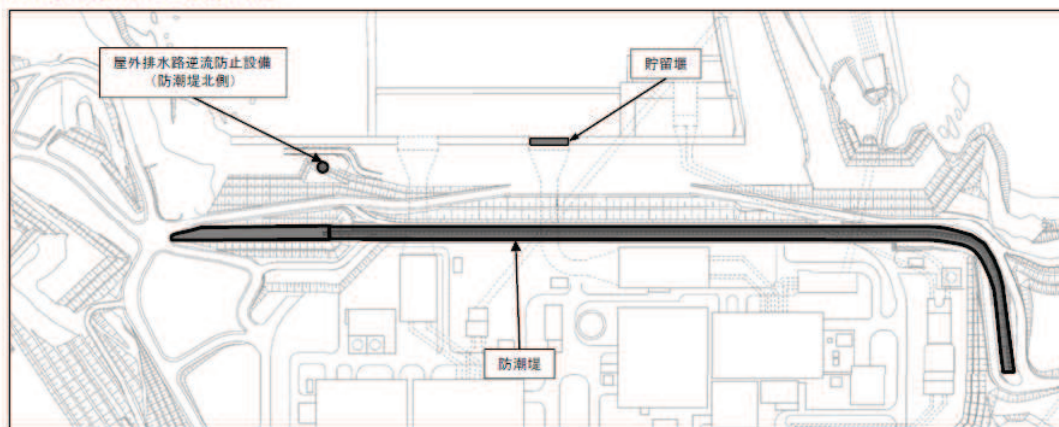


図1 津波漂流物の衝突荷重を考慮する施設の配置図

工認審査ガイドより、基準津波に伴う漂流物に対し、以下の設計を行う必要がある。

- 基準津波に伴う漂流物により、非常用海水冷却系の通水性が損なわれないこと(取水性評価)。
- 基準津波に伴う漂流物の波及的影響により、津波防護施設、浸水防止設備が機能喪失しないこと(衝突評価)。

【工認審査ガイド(抜粋)】

3.6.2 津波の二次的な影響による非常用海水冷却系の機能保持確認

【確認内容】

- (3) 基準津波に伴う取水口付近の漂流物については、(3.1.2)の遡上解析結果における取水口付近を含む敷地前面及び遡上域の寄せ波及び引き波の方向、速度の変化を分析した上で、漂流物の可能性を検討し、漂流物により取水口が閉塞しないこと、又は閉塞防止措置を施していることを確認する。

3.7 津波防護施設、浸水防止設備の設計・評価に係る検討事項

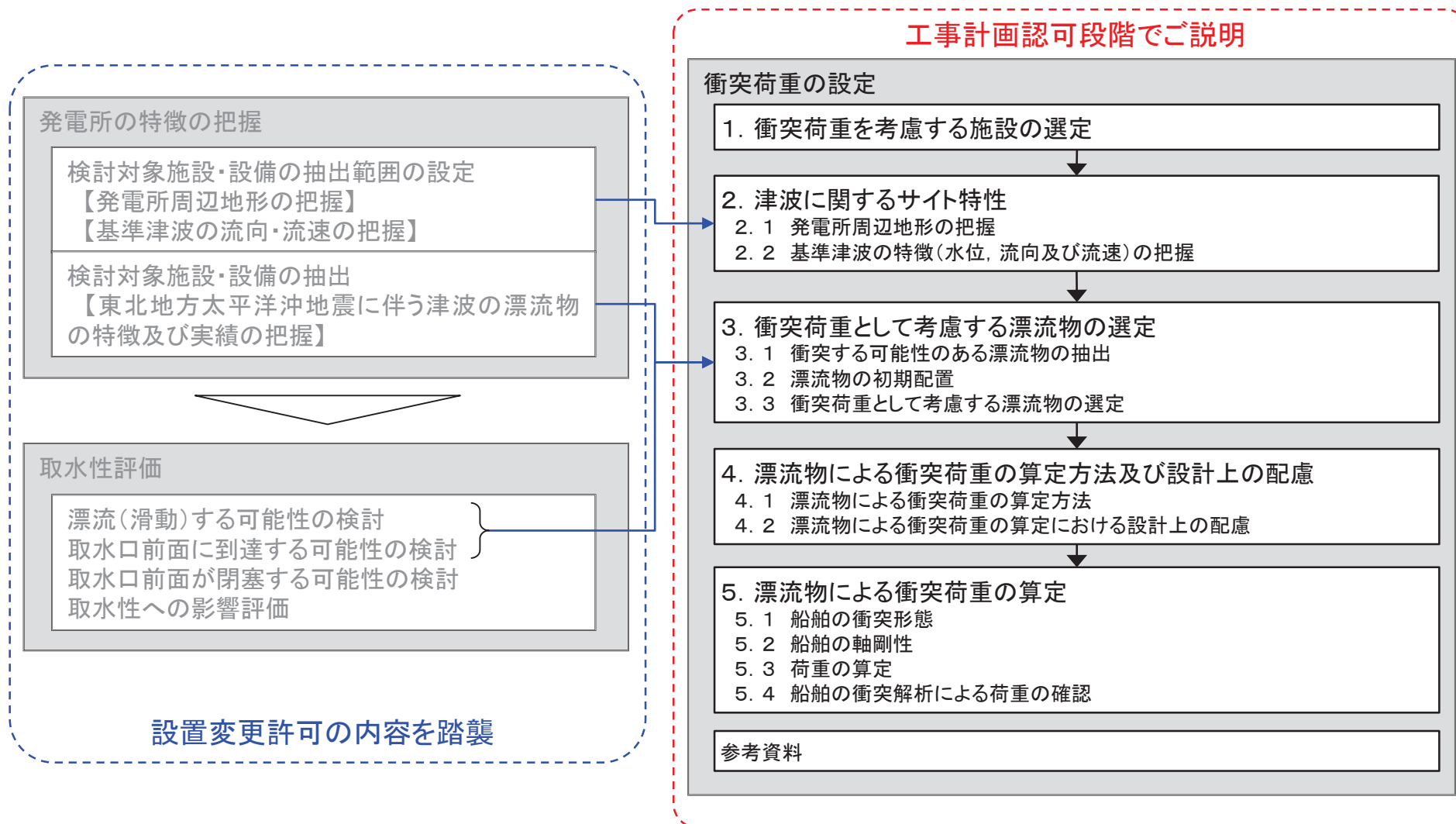
3.7.1 漂流物による波及的影響の検討

【規制基準における要求事項等】

津波防護施設の外側の発電所敷地内及び近傍において建物・構築物、設置物等が破損、倒壊、漂流する可能性について検討すること。

上記の検討の結果、漂流物の可能性がある場合には、防潮堤等の津波防護施設、浸水防止設備に波及的影響を及ぼさないよう、漂流防止措置または津波防護施設、浸水防止設備への影響防止措置を施すこと。

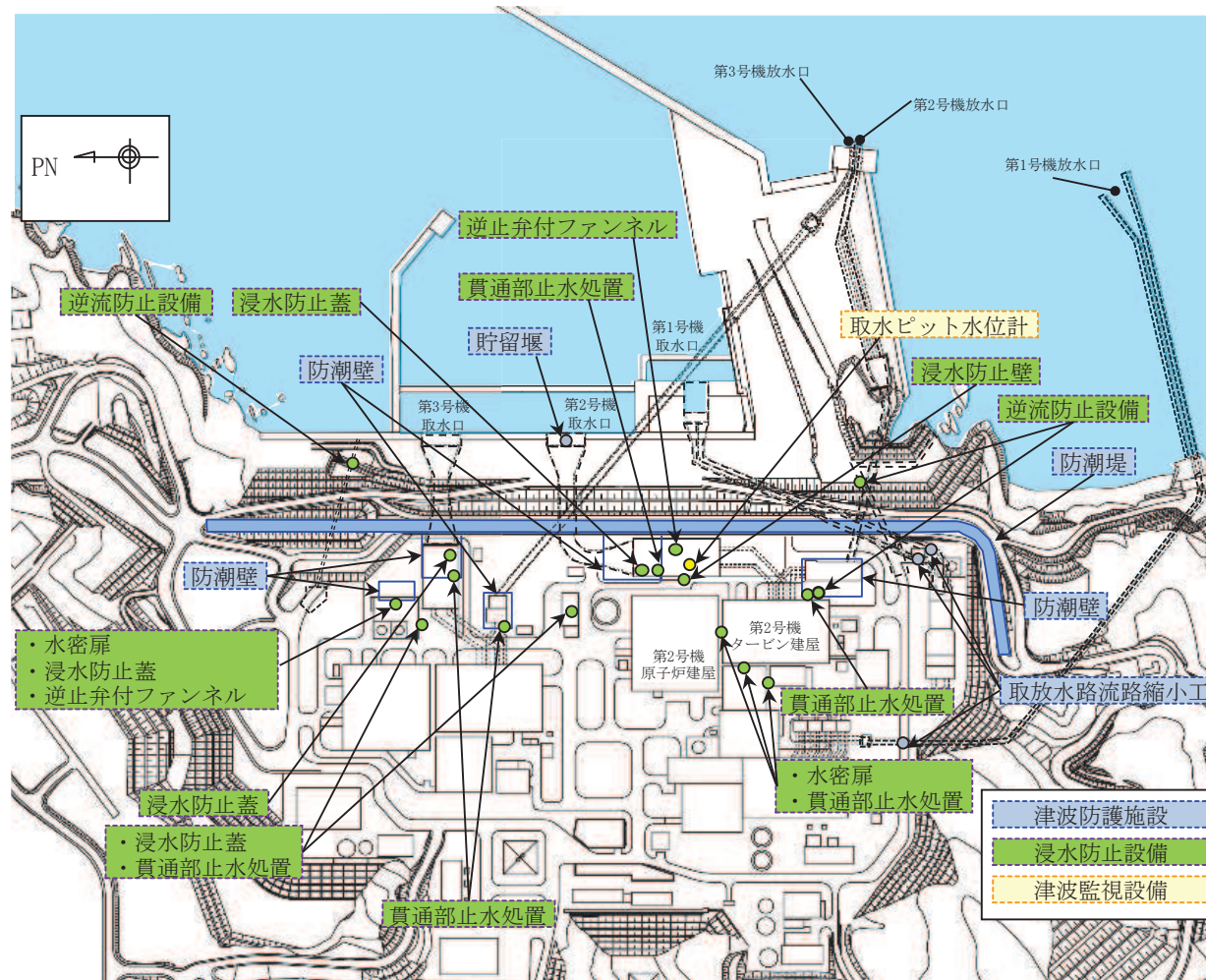
- 漂流物に対する要求事項に対して、工事計画認可では、設置変更許可における「発電所の特徴の把握」及び「取水性評価」を踏襲し、それらを踏まえた衝突評価を行うための衝突荷重を設定する。



1. 衝突荷重を考慮する施設の選定

1. 衝突荷重を考慮する施設の選定(1/2)

- 漂流物による影響を検討する津波防護施設, 浸水防止設備及び津波監視設備の配置は下図のとおり。



津波防護施設, 浸水防止設備及び津波監視設備の配置図

1. 衝突荷重を考慮する施設の選定(2/2)

- 漂流物による衝突荷重を考慮する施設については、各施設の設置位置を踏まえて、防潮堤、屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)及び貯留堰を選定した。

衝突荷重を考慮する施設

施設・設備		防潮堤よりも海側に設置されているか	地上(海中含む)に設置されているか	評価 (衝突荷重の考慮)	
津波防護施設	防潮堤	鋼管式鉛直壁	—	地上(露出部下端標高O.P.+17.0m)	考慮する
		盛土堤防	—	地上(下端標高O.P.+5.0m)	考慮する
	防潮壁	敷地側	— *	考慮しない	
	取放水路流路縮小工	敷地側	— *	考慮しない	
	貯留堰	海側	海中(天端標高O.P.-6.3m)	考慮する	
浸水防止設備	逆流防止設備	屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)	海側	地上(下端標高O.P.+5.7m)	考慮する
		屋外排水路逆流防止設備(防潮堤南側)	海側	地中	考慮しない
		補機冷却海水系放水路逆流防止設備	敷地側	— *	考慮しない
	浸水防止設備	浸水防止蓋	敷地側	— *	考慮しない
		浸水防止壁	敷地側	— *	考慮しない
		水密扉	敷地側	— *	考慮しない
		逆止弁付ファンネル	敷地側	— *	考慮しない
	貫通部止水処置	敷地側	— *	考慮しない	
津波監視設備	取水ピット水位計	敷地側	— *	考慮しない	

注記 * : 防潮堤よりも敷地側に設置されており、漂流物は衝突しないため、評価不要。

2. 津波に関するサイト特性

2.1 発電所周辺地形の把握

2.2 基準津波の特徴(水位, 流向及び流速)の把握

2. 1 発電所周辺地形の把握

- 発電所は、東北地方太平洋側のリアス海岸の南端部に位置する牡鹿半島の女川湾南側の小規模な湾奥に立地している。
- また、発電所は女川湾の湾口部に位置し、発電所よりも西側の湾の奥側には複数の漁港や女川町等の市街地が形成されている。



【発電所周辺地形】



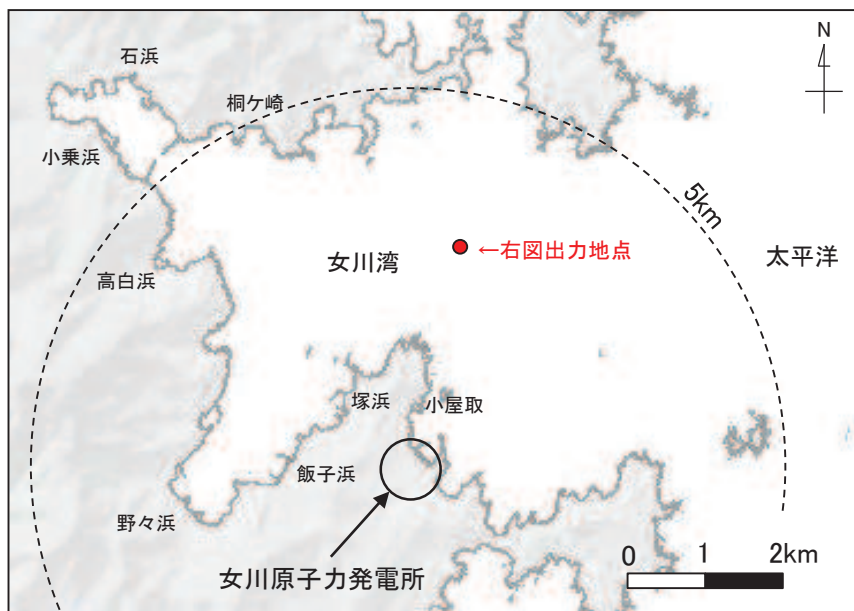
2.2 基準津波の特徴(水位, 流向及び流速)の把握(1/3)

第663回審査会合(H31.3.12)
資料1-4 p58 一部加筆

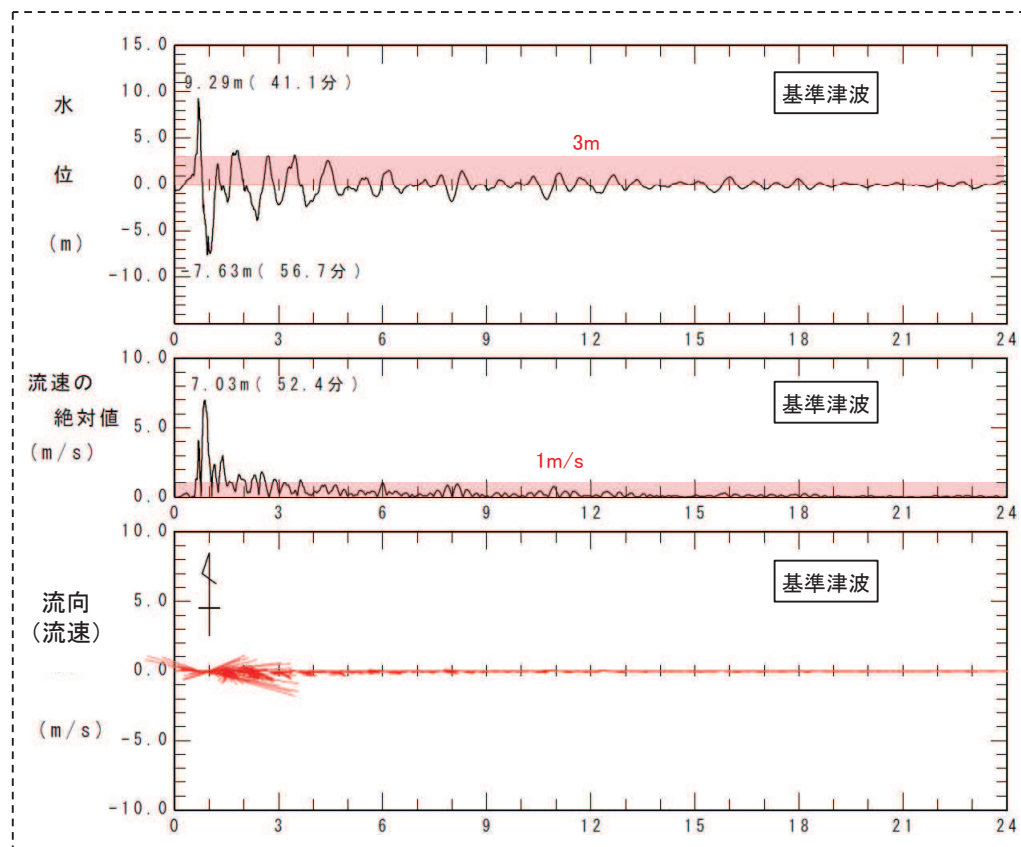
【女川湾内の津波の特徴】

女川湾の中央付近の水位, 流速の絶対値及び流向(流速)から, 津波第一波の水位及び流速が支配的で, 東西方向の流れが卓越している特徴がある。また, 第二波以降の水位及び流速は小さいが, 東西方向の流れは繰り返されている(詳細は参考1に示す)。

- ✓ 水位時刻歴波形から, 基準津波第一波の水位が支配的であり, 第二波以降の水位は第一波に比べて低い。
- ✓ 流速の絶対値の時刻歴波形から, 基準津波第一波の流速が支配的であり, 第二波以降の流速は第一波に比べて遅い。
- ✓ 流向(流速)の時刻歴から, 基準津波第一波の東西方向の流れが卓越しており, 第二波以降の流速は遅いものの, 東西方向の流れを繰り返している。



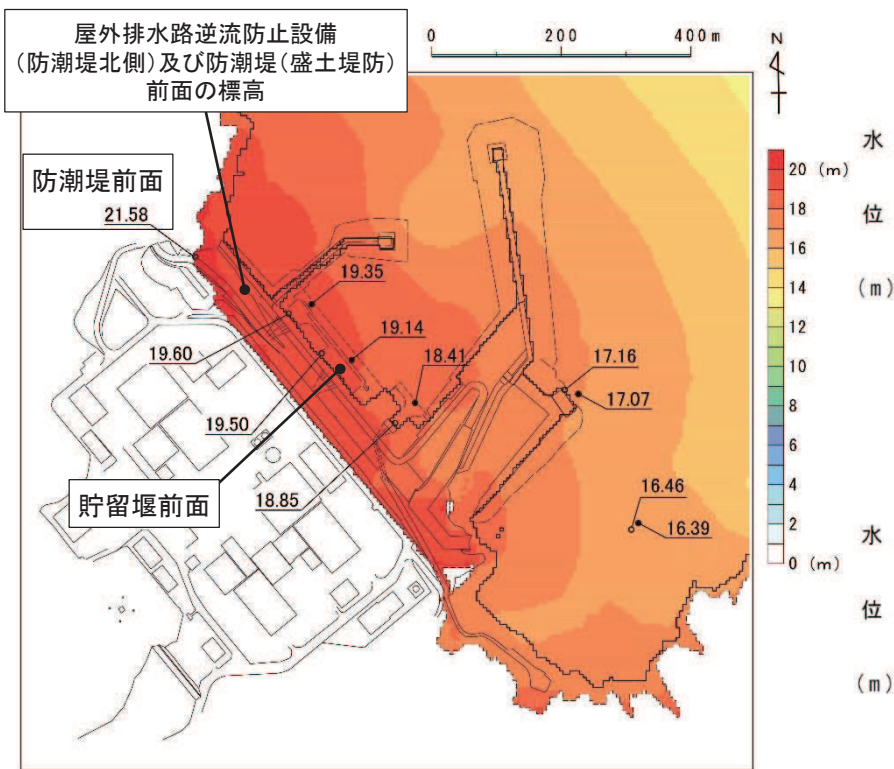
【水位, 流速の絶対値及び流向(流速)の出力点位置】



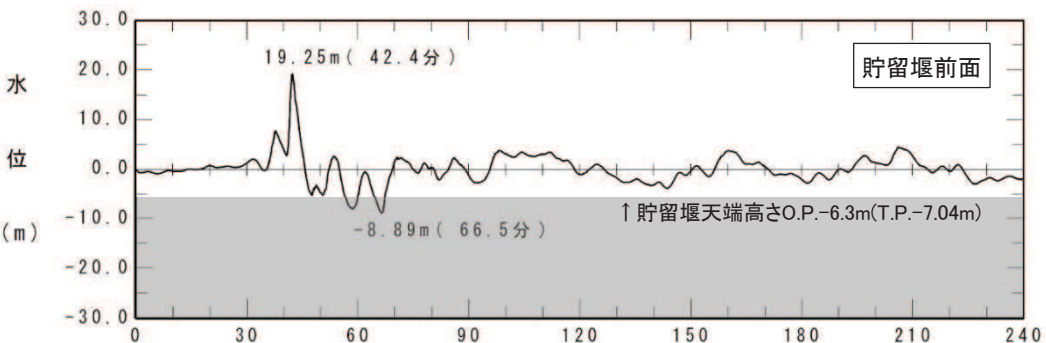
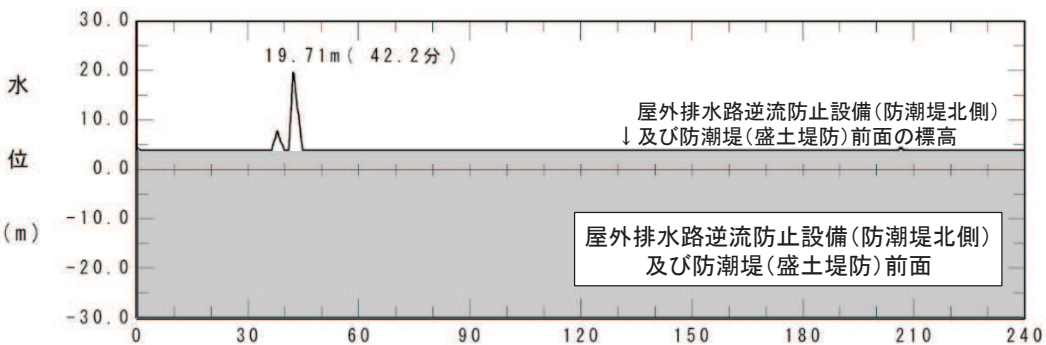
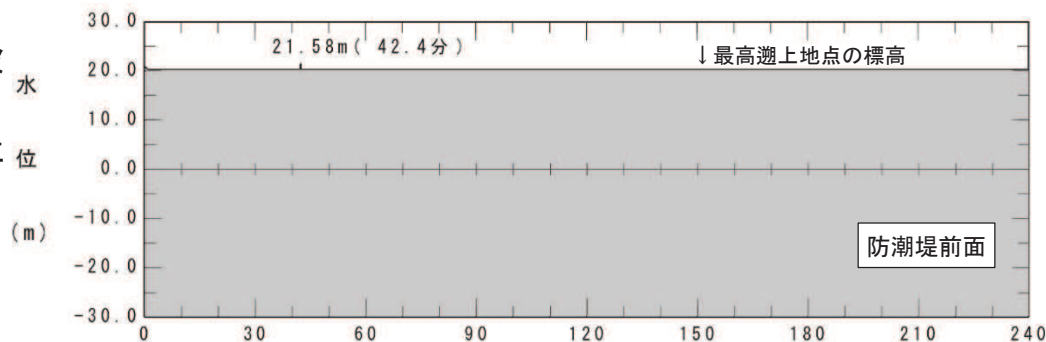
2.2 基準津波の特徴(水位, 流向及び流速)の把握(2/3)

【発電所の津波の特徴(水位)】

- 防潮堤前面及び屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)前面は、基準津波の第一波により最大水位となり、第二波以降は到達しない。
- 貯留堰については、第一波では露出せず、第二波以降に海中から露出する。



基準津波による最大水位上昇量分布(全時刻)



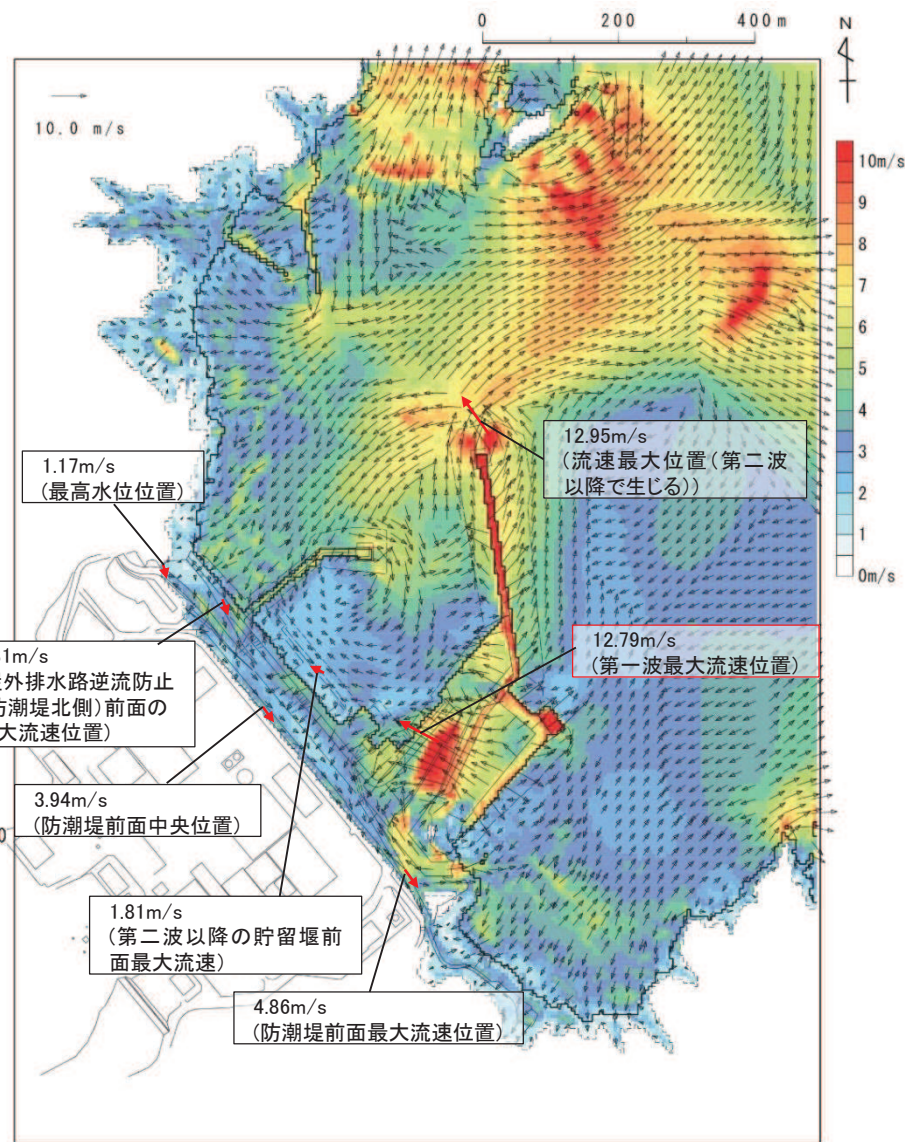
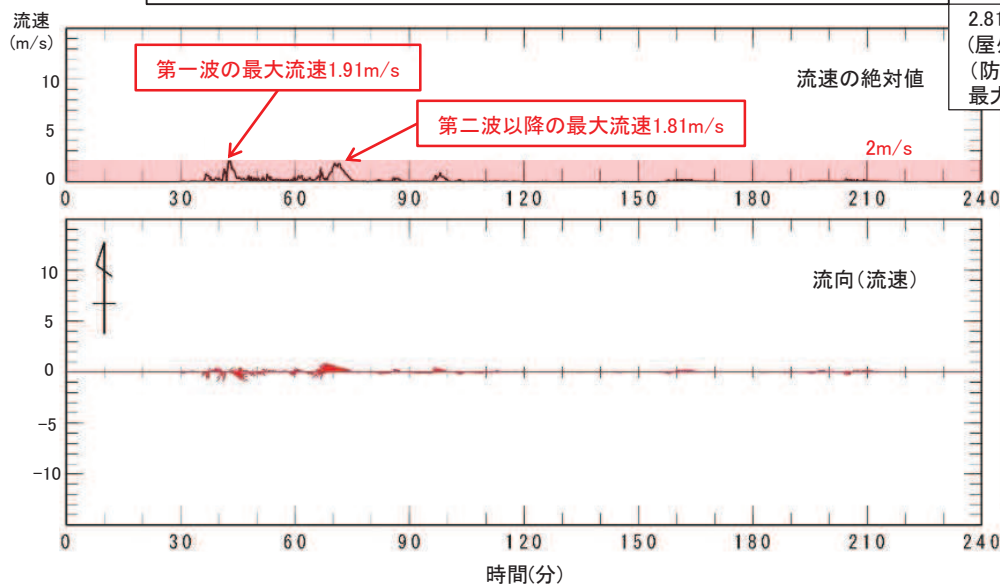
水位時刻歴波形

2.2 基準津波の特徴(水位, 流向及び流速)の把握(3/3)

【発電所の津波の特徴(流向・流速)】

- 第一波での最大流速は12.79m/sであり、敷地に近づく方向である。
- 防潮堤前面及び屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)前面における最大流速は、いずれも第一波で生じ、それぞれ4.86m/s及び2.81m/sであり、各設備に対して沿うような方向となっている。
- 貯留堰が露出する第二波以降において、貯留堰前面の最大流速は1.81m/sであり、貯留堰に対して沿うような方向となっている。
- なお、敷地前面域での最大流速は、第二波以降の防波堤付近で、12.95m/sとなっているが、発電所から離れる方向である。
- 第一波は沖合から敷地に向かう一方向の流れであるが、第二波以降では寄せ波と引き波を交互に繰り返している。

第一波で衝突する漂流物は13m/s、第二波以降で衝突する可能性のある漂流物は2m/sの流速(衝突速度)を考慮する。



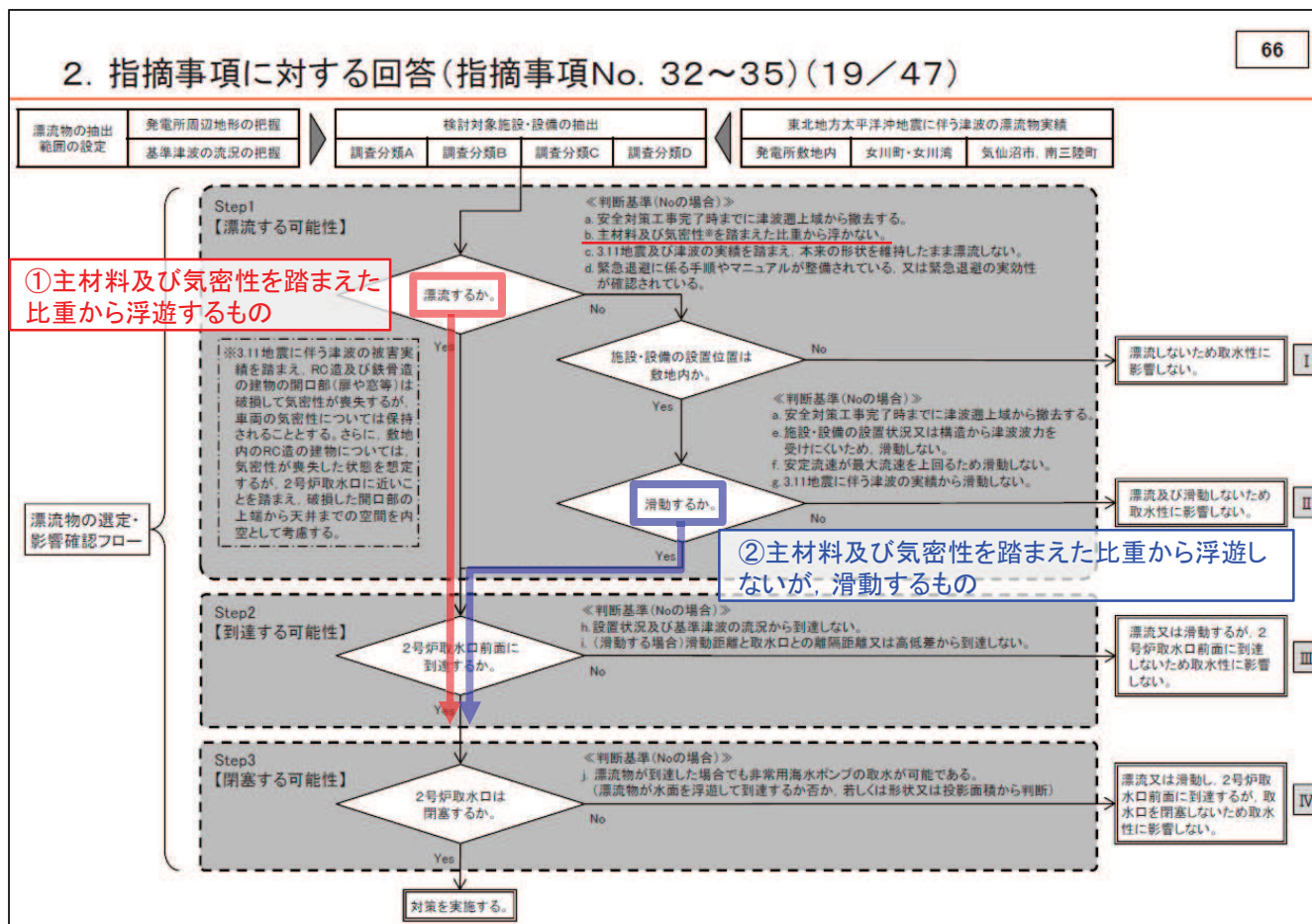
基準津波における最大流速分布図(全時刻)

3. 衝突荷重として考慮する漂流物の選定

- 3. 1 衝突する可能性のある漂流物の抽出
- 3. 2 漂流物の初期配置
- 3. 3 衝突荷重として考慮する漂流物の選定

3. 1 衝突する可能性のある漂流物の抽出(1/2)

- 設置変更許可の取水性評価において「取水口前面に到達する可能性のある漂流物」として整理した漂流物は、主材料及び気密性を踏まえた比重から、①浮遊するものと②浮遊しないが滑動するものに分けられる。

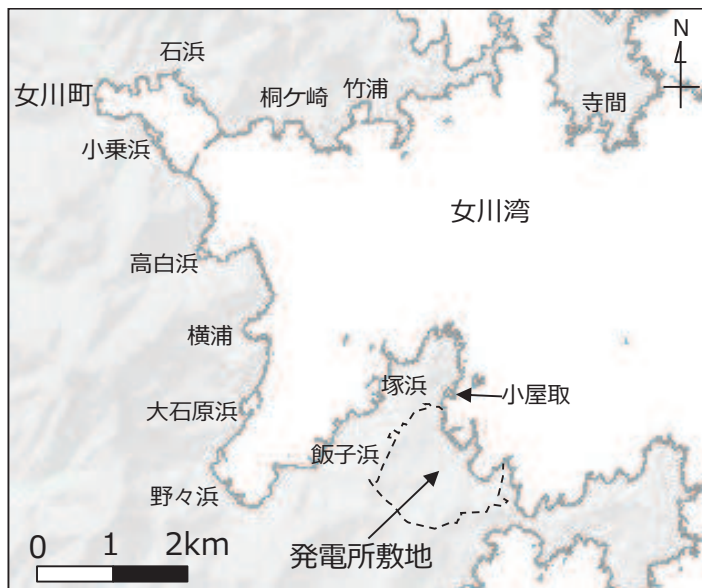


3. 1 衝突する可能性のある漂流物の抽出(2/2)

- 設置変更許可で「取水口前面に到達する可能性のある漂流物」として整理したものは右表のとおり。
- これらの漂流物から、防潮堤、屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)及び貯留堰に衝突する可能性がある漂流物を抽出する。
- 衝突荷重は初期配置に影響するため、各漂流物の初期配置を検討した(次頁以降に示す)。

取水口前面に到達する可能性のある漂流物(設置変更許可で整理)

範囲		取水口へ到達する漂流物	重量等	取水口への到達形態	
敷地内	陸域 (主にO.P.+2.5m~ O.P.+4.0m)	角落し	約7t	滑動	
		第3号機モニタリング架台	—	滑動	
		車両系重機・燃料等輸送車	2.7~41.2t	滑動	
		PC板(カーテンウォール)	約8t	滑動	
		キュービクル類	約5t	滑動	
		がれき	—	浮遊	
		巡視点検用車両	2.15t	浮遊	
海域		ゴムボート	1t未満	浮遊	
敷地外	小屋取地区	海域	小型漁船(FRP)	総トン数5t*1 (排水トン数:15t)	浮遊
		陸域	がれき	—	浮遊
			車両	—	浮遊
	小屋取地区以外	海域	がれき	—	浮遊
			漁船(FRP)	総トン数19t*2 (排水トン数:57t)	浮遊
		陸域	がれき	—	浮遊
			車両	—	浮遊
			コンテナ・ユニットハウス	約30t	浮遊
			タンク(小乗浜地区のみ)	22t以下 (約200kl)	浮遊



女川原子力発電所周辺

注記*1: 小屋取漁港の漁船は、隻数が18隻で、いずれもFRP製であり、総トン数は0.7~4.7tである。

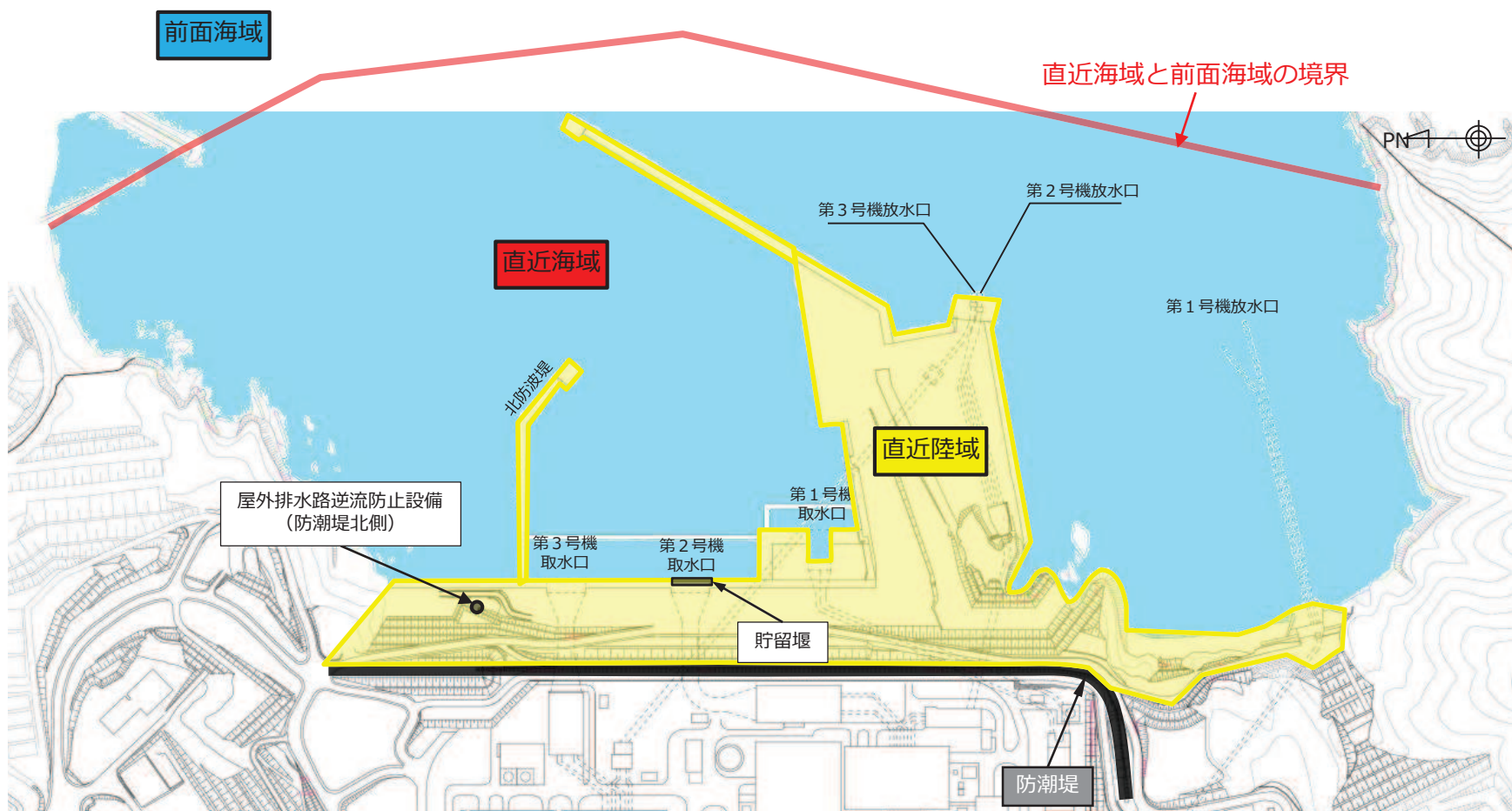
*2: 小屋取地区以外の漁船は、約400隻であり、その9割以上が総トン数5t未満である。また、総トン数10~19tの漁船は5隻(塚浜:2隻, 飯子浜:1隻, 寺間:2隻)のみで、各漁港前面の区画漁業権範囲内で養殖を行っているか、女川湾よりも太平洋側で漁を行っている。

3.2 漂流物の初期配置(1/6)

- ▶ 漂流物の初期配置については、流向・流速の特徴及び漂流物の衝突を考慮する施設からの距離を踏まえ、「直近陸域」、「直近海域」及び「前面海域」の3つに区分した。

【直近陸域】

- ✓ 「直近陸域」からの漂流物としては、敷地内の陸域からの漂流物を選定した。

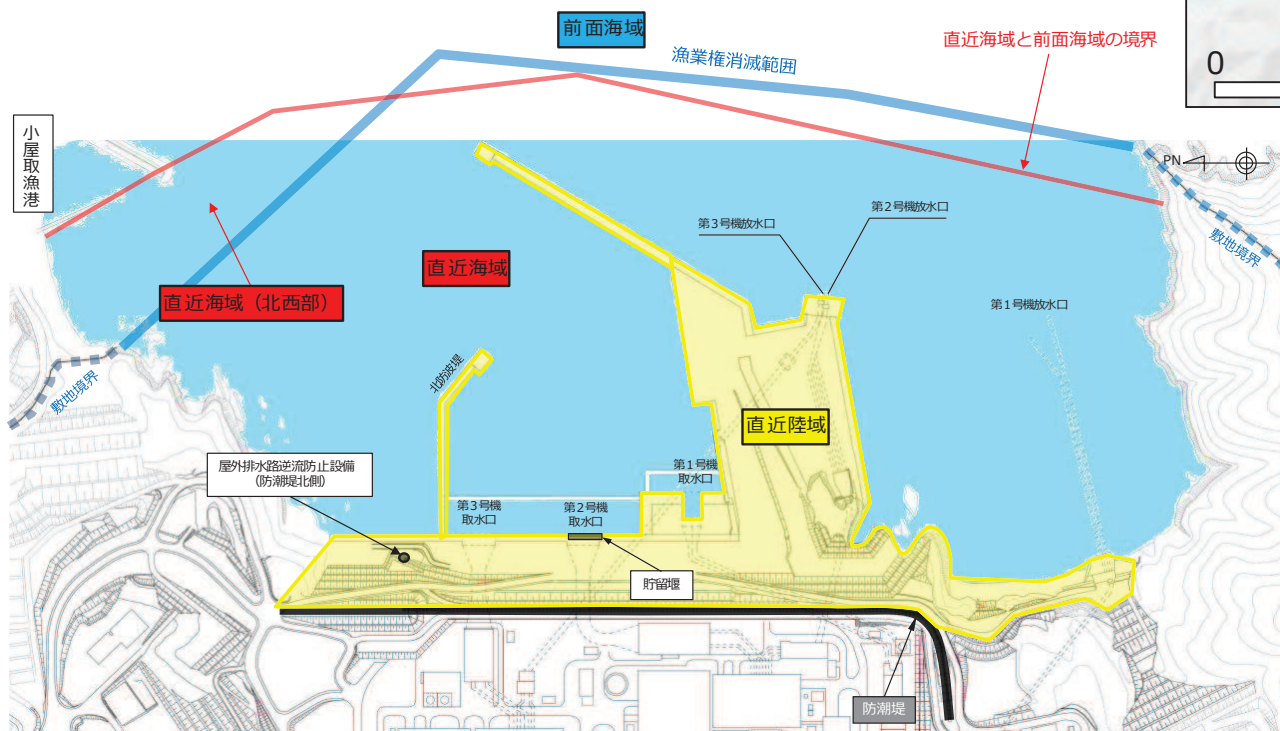


「直近陸域」、「直近海域」及び「前面海域」の区分

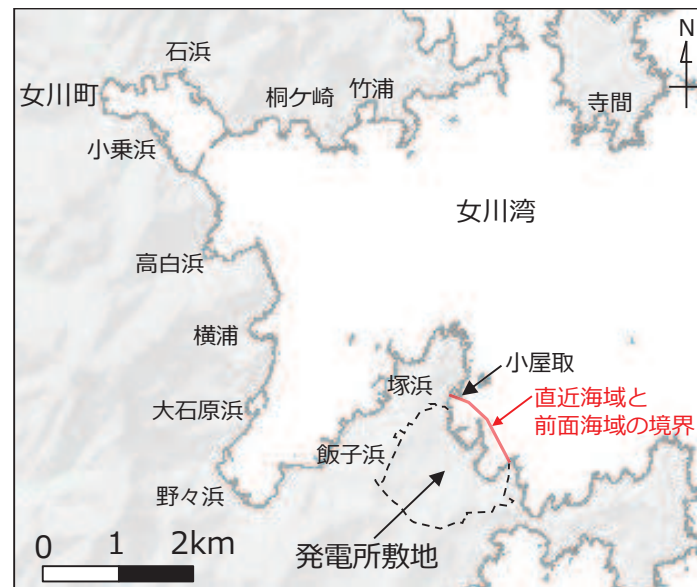
3.2 漂流物の初期配置(2/6)

【直近海域(1/3)】

- ✓ 各地区(漁港含む)は、いずれも「直近海域」には該当していない。
- ✓ そのため、「直近海域」に該当する漂流物は、漁をしている漁船又は航行・退避中の漁船が考えられる。
- ✓ また、「直近海域」の大部分は漁業権消滅区域に設定されているが、「直近海域」の北西部の一部(小屋取漁港の港口付近)において漁業権消滅区域ではない範囲(以下、「直近海域(北西部)」という。)があることを踏まえ、整理を行った(次頁以降に示す)。



「直近海域」と漁業権消滅区域の関係



女川原子力発電所周辺

3. 2 漂流物の初期配置(3/6)

【直近海域(2/3)】

以下の整理から、いずれの状態においても小屋取漁港の漁船が整理される。

(漁を行っている漁船)

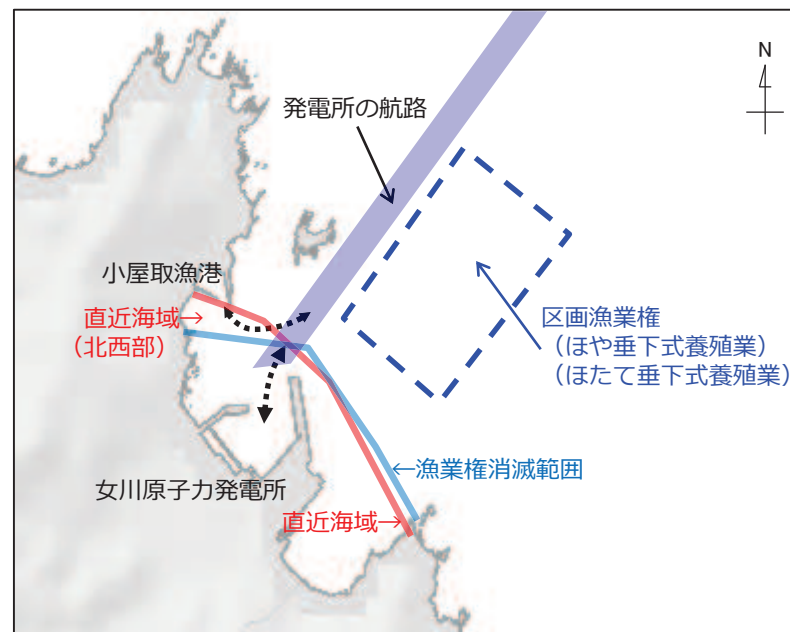
- ✓ 「直近海域」の大部分は漁業権消滅区域として設定されていることから、この範囲では漁が行われていない。
- ✓ 一方、「直近海域(北西部)」は漁業権があり、小屋取漁港の港口に位置していることから、小屋取漁港の小型漁船(FRP)が漁をしていることが想定される。ただし、「直近海域(北西部)」近傍は発電所及び小屋取漁港の航路となっていることから、航行の安全面の観点で、小屋取漁港の小型漁船(FRP)以外が「直近海域(北西部)」で漁をしている可能性はない。

(航行中の漁船)

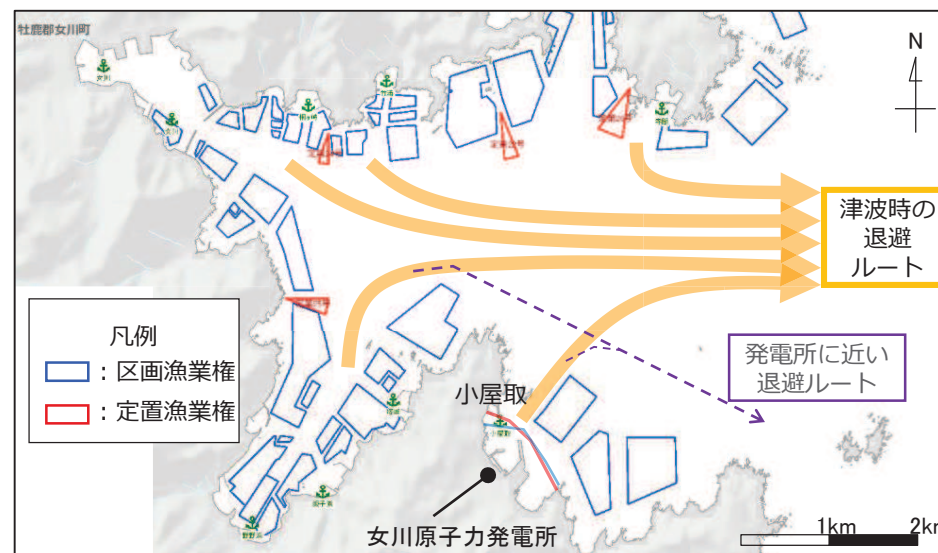
- ✓ 「直近海域」は小屋取漁港の航路となっていることから、小屋取漁港の小型漁船(FRP)は区画漁業権範囲内及び沖合へ移動する際に「直近海域」を航行することが想定される。
- ✓ 一方、発電所は小規模な湾の奥に立地していること、「直近海域(北西部)」近傍は発電所及び小屋取漁港の航路となっていること及び発電所前には区画漁業権が設定されており、ほや、ほたて及びかき垂下式養殖による棚があることから、小屋取漁港以外の漁船が「直近海域」を航行することはない。

(退避中の漁船)

- ✓ 「直近海域」は小屋取漁港の港口であることから、小屋取漁港から退避する小型漁船(FRP)が想定される。
- ✓ ただし、小屋取漁港以外の漁船については、退避ルートとして遠回りになることから、「直近海域」を退避ルートにすることはない。



発電所前面の航路及び区画漁業権範囲

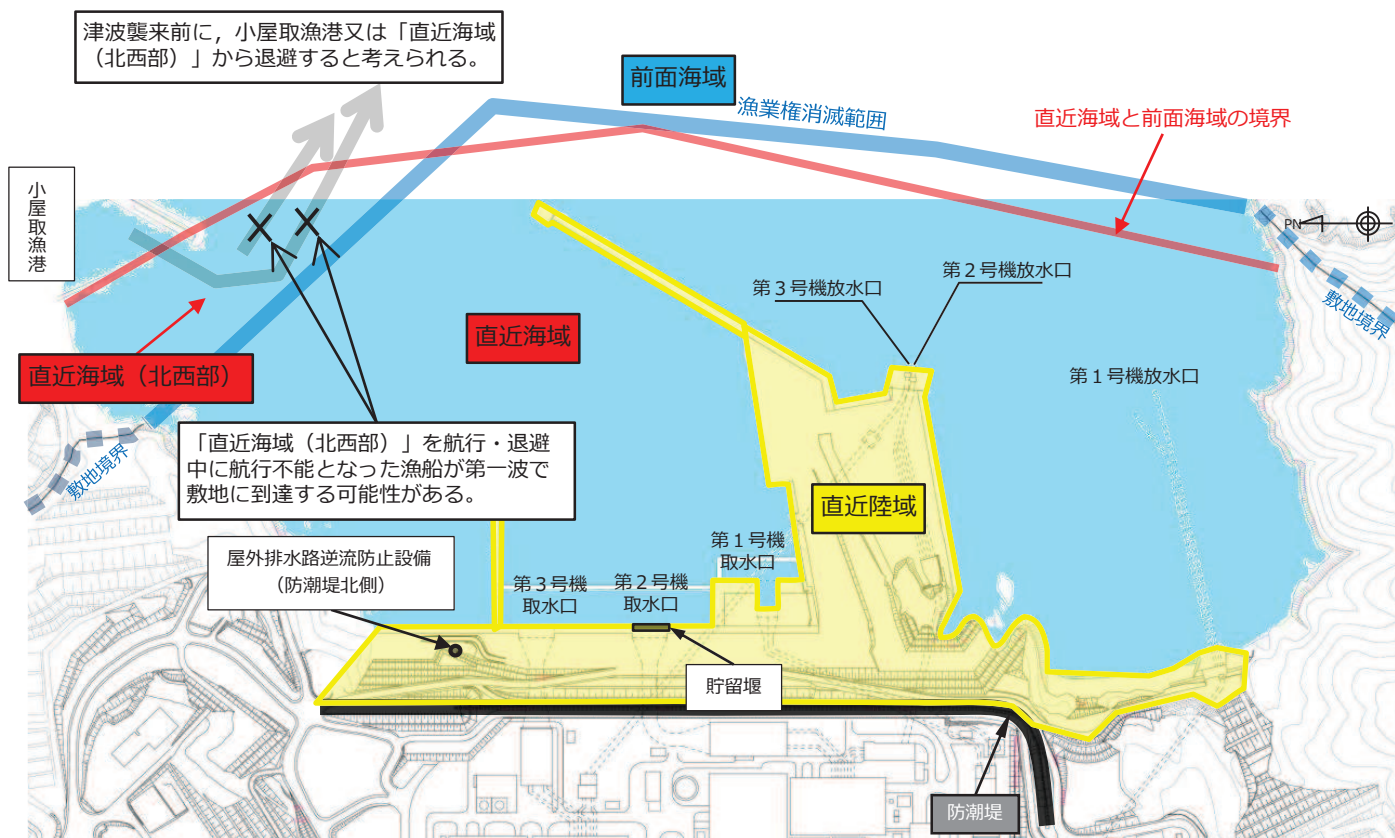


津波警報時の退避ルート

3. 2 漂流物の初期配置(4/6)

【直近海域(3/3)】

- 以上の検討から、「直近海域」には小屋取漁港の小型漁船(FRP)のみが整理されることから、これらの漁船が航行・退避中に航行不能となることを想定し、「直近海域」からの漂流物として選定する。



「直近海域」からの漂流物の整理

3.2 漂流物の初期配置(5/6)

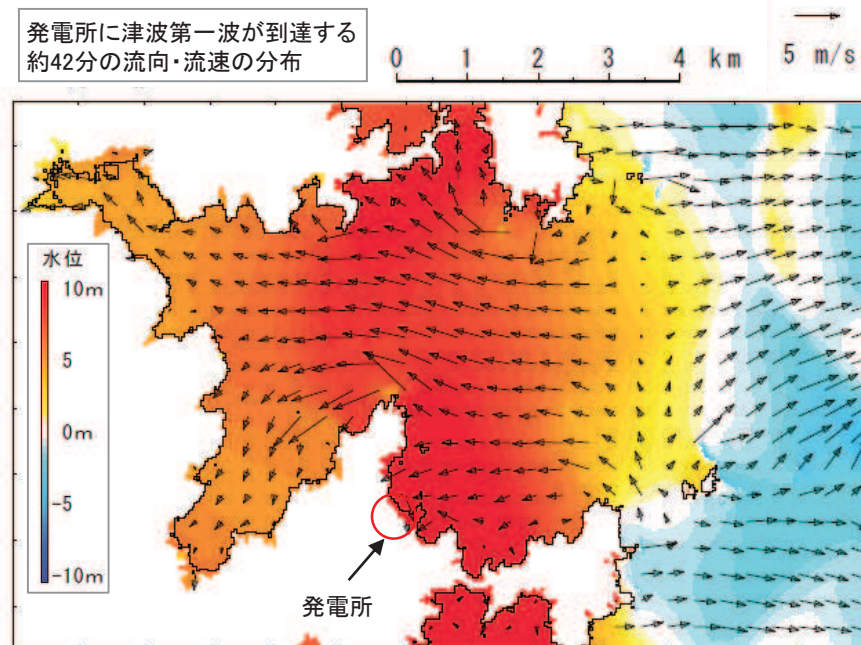
【前面海域】

- 津波に関するサイト特性としては以下の項目が挙げられる。
 - ✓ 津波は太平洋側から襲来して、女川湾内を東から西に向かって流れ、その後も東西方向の流れが繰り返す。
 - ✓ 発電所は女川湾の湾口部に位置していることから、発電所に津波第一波が到達した時刻では発電所よりも西側には到達していない。
 - ✓ 各地区(漁港含む)に津波第一波が到達した後は陸側の奥に津波が浸入している。

- 以上のようなサイト特性から、小屋取地区の海域以外の漂流物に関しては、各地区の陸側奥へ漂流するか、女川湾を東西方向に漂流すると考えられ、発電所に到達して衝突する可能性は非常に低い(詳細は参考2)。

- ただし、2011年東北地方太平洋沖地震による津波の実績から時間をかけてゆっくりと発電所に到達する漂流物もあったことから、念のため、これらの漂流物については「前面海域」からの漂流物として選定する。

発電所に津波第一波が到達する約42分の流向・流速の分布



敷地外からの漂流物

範囲		漂流物	重量
小屋取地区	海域	小型漁船(FRP)	総トン数: 5t
	陸域	がれき	—
敷地外	海域	がれき	—
		漁船(FRP)	総トン数: 19t
	陸域	がれき	—
		車両	—
		コンテナ・ユニットハウス	約30t
タンク(小乗浜のみ)	22t以下		

「直近海域」からの漂流物に選定する。
 なお、がれきよりも小型漁船(FRP)の方が重量があると考えられることから小型漁船に代表させる。

サイト特性から、発電所に到達して衝突する可能性は非常に低いが、3.11津波の実績を踏まえ、「前面海域」からの漂流物に整理する。
 なお、この漂流物のうち最も重量の大きい漁船(FRP)(総トン数19t: 排水トン数57t)を代表漂流物とする。

3.2 漂流物の初期配置(6/6)

- 以上を踏まえ、衝突する可能性のある漂流物の初期配置を下表のとおり整理した。
- なお、敷地外からの漂流物の特徴及び流向流速の観点からの検討については参考2に示す。

範囲		漂流物	重量等	到達形態	
敷地内	陸域	角落し	約7t	滑動	
		第3号機モニタリング架台	— *1	滑動	
		車両系重機・燃料等輸送車	2.7~41.2t	滑動	
		PC板(カーテンウォール)	約8t	滑動	
		キュービクル類	約5t	滑動	
		がれき	— *2	浮遊	
		巡視点検用車両	2.15t	浮遊	
	海域	ゴムボート	1t未満	浮遊	
敷地外	小屋取地区	海域	小型漁船(FRP)	総トン数5t (排水トン数:15t)	浮遊
		海域	がれき	— *2	浮遊
		陸域	がれき	— *2	浮遊
	小屋取地区以外	海域	がれき	— *2	浮遊
			漁船(FRP)	総トン数19t (排水トン数:57t)	浮遊
		陸域	がれき	— *2	浮遊
			車両	— *3	浮遊
			コンテナ・ユニットハウス	約30t	浮遊
			タンク	22t以下(約200kl)	浮遊

「直近陸域」(滑動)からの漂流物に選定する。最も重量のある車両系重機(41.2t)を代表漂流物とする。

「直近陸域」(浮遊)からの漂流物に選定する。最も重量のある巡視点検用車両(2.15t)を代表漂流物とする。

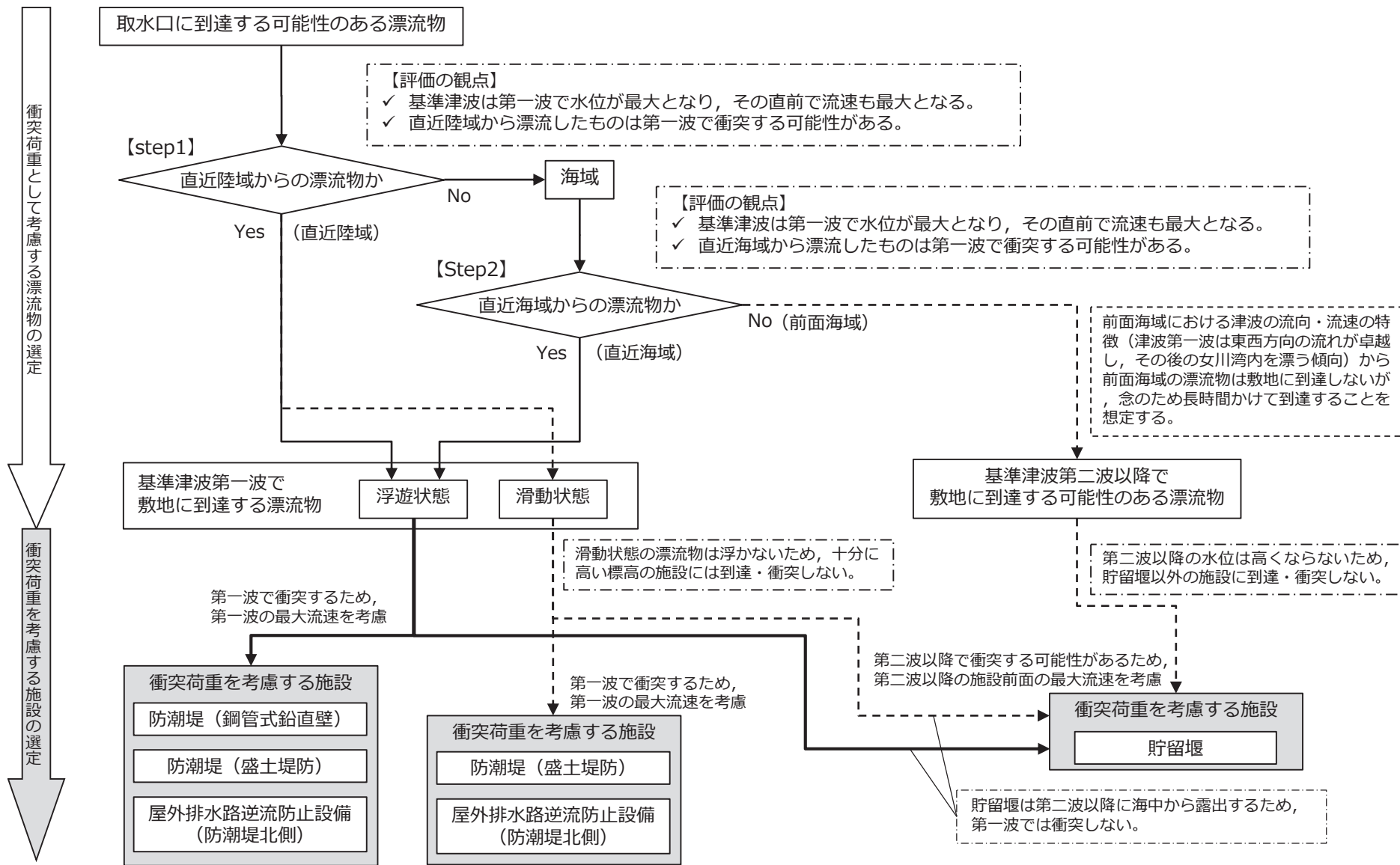
「直近海域」からの漂流物に選定する。最も重量のある小型漁船(FRP, 排水トン数15t)を代表漂流物とする。

「前面海域」からの漂流物に選定する。最も重量のある漁船(FRP, 排水トン数57t)を代表漂流物とする。

注記 *1: 第3号機モニタリング架台はその形状から車両系重機の41.2tよりも軽いと評価。
 *2: がれきは、3.11地震に伴う津波で漂流したがれきを踏まえ、巡視点検用車両の2.15tよりも軽いと評価。
 *3: 敷地外の車両は、漁船の57tよりも軽いと評価。

3.3 衝突荷重として考慮する漂流物の選定(1/2)

➤ 基準津波の特性，漂流形態(滑動，浮遊)，漂流物の初期配置区分，衝突を考慮する施設の設置標高の観点から，下図の選定フローに従って各施設に対して衝突する可能性のある漂流物の選定を行った。



3.3 衝突荷重として考慮する漂流物の選定(2/2)

➤ 荷重算定に用いる代表漂流物を選定した結果を下表に示す。

荷重算定に用いる代表漂流物の選定結果

衝突する可能性のある漂流物	重量等	到達形態	初期配置区分	衝突荷重を考慮する施設			
				防潮堤 (鋼管式鉛直壁)	防潮堤 (盛土堤防)	屋外排水路 逆流防止設備 (防潮堤北側)	貯留堰
車両系重機	41.2t	滑動	直近陸域	— *2	○	○	○
巡視点検用車両	2.15t	浮遊	直近陸域	○	○	○	○
小型漁船(FRP)	総トン数5t (排水トン数:15t*1)	浮遊	直近海域	○	○	○	○
漁船(FRP)	総トン数19t (排水トン数:57t*1)	浮遊	前面海域	— *3	— *3	— *3	○

注記 *1: 以降, 漁船の重量は排水トン数で示す

*2: 滑動状態の漂流物は浮かないため, 防潮堤(鋼管式鉛直壁)には衝突しない。

*3: 第二波以降の水位は高くないため, 貯留堰以外の施設に到達・衝突しない。

4. 漂流物による衝突荷重の算定方法及び設計上の配慮

4. 1 漂流物による衝突荷重の算定方法

4. 2 漂流物による衝突荷重の算定における設計上の配慮

4.1 漂流物による衝突荷重の算定方法

- 既往の漂流物衝突荷重算定式の導出に当たって実施した実験の条件に加え、前述で整理した衝突荷重を算定する漂流物の種類及び初期位置を踏まえ、各式の適用性を以下のとおり整理した。

既往の漂流物衝突荷重算定式の適用性整理結果

No.	出典	種類	概要	適用性
①	松富ほか(1999)	流木	円柱形状の流木が縦向きに衝突する場合の衝突荷重算定式を提案。 水理模型実験及び気中衝突実験において、流木を被衝突体の前面に配置した状態で衝突させている。	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(2003)	流木	円柱、角柱及び球の形状をした木材による漂流物の衝突荷重算定式を提案。 衝突体を被衝突体の前面に配置した状態で衝突させている。	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(2002)	流木等	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算定式を提案。 漂流物が流下(漂流)してきた場合に、表面流速を与えることで漂流流速に対する荷重が算定可能。	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(2012)	流木 コンテナ	非減衰系の振動方程式に基づき導出した荷重算定式を提案。 適用に当たっては、個別の漂流物に対して軸剛性を適切に定める必要がある。	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(2005)	コンテナ	漂流するコンテナによる漂流物の衝突荷重を提案。 コンテナを被衝突体の前面に配置した状態で衝突させている。	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ることに留意する必要があるものの、「直近陸域」からのコンテナに対して適用可能と判断する。
⑥	有川ほか(2007,2010)	流木 コンテナ	鋼製構造物(コンテナ等)による漂流物の衝突荷重を提案。 コンテナを被衝突体の前面に配置した状態で衝突させている。	剛性に係るk値を適切に定める必要があり、実験で直接確認されている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。
⑦	FEMA(2019) (ASCE(2016))	車両 流木 コンテナ 等	本文献は、新たに算定式を提案するものではないが、漂流物の衝突力についてはASCE(2016)に定めるとしている。 先行版(FEMA(2012))では、過度に保守的な漂流物衝突荷重であることを踏まえ、最新のASCE(2016)の知見に基づき漂流物衝突荷重算定式が見直されている。 ASCE(2016)によれば、海底を滑動する際の衝突荷重が例示されている。	適用に当たっては、個別の漂流物に対して軸剛性を適切に定める必要があるが、車両や流木等の漂流物に対して、2011年東北地方太平洋沖地震津波による実現象の再現性が検証されており、衝突荷重の算定が可能であるため、「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。 また、滑動する際の衝突荷重の例示があることから、「直近陸域」からの滑動による漂流物に対して適用可能と判断する。

4.2 漂流物による衝突荷重の算定における設計上の配慮

① 漂流物による衝突荷重算定用の流向

漂流物が被衝突物に対して法線方向に作用する際に衝突荷重は大きくなると考えられるため、設計上の配慮として、漂流物は被衝突物に対して法線方向から衝突させる。

② 漂流物による衝突荷重算定用の流速

衝突する速度が大きくなれば衝突荷重としても大きくなる。また、基準津波は第一波の水位及び流速が支配的であるため、第一波で衝突する場合と第二波以降で衝突する場合に分けて以下の設計上の配慮を行う。

- ✓ 第一波で衝突する可能性のある漂流物の流速については、発電所港湾を含めた敷地前面域から全ての方向の流速ベクトルを含めた中での最大流速(12.79m/s)の数値を切り上げ、13.0 m/sとする。
- ✓ 第二波以降の漂流物が衝突する際の流速については、寄せ波と引き波を繰り返していることから、被衝突物直前の最大流速(1.81m/s)の数値を切り上げ、2.0 m/sとする。

ただし、貯留堰については、第二波以降に海中から露出するため、2.0m/sの流速を適用することとなるが、直近陸域及び直近海域からの漂流物は、第一波で敷地に到達していることを踏まえ、これらの漂流物に対しては13.0m/sを適用することとする。

③ 漂流物による衝突荷重と津波荷重との重畳

津波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と考えられるが、津波による最大荷重(最大波高時における波力)と漂流物による最大荷重(最大流速時における漂流物による衝突荷重)を重畳させる。

5. 漂流物による衝突荷重の算定

- 5. 1 船舶の衝突形態
- 5. 2 船舶の軸剛性
- 5. 3 荷重の算定
- 5. 4 船舶の衝突解析による荷重の確認

5. 漂流物による衝突荷重の算定

- 規格・基準類及び既往の研究論文の衝突荷重算定式の適用性を考慮し、「直近陸域」の巡視点検用車両(2.15t)と「直近海域」の小型漁船(排水トン数15t)は「FEMA(2012)」,「前面海域」の漁船(排水トン数57t)は道路橋示方書式を適用して衝突荷重を算定することとした。
- また, p1に示すとおり第876回審査会合において, 漂流物衝突荷重算定式に道路橋示方書式及びFEMA(2019)に従いASCE(2016)を適用する方針としていたが, 先行サイトの適用実績及びFEMA(2012)を適用した方が保守的な評価となること(p35に示す)を踏まえ, 浮遊状態で衝突する可能性のある「直近陸域」の巡視点検用車両及び「直近海域」の小型漁船にはFEMA(2012)を適用することとした。
- 「FEMA(2012)」を適用する巡視点検用車両及び小型漁船については, 付加質量係数 C 及び有効軸剛性 k を設定する必要がある。付加質量係数 C は保守的に最大値の $C=1$ を適用する。また, 有効軸剛性については, 巡視点検用車両に対して甲斐田・木原(2017)の 2.8×10^6 (N/m)を用いるが, 小型漁船についてはFRP製であることを踏まえ, 材質を考慮した上で保守的な軸剛性を設定する必要があることから, 次頁以降で検討を行った。

道路橋示方書の衝突荷重算定式

$$P = 0.1 \times W \times U$$

P : 衝突力(kN) W : 輸送物の重量(kN)

U : 表面流速(m/s)

FEMA(2012)の衝突荷重算定式

$$F = 1.3 \times v \times \sqrt{k \times m \times (1 + C)}$$

F : 衝突力(kN)

m : 質量(kg)

v : 最大流速(m/s)

C : 付加質量係数

k : 有効軸剛性(N/m)

漂流物による衝突荷重算定条件

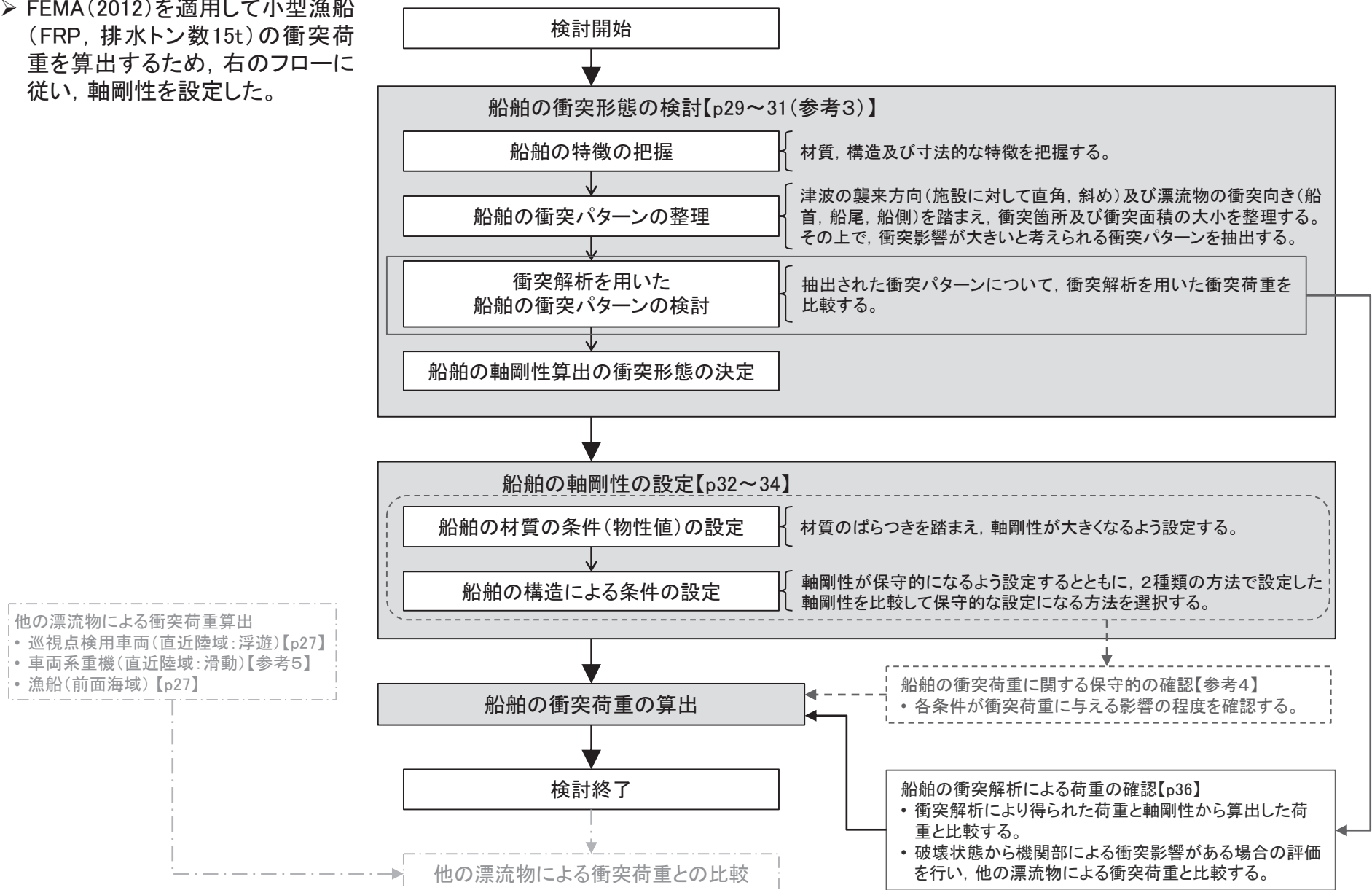
衝突する可能性のある漂流物	重量	到達形態	流速 (衝突速度)	初期配置 区分	適用式	衝突荷重を考慮する施設			
						防潮堤 (鋼管式 鉛直壁)	防潮堤 (盛土堤防)	屋外排水路 逆流防止設備 (防潮堤北側)	貯留堰
車両系重機*1	41.2 t	滑動	13 m/s	直近陸域	ASCE(2016)	—	○	○	○*2
巡視点検用車両	2.15 t	浮遊	13 m/s	直近陸域	FEMA(2012)	○	○	○	○*2
小型漁船(FRP)	排水トン数 15 t	浮遊	13 m/s	直近海域	FEMA(2012)	○	○	○	○*2
漁船(FRP)	排水トン数 57 t	浮遊	2 m/s	前面海域	道路橋示方書	—	—	—	○

注記*1: 滑動状態で衝突を考慮する車両系重機(41.2t)は, 「ASCE(2016)」を参考に, 衝突荷重を算定することとした(詳細は参考5)。

*2: 貯留堰は第二波以降に海中から露出するため, 第二波以降に衝突するが, 初期配置が「直近陸域」及び「直近海域」の漂流物は第一波で敷地に到達していることを踏まえ, 流速13m/sを適用する。

5. 漂流物による衝突荷重の算定

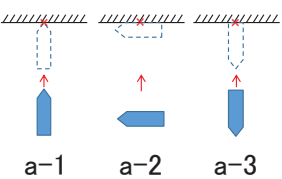
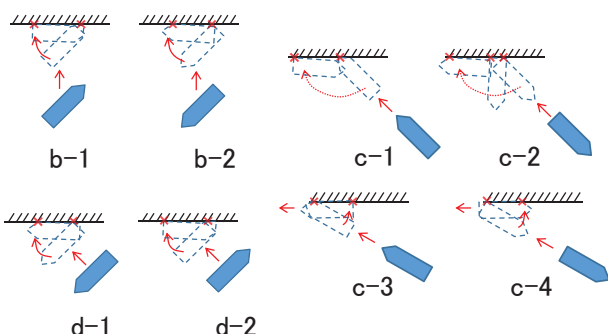
- FEMA(2012)を適用して小型漁船 (FRP, 排水トン数15t)の衝突荷重を算出するため, 右のフローに従い, 軸剛性を設定した。



5.1 船舶の衝突形態(1/3)

- 船舶が衝突する際の挙動は複雑であることから、衝突形態に関する検討を行い、衝突評価として保守的になるような衝突形態を想定する。
- 検討の結果、船首(a-1)及び船尾(a-3)で衝突する場合に施設に対する衝突評価は厳しくなると考えられることから、船首及び船尾から衝突した場合の衝突解析を実施した(次頁以降に示す)。

船舶の衝突パターンと衝突形態の特徴

衝突パターン	衝突形態の特徴
 <p>a-1 a-2 a-3</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 船首(又は船側, 船尾)の1箇所衝突する。 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)の幅は、衝突を考慮する船舶の長さの半分以下であり、海側に張出した構造ではないため、a-2では衝突することはない。 ✓ 防潮堤(鋼管式鉛直壁)は1本の杭が支持する漂流物防護工の幅が4mであることから、a-1又はa-3で衝突する場合は衝突面積が小さいため、衝突荷重を1本の杭で受け持つこととなるが、a-2で衝突する場合は船舶の長さが4m以上であるため、2本以上の杭で衝突荷重を受け持つこととなり、杭1本あたりで負担する衝突荷重は小さくなる。 ✓ 貯留堰についても、防潮堤(鋼管式鉛直壁)と同様に、a-2で衝突する場合に負担する衝突荷重は小さくなる。
 <p>b-1 b-2 c-1 c-2</p> <p>d-1 d-2 c-3 c-4</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 船首(又は船尾)付近で衝突した後で、逆側の船尾(船首)側も衝突するため、2箇所以上で衝突が生じて荷重が分散されてしまう。 ➤ Ikeno et al(2016)では木材(丸太)の気中衝突実験を行っており、縦衝突に対して斜め衝突にした場合に衝突力は小さくなることが示されており、特に衝突角度20度を越えた場合には最大で半分程度の衝突力になることが示されている。

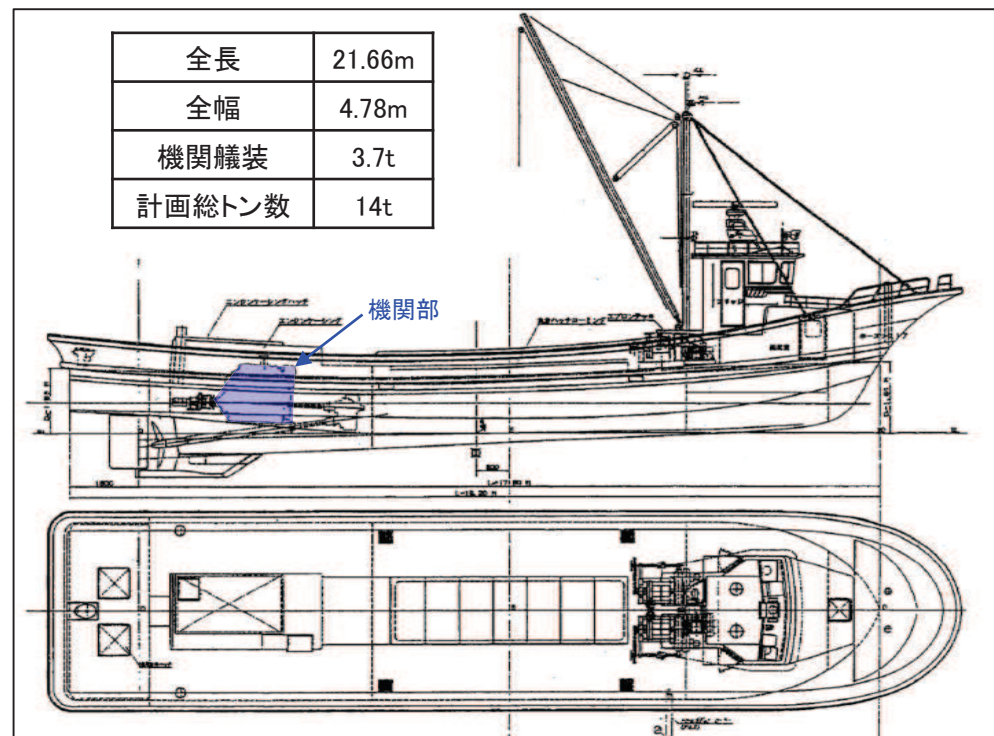
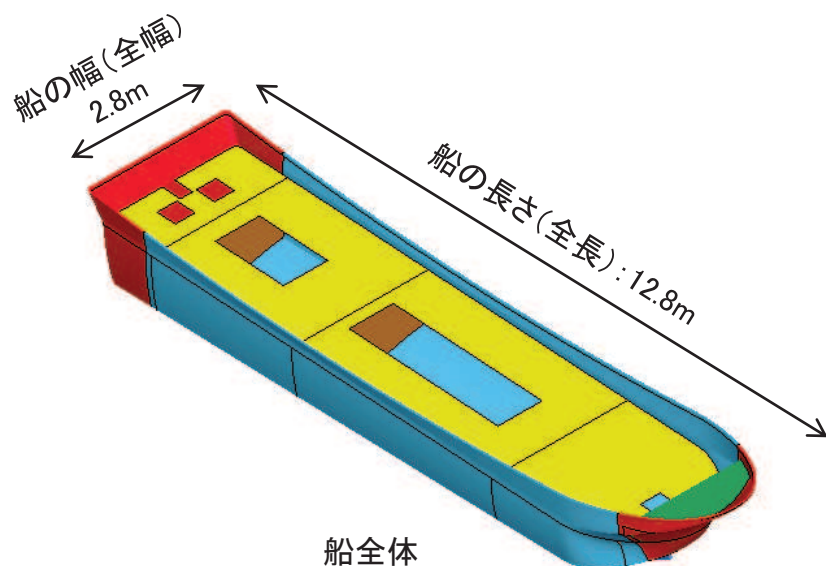
5.1 船舶の衝突形態(2/3)

検討方法

FRP製の船舶を対象に、衝突解析を実施し、船首及び船尾からの衝突荷重を比較することで、衝突形態の妥当性について確認する。

モデル化の方針

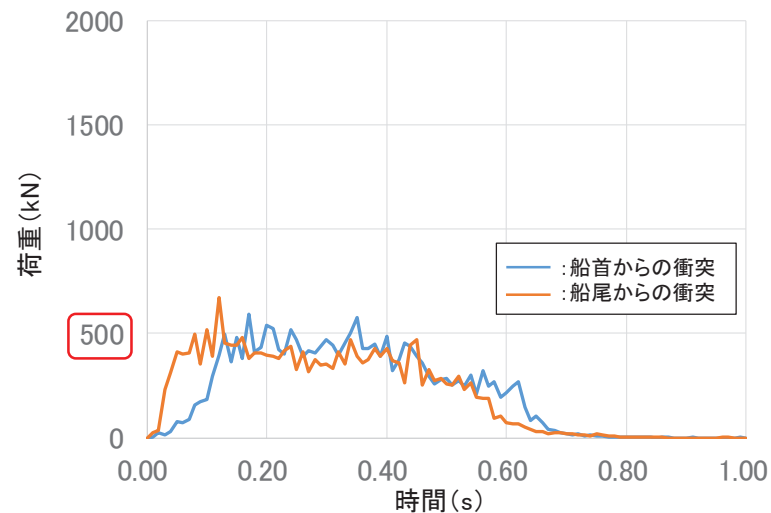
- ✓ 漂流物であるFRP製の船舶は、「小型漁船のインベントリ分析に関する研究－A：モデル船の建造・運航状況調査－（海上技術安全研究所報告 第3巻 第5号（平成15年）」（以下「海技研報告」という。）で示される総トン数14tのFRP船を基に、総トン数5tのFRP船の大きさに案分し、左下図及び次頁のようにシェル要素でモデル化した。
- ✓ 具体的には、船舶の全長の比率（21.66m：12.8m）からその他の寸法を案分した。
- ✓ なお、その他の条件は参考3に示す。



「小型漁船のインベントリ分析に関する研究－A：モデル船の建造・運航状況調査－（海上技術安全研究所報告 第3巻 第5号（平成15年）」に一部加筆

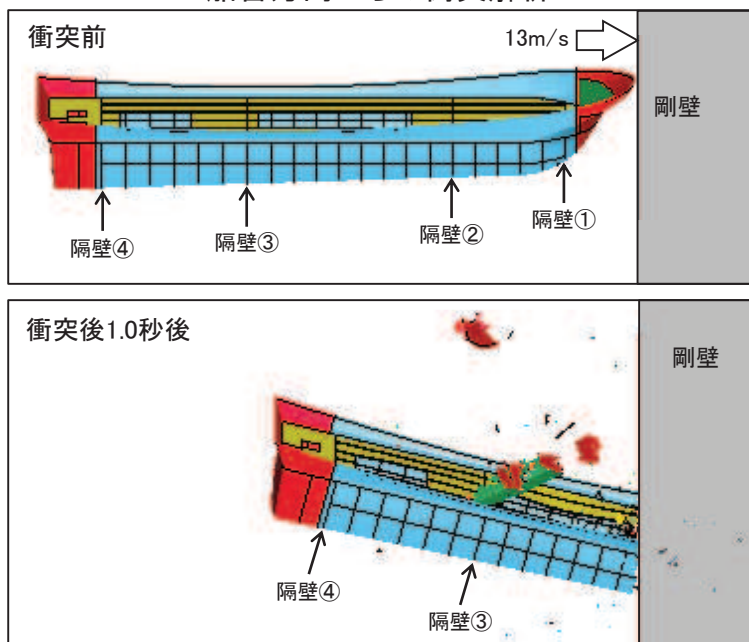
5.1 船舶の衝突形態(3/3)

- ✓ 船首及び船尾からの衝突解析を実施した結果、どちらの衝突形態の荷重も500kN程度(最大で約670kN)であり、有意な差はなく、同等の衝突荷重が作用することが分かった(解析結果の詳細は参考3に示す)。
- ✓ そのため、本評価では船首方向から衝突するパターンを衝突形態の代表とする。
- ✓ なお、船首及び船尾からの衝突荷重が同等となったことについては、検討対象の漂流物が15tと非常に重いこと、衝突速度が13m/sと速いことから、衝突エネルギーが大きく、船首及び船尾のどちらから衝突したとしても、船体部分まで破壊が生じていることがその要因である。

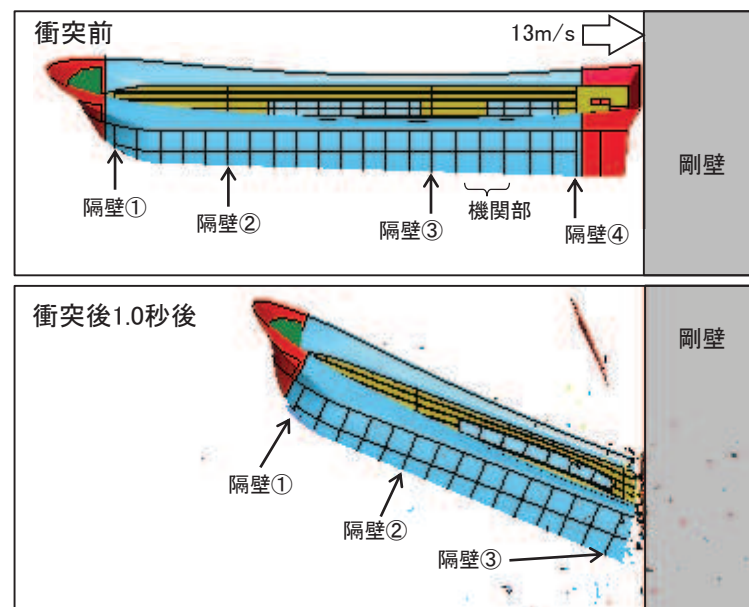


衝突荷重の時刻歴(船首, 船尾)

船首方向からの衝突解析



船尾方向からの衝突解析



5.2 船舶の軸剛性(1/3)

- 「直近海域」から衝突する可能性のある小型漁船はいずれもFRP製であることから、船舶の軸剛性に材質を考慮できる「土木学会(1994)」の設定方法を用いることとする。
- 「土木学会(1994)」では、船舶の圧壊荷重(船首強度) P_c について、以下に示す平板の座屈応力度の算定式から座屈強度 σ_c を算出し、船首形状寸法等を乗じることで求められるとしている。求められる圧壊荷重 P_c に対応する変位量(船首傾斜部の長さ) L_{sf} で除すことで、船舶の軸剛性 k_c が算出される。
- FRPの材質として用いるヤング率及びポアソン比については、軸剛性が大きくなるよう、それぞれ保守的な設定とし、船舶の構造に係る条件は「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018)」の設定方法を基本に、鋼船を基にした「土木学会(1994)」の設定方法でも確認し、軸剛性が大きくなる方法を選定することとした。

$$\sigma_c = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

$$P_c = 2Dt(\cos\theta)\sigma_c$$

$$k_c = \frac{P_c}{L_{sf}}$$

σ_c : 座屈強度 (tf/m²)

k_c : 軸剛性 (tf/m)

ν : ポアソン比

k : 座屈係数 $((b/a + a/b)^2)$

t : 船側外板厚 (mm)

L_{sf} : 船首傾斜部の長さ (m)

P_c : 圧壊荷重(船首強度) (tf)

E : ヤング率 (tf/m²)

a : 横肋骨心距 (mm)

b : 縦肋骨心距 (mm)

D : 船の深さ (m)

2θ : 船首角度 (°) (35° ~ 70°)

5.2 船舶の軸剛性(2/3)

- 算定に用いた材質に係る条件(FRPのヤング率及びポアソン比)は下表のとおり。
- ヤング率及びポアソン比は、材質のばらつきを有すると考えられる。また、これらの条件は大きい方が軸剛性も大きくなることから、文献で確認される最大値又はそれを上回る値に設定した。

軸剛性算出に用いた材質に係る条件

記号の説明	設定値	引用文献	引用文献の値
E: ヤング率	最大値である12(GPa)を採用 ($=1.22 \times 10^6 \text{tf/m}^2$)	「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」の曲げ弾性係数	$6.86 \times 10^3 (\text{N/mm}^2)$
		「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」のハンドレイアップ成形法の曲げ弾性率	9~ <u>12</u> (GPa)
		「非金属材料データブック プラスチック・FRP・ゴム・接着剤・塗料・木材及び木質材料・セラミックス[改訂2版](日本規格協会, 1985年)」のハンドレイアップ用ガラス繊維基材のGRPとしての力学的特性(標準)の曲げ弾性率	1050~1140(kgf/mm ²)
		「船舶海洋工学シリーズ⑥ 船体構造 構造編(藤久保昌彦・吉川孝男・深沢塔一・大沢直樹・鈴木英之, 2012年)」	10.7(kN/mm ²)
ν: ポアソン比	最大となる0.358を採用するが、 保守的に0.4に設定	「3相森・田中平均化手法のハイブリッドFRP梁への応用(土木学会, 2014)」	0.308
		「非金属材料データブック プラスチック・FRP・ゴム・接着剤・塗料・木材及び木質材料・セラミックス[改訂2版](日本規格協会, 1985年)」のハンドレイアップ用ガラス繊維基材のGRPとしての力学的特性(標準)	0.320~ <u>0.358</u>

5.2 船舶の軸剛性(3/3)

- 算定に用いた船舶の構造に係る条件は右表のとおり。
- 船舶の構造に係る条件は、船舶の長さから算出されるものが多いため、船舶の長さについて「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会会誌, 1978年)」の12.8mと「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」の11mを比較し、保守的な設定となるよう大きい方の12.8mをそれぞれの設定方法に適用した。
- 以上の条件から船舶の軸剛性を算出すると、右下の表のとおりとなり、「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018)」では 0.59×10^5 N/m, 「土木学会(1994)」では 1.81×10^5 N/mとなった。そのため、軸剛性が大きい 1.81×10^5 N/mを採用することとする。
- なお、船舶の軸剛性算出に用いる条件が保守的な設定になっていることを確認した(詳細は参考4)。

軸剛性算出に用いた船舶の構造に係る条件

記号の説明	船体構造を「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」を基にした設定内容	船体構造を(「土木学会(1994)」(鋼製の船舶)を基にした設定内容
k: 座屈係数	4 $((b/a + a/b)^2$ から算出	4.15 「土木学会(1994)」から算出
t: 船側外板厚	5.89mm 「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」から算出	5.22mm 「土木学会(1994)」から算出
a: 横肋骨心距	500mm 「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」から設定	472mm 「土木学会(1994)」から算出
b: 縦肋骨心距	500mm 「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」から設定	572mm 「土木学会(1994)」から算出
D: 船の深さ	1.01m 「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会会誌, 1978年)」から設定	0.88m 「土木学会(1994)」から算出
2θ : 船首角度 ($35^\circ \sim 70^\circ$)	35° 保守的になるよう設定	35° 「土木学会(1994)」から設定
L_{sf} : 船首傾斜部の長さ	1.28m 「海技研報告」及び「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」より換算	0.256m 「土木学会(1994)」から算出

船舶の軸剛性の比較

記号の説明	船体構造を「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」を基にした設定内容	船体構造を(「土木学会(1994)」(鋼製の船舶)を基にした設定内容
k_c : 軸剛性	0.59×10^5 N/m	1.81×10^5 N/m

5.3 荷重の算定

- ▶ 漂流物による衝突荷重を算出した結果、漂流物による最大衝突荷重は、いずれの施設においても巡視点検用車両(2.15t)の1855kNとなった。
- ▶ これに対して、より重量も重い船舶(排水トン数15t)の衝突荷重が小さくなっているのは、船舶がFRP製であり、軸剛性が低いことが要因である。また、排水トン数57tの船舶は「前面海域」からの漂流物であり、津波第二波以降に時間をかけてゆっくりと発電所に到達すると考えられ、衝突速度が2m/sと遅いことが要因である。
- ▶ 以上のことから、設計用衝突荷重としては保守的に2000kNとする。
- ▶ なお、設置変更許可時において漂流物の最大重量として選定した船舶(排水トン数57t)を考慮しても、設計用衝突荷重2000kNに包絡されることを確認した。

衝突する可能性のある漂流物	重量	到達形態	流速(m/s) (衝突速度)	初期配置区分	適用式	軸剛性(N/m)	衝突荷重(kN) *1			
							防潮堤 (鋼管式鉛直壁)	防潮堤 (盛土堤防)	屋外排水路 逆流防止設備 (防潮堤北側)	貯留堰
車両系重機	41.2 t	滑動	13	直近陸域	ASCE(2016)	—	—	624*2 【3.20】	624*2 【3.20】	624*2 【3.20】
巡視点検用車両	2.15 t	浮遊	13	直近陸域	FEMA(2012)	2.80 × 10 ⁶	1855 【1.07】	1855 【1.07】	1855 【1.07】	1855 【1.07】
					【参考】 ASCE(2016) (FEMA(2019))	2.80 × 10 ⁶	1261 【1.58】	1261 【1.58】	1261 【1.58】	1261 【1.58】
小型漁船(FRP)	排水トン数 15 t	浮遊	13	直近海域	FEMA(2012)	1.81 × 10 ⁵	1245 【1.60】	1245 【1.60】	1245 【1.60】	1245 【1.60】
漁船(FRP)	排水トン数 57 t	浮遊	2	前面海域	道路橋示方書	—	—	—	—	112*3 【17.8】
設計用衝突荷重							2000	2000	2000	2000

注記*1:【】内は衝突荷重に対する設計用衝突荷重の割合。

*2:「ASCE(2016)」の例示を参考に衝突荷重を算出(詳細は参考5)。

*3: 仮に発電所周辺の最大流速13m/sとしたとしても727kNであり、他の衝突荷重よりも小さく、設計用衝突荷重に包絡されることを確認。

5.4 船舶の衝突解析による荷重の確認

- ▶ 船舶の衝突形態の検討において実施した衝突解析では、500kN程度の衝突荷重であり、最大でも約670kNであった。そのため、この荷重と他の衝突荷重や設計用衝突荷重の関係、さらには、船尾から衝突した際の機関部の影響について検討した。
- ▶ その結果、いずれの荷重も設計用衝突荷重の設定に十分な保守性があることを確認した。

土木学会(1994)から軸剛性を設定してFEMA(2012)により算定した荷重との比較

- ✓ 土木学会(1994)から軸剛性を設定してFEMA(2012)により算定した荷重は1245kNであり、衝突解析から得られた最大荷重670kNはその半分程度であることを確認した。
- ✓ 衝突解析の結果から、実際には動的に作用する衝突荷重を静的に作用させて強度評価を行っているため、保守的な荷重設定となっていることを確認した。
- ✓ なお、FEMA(2019)では付加質量の効果は無視できるとされているが、FEMA(2012)では最大で質量の2倍(荷重に対して $\sqrt{2}$ 倍)を考慮されていることを踏まえ、念のため、最大荷重670kNを $\sqrt{2}$ 倍した場合の影響を検討したが、右の図のとおり他の衝突荷重よりも小さいことを確認した。

FEMA(2012)により算定した船舶の荷重

$$F = 1.3 \times v \times \sqrt{k \times m \times (1 + C)}$$

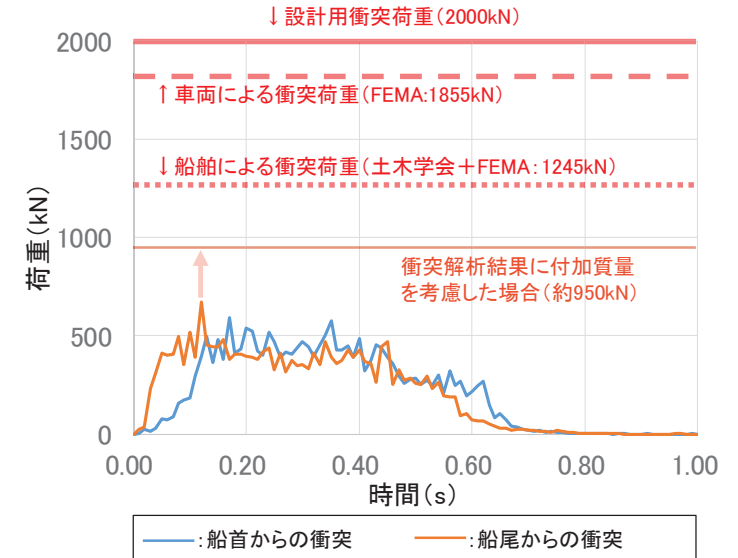
F: 衝突力 (=1245kN)

m: 質量 (=15000kg)

v: 最大流速 (=13m/s)

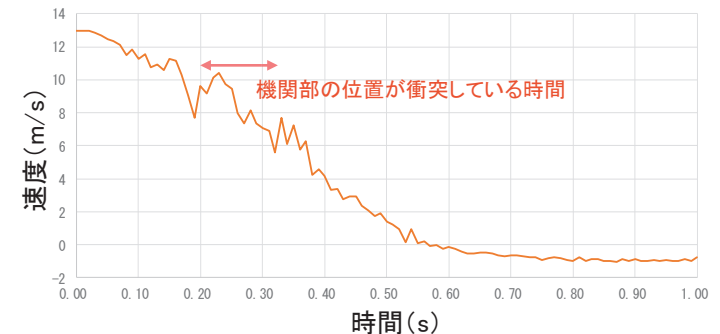
C: 付加質量係数 (=1)

k: 有効軸剛性 (=1.81 × 10⁹N/m)



船尾から衝突した場合の機関部の影響について

- ✓ 船尾から衝突した場合に、船体の破壊が進展して機関部(エンジン等)まで衝突する可能性がある。そのため、機関部の衝突影響について検討した。
- ✓ 「海技研報告」の総トン数14tの船舶の機関艙装は3.7tであることから、評価対象である総トン数5tに案分して1.33tと考え、機関部がすべて剛性の高い鋼材で構成されていると仮定すると、機関部の衝突は車両の衝突に置き換えることが可能である。
- ✓ 車両の衝突荷重に関しては、2.15tの車両をFEMAにより評価(1855kN)しており、機関部の質量はこの質量以下であること、機関部の衝突速度は13m/sよりも低いことから、車両の衝突荷重に包絡される。

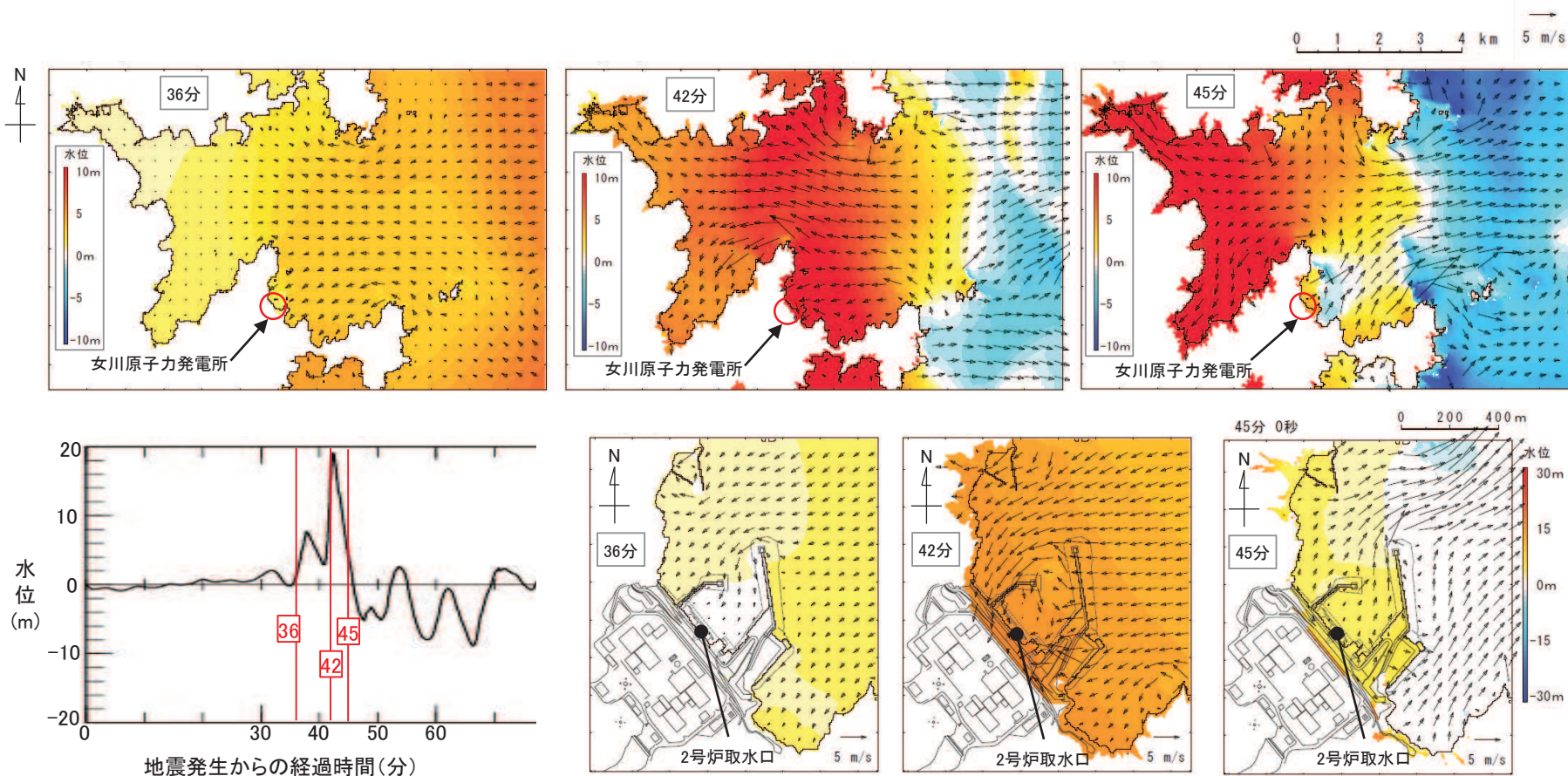


【参考資料】

- 参考1 津波に関するサイト特性【基準津波の水位, 流向・流速の把握】
- 参考2 漂流物の初期配置
- 参考3 衝突解析を用いた衝突形態の検討
- 参考4 船舶の衝突荷重に関する保守性の確認
- 参考5 滑動により衝突する漂流物の衝突荷重算定方法

【基準津波の流向・流速の把握(1/2)】

- ✓ 基準津波は，真東から襲来して女川湾へと伝播する。女川原子力発電所では地震発生約36分後に敷地前面に津波が到達する。
- ✓ 発電所港湾内へは港湾口より進入し，約6分後(地震発生約42分後)に水位がおおむね最大となり，5m/s以上の流速が確認される。さらに，その約3分後(地震発生約45分後)に引き波に転ずる。



基準津波による2号機取水口前面での水位

図 発電所周辺海域の水位・流向ベクトル(基準津波)

【基準津波の流向・流速の把握(2/2)】

- ✓ 地震発生約50分後には，女川湾全体で引き波に転じ，それ以降は津波襲来時と逆方向の沖合へ向かう流向が卓越している。その一部では，大貝崎の影響(回折)により，女川原子力発電所に向かう流れも確認されるが，沖合へ向かう流速に比べて小さい。

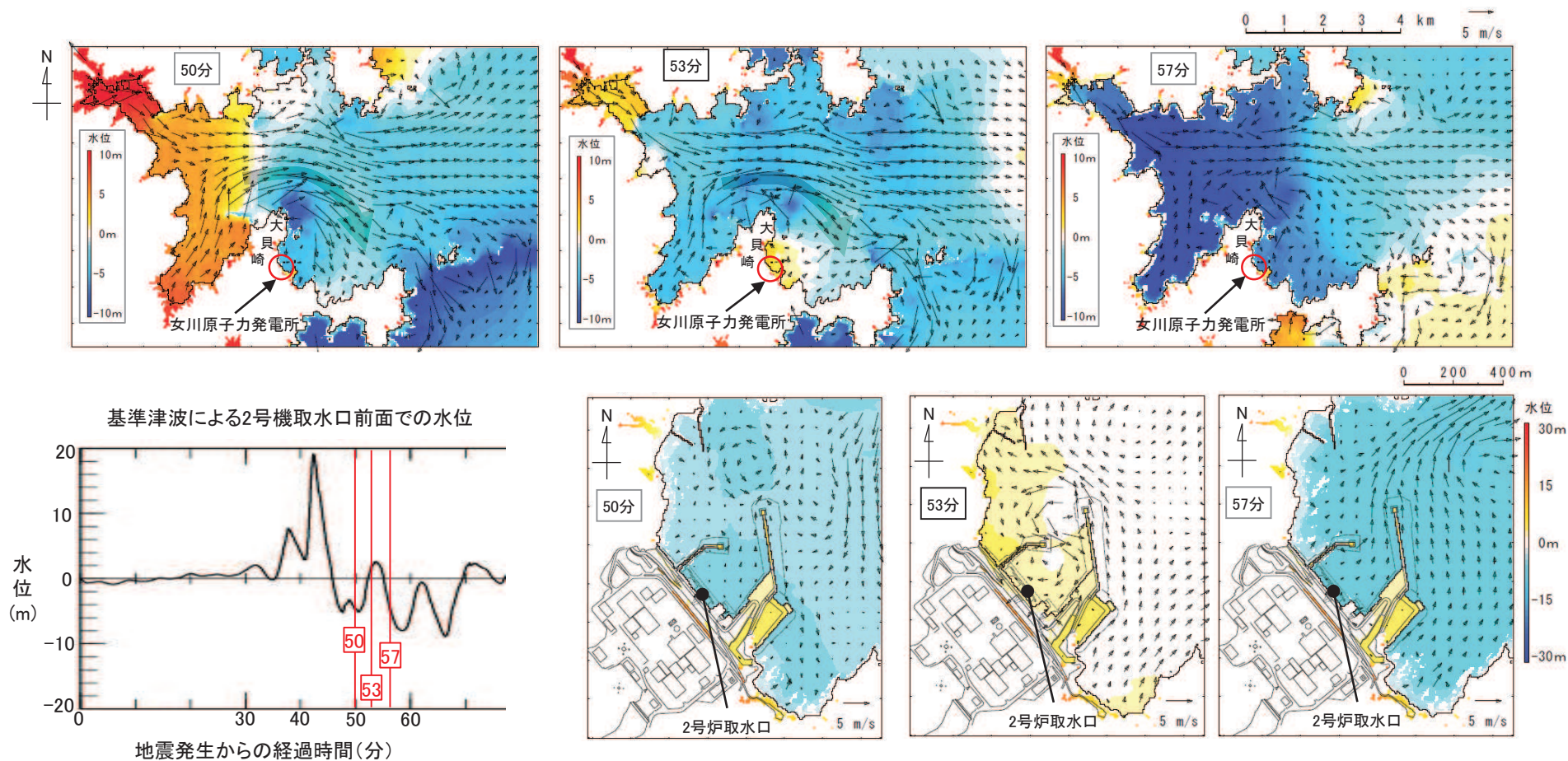
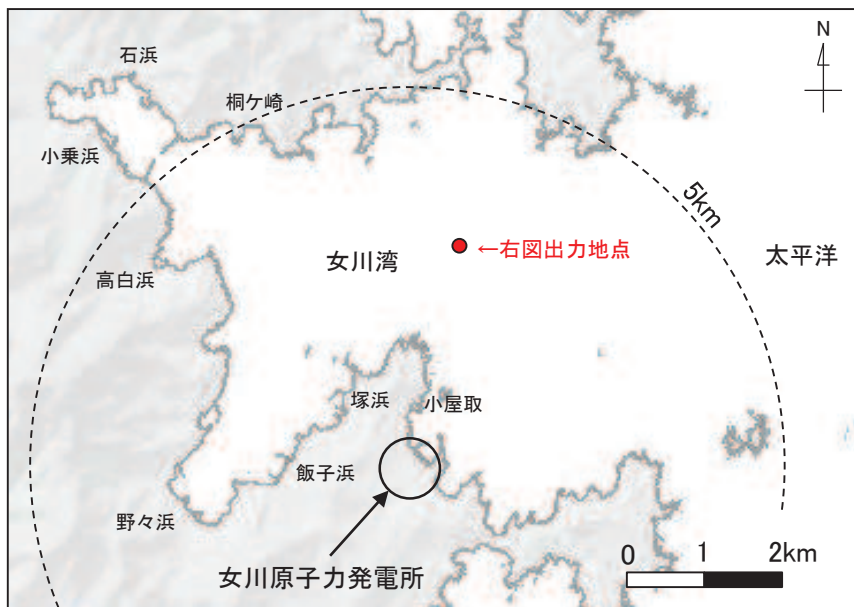


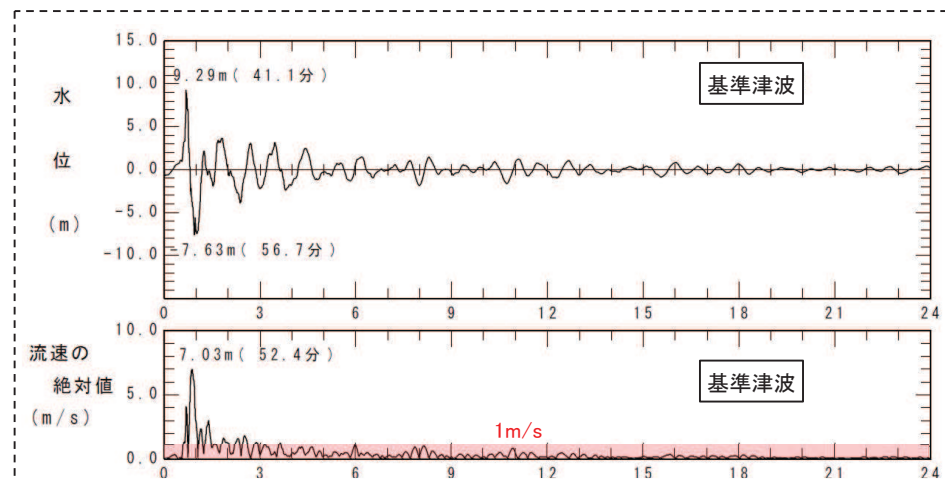
図 発電所周辺海域の水位・流向ベクトル(基準津波)

【基準津波の流向・流速の把握(軌跡解析)(1/2)】

- ✓ 女川湾の海岸線付近に位置する施設・設備が漂流することを想定し，その際の特徴を確認するため，女川湾内に位置する漁港等からの軌跡解析(平面二次元解析により求まる流向・流速から水粒子の動きを把握する方法)を行った。
- ✓ 女川湾の中央付近の絶対流速から，地震発生から12時間後では流速が小さくなっており，さらに12時間後(地震発生から24時間後)では流速がほとんどない状況であることを確認した。そのため，軌跡解析の計算時間は地震発生後24時間とした。

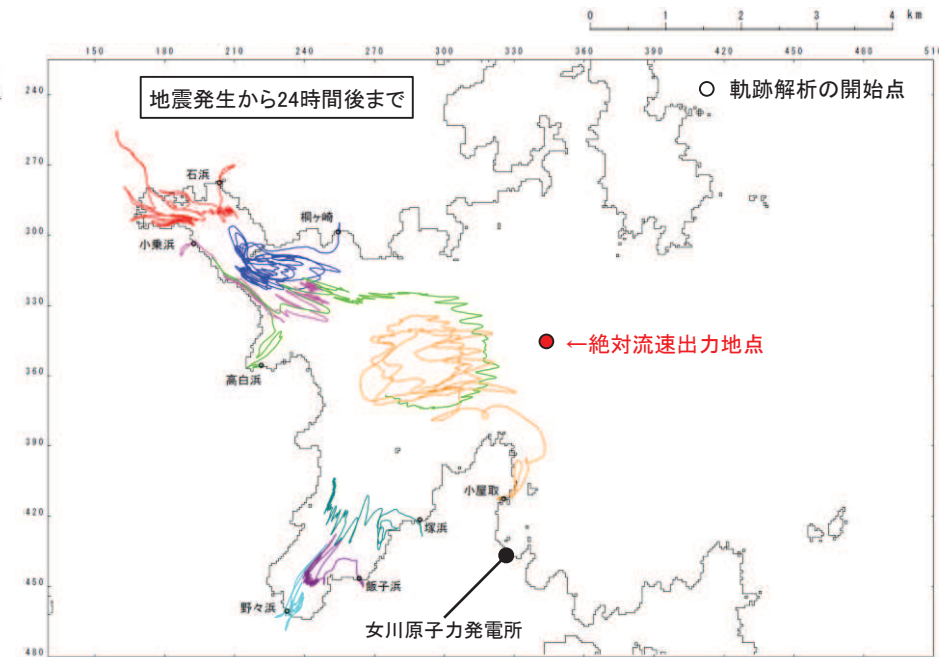
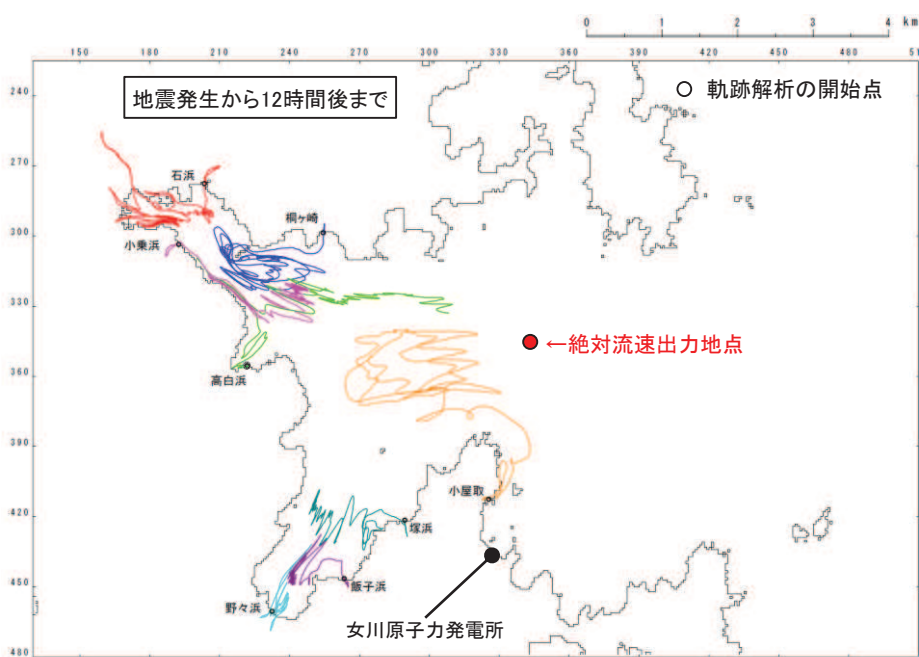
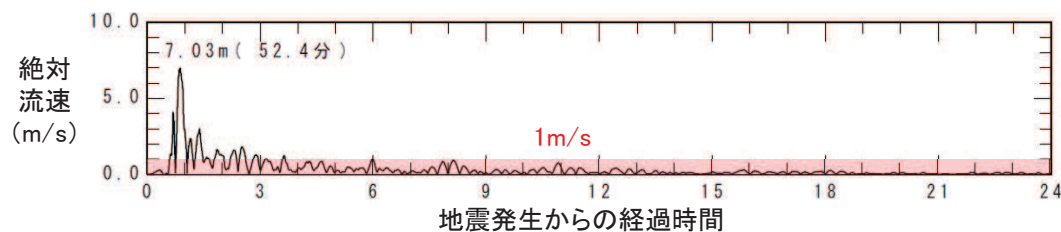


【水位及び流速の絶対値の出力点位置】



【基準津波の流向・流速の把握(軌跡解析)(2/2)】

- ✓ 基準津波による軌跡解析の結果, 女川湾の湾口部に位置する小屋取の軌跡は, 津波の第一波が北東から襲来し, 引き波時にはその逆方向に流れる特徴を反映した移動傾向があり, その後は女川湾内を漂う特徴を確認した。一方, 女川湾の奥側では, 第一波の寄せ波で陸側に移動し, 湾奥の手前(高白浜や桐ヶ崎等)では, 引き波で海域に移動し, その後女川湾内を漂う特徴を確認した。

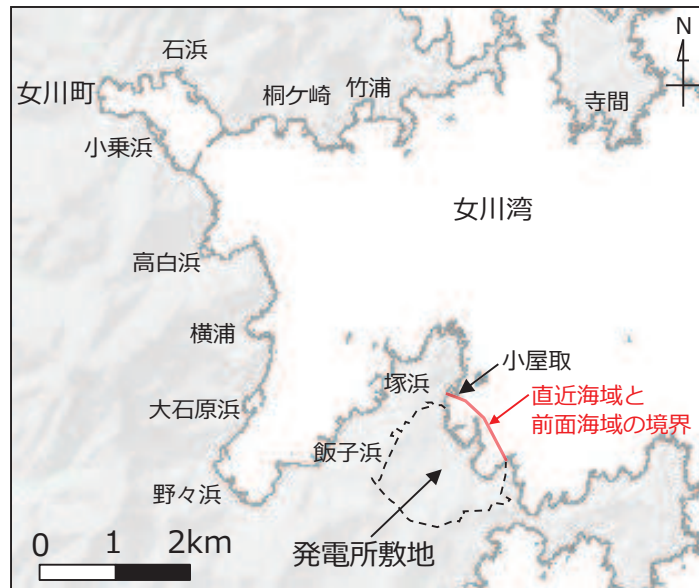


軌跡解析結果(基準津波)

【参考2】漂流物の初期配置(1/11)

【小屋取地区の陸域及び小屋取地区以外からの漂流物】

- 基準津波の特徴として、太平洋側から襲来して、女川湾内を東から西に向かって流れていく。また、発電所は女川湾の湾口部に位置していることから、発電所に津波第一波が到達した時刻では発電所よりも西側には到達していない。また、発電所よりも東側には女川湾の対岸に寺間地区があるが、発電所から4km以上離れており、その周辺では東西方向の流れが卓越している。
- この特徴から、発電所の前面に位置する小屋取地区の海域からの漂流物(小型漁船(FRP)及びがれき)以外の漂流物は、女川湾内をゆっくりと漂流し、発電所には到達する可能性は非常に低い。
- ここでは、各漂流物の特徴及び流向・流速の観点から検討を行った(次頁以降に示す)。

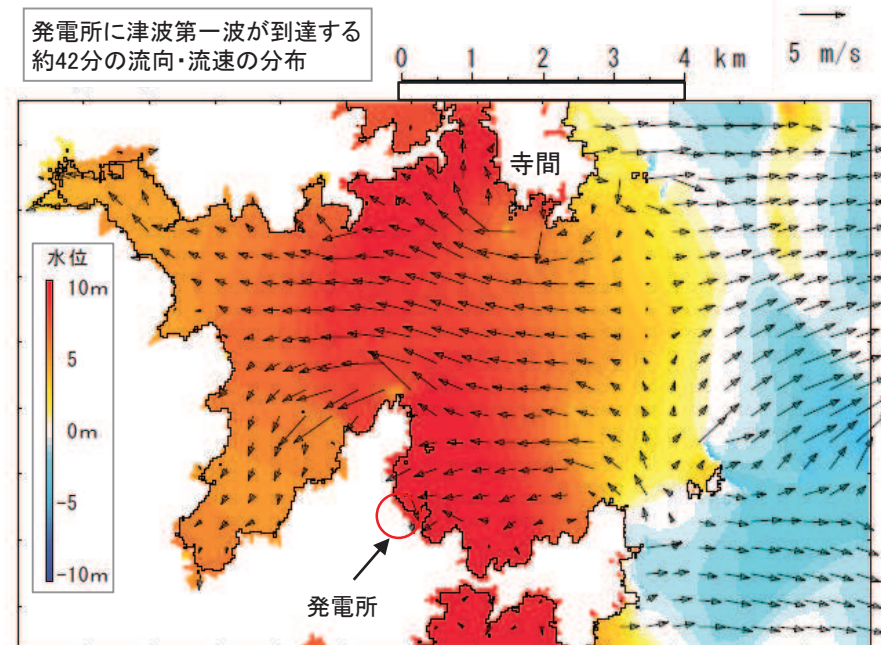


女川原子力発電所周辺

敷地外からの漂流物

範囲		漂流物	重量	
敷地外	小屋取地区	海域	小型漁船(FRP) 総トン数: 5t	
		陸域	がれき 車両	
	小屋取地区以外	海域	がれき 漁船(FRP) 総トン数: 19t	
		陸域	がれき	—
			車両	—
			コンテナ・ユニットハウス タンク(小乗浜のみ)	約30t 22t以下

発電所に津波第一波が到達する
約42分の流向・流速の分布

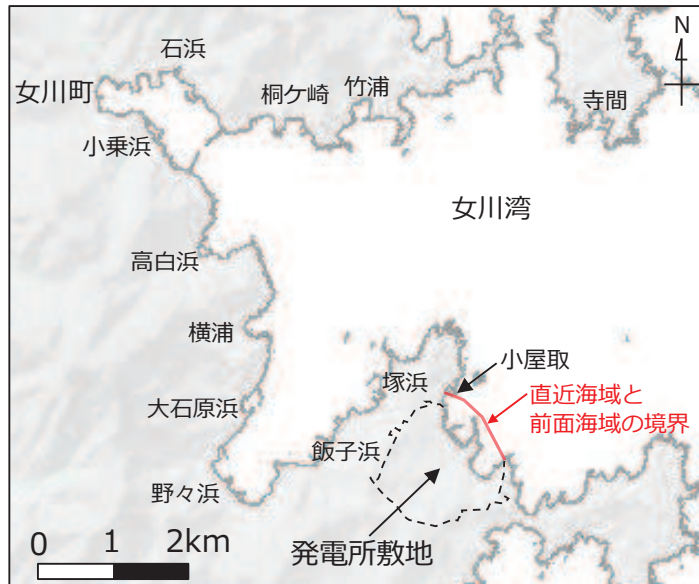


【参考2】漂流物の初期配置(2/11)

- 小屋取地区及び小屋取地区以外の陸域からの漂流物は「直近海域」には該当せず、「前面海域」からの漂流物として選定される。
- これらの漂流物は以下の特徴がある。

【小屋取地区及び小屋取地区以外の陸域からの漂流物】

- ✓ 敷地外の陸域から漂流してくると考えられる漂流物は、津波第一波の寄せ波によって海から陸への一方的な流れとなっていることから、設置位置よりもさらに陸側の奥へ漂流する。そのため、津波第一波では敷地に到達することはない。
- ✓ これらの漂流物は、その後の引き波により海へ漂流し、流速が遅くなった第二波以降の津波によって時間をかけて発電所に到達する可能性がある。
- ✓ なお、コンテナ・ユニットハウス及びタンクは小屋取地区には設置されておらず、コンテナ・ユニットハウスは小屋取以外のすべての地区で確認されており、タンクは小乗浜地区のみで確認されている。



女川原子力発電所周辺

敷地外からの漂流物

範囲		漂流物	重量	
敷地外	小屋取地区	海域	小型漁船(FRP) がれき	総トン数:5t —
		陸域	がれき 車両	— —
	小屋取地区以外	海域	がれき 漁船(FRP)	— 総トン数:19t
			陸域	がれき 車両 コンテナ・ユニットハウス タンク(小乗浜のみ)

第二波以降の津波によって時間をかけて敷地到達する。

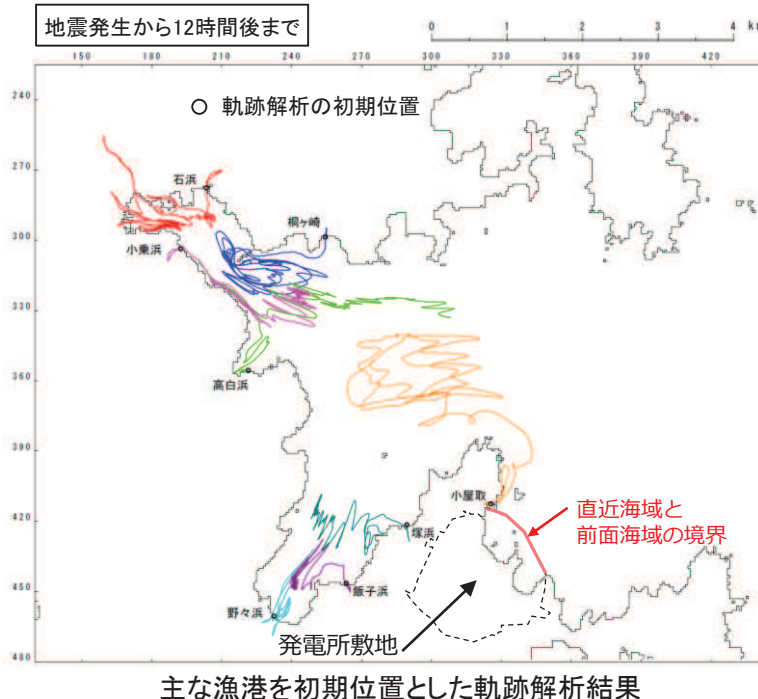
「前面海域」の漂流物に選定

【参考2】漂流物の初期配置(3/11)

- 小屋取地区以外の海域からの漂流物は「直近海域」には該当せず、「前面海域」からの漂流物として選定される。
- これらの漂流物は以下の特徴がある。

【小屋取地区以外の海域からの漂流物】

- ✓ 小屋取地区以外の漂流物については、主として漁船であり、総トン数19t（排水トン数57t）以下の船舶が該当する。
- ✓ これらの漁船は、津波襲来時に、係留している状態、漁をしている状態及び沖合への退避途中の状態が考えられる。
- ✓ まず、係留されている状態で津波が襲来した場合には、陸域からの漂流物と同様に津波第一波で陸側の奥へ漂流してその後の引き波で海域を漂流する。
- ✓ また、主な地区の漁港周辺の流向・流速を確認するため、水粒子の動きを把握する方法として有効な軌跡解析を実施し、各地区周辺での流向・流速の特徴からも、津波第一波で敷地に到達するような傾向は示されていない。



敷地外からの漂流物

範囲		漂流物	重量	
敷地外	小屋取地区	海域	小型漁船(FRP) がれき	総トン数: 5t —
		陸域	がれき 車両	— —
	小屋取地区以外	海域	がれき 漁船(FRP)	— 総トン数: 19t
		陸域	がれき 車両 コンテナ・ユニットハウス タンク(小乗浜のみ)	— — 約30t 22t以下

係留状態では、第二波以降の津波によって時間をかけて敷地到達する。

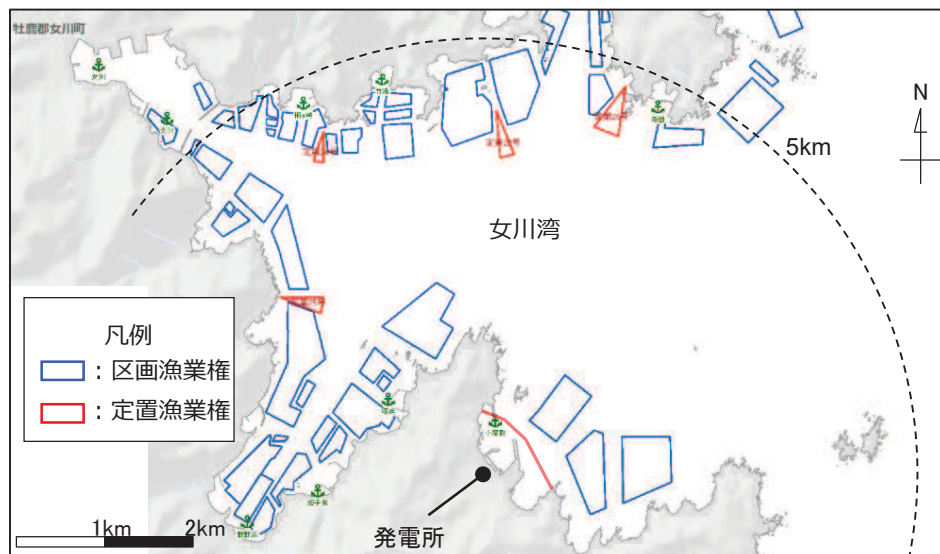
「前面海域」の漂流物に選定

【参考2】漂流物の初期配置(4/11)

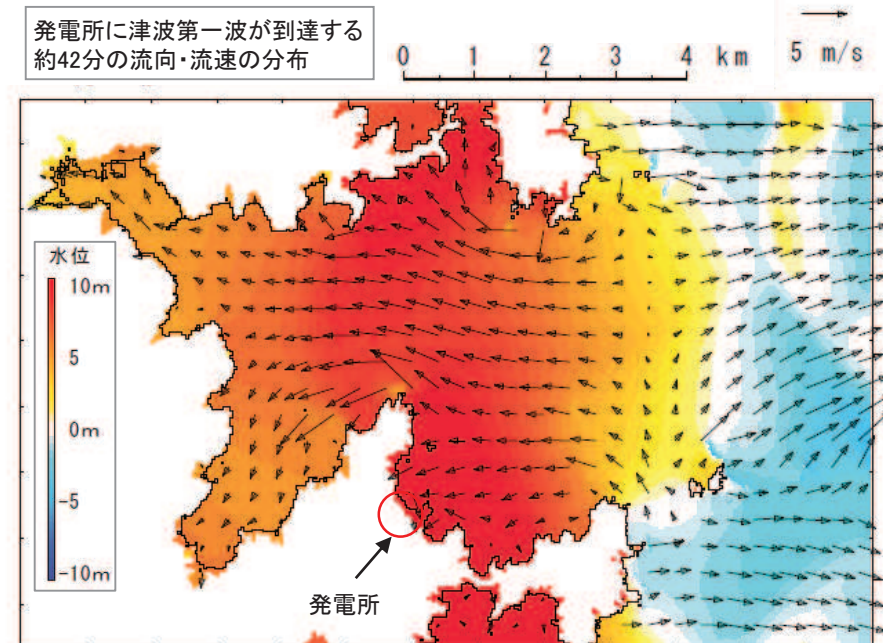
前頁までの検討では、各地区(漁港含む)の陸域及び漁港に係留されている漁船を対象としたものであった。一方、漁船については海域で漁をしている又は航行・退避中であることが考えられるため、これらの状態(前面海域)について整理した。

【前面海域】

- ✓ 小屋取地区以外の漁船は、各地区の漁港前面の区画漁業権・定置漁業権内での養殖、女川湾内での漁及び女川湾よりも太平洋側(敷地より約5km以遠)での漁が考えられる。
- ✓ 女川湾よりも太平洋側で漁を行っている漁船は、敷地から十分な距離があり、敷地には到達しない。
- ✓ 各地区の漁港前面の区画漁業権・定置漁業権内で養殖をしている漁船は、陸域や係留されている漁船と同様に、津波第一波の流れに支配され、陸側又は湾の奥へ漂流し、津波第一波では敷地には到達しない。
- ✓ 女川湾内で漁をしている漁船は、津波第一波の東から西の流れに支配され、西側の湾奥へ漂流するため、津波第一波では敷地には到達しない。
- ✓ ただし、これらの漁船は故障等により航行できなくなった場合、第二波以降の津波によって時間をかけてゆっくりと敷地に到達する可能性がある。

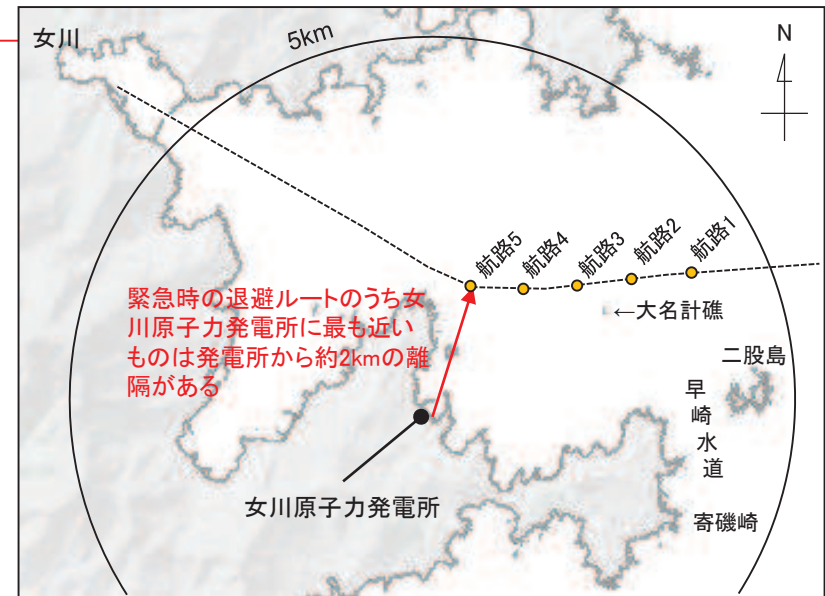


発電所周辺の区画・定置漁業権範囲

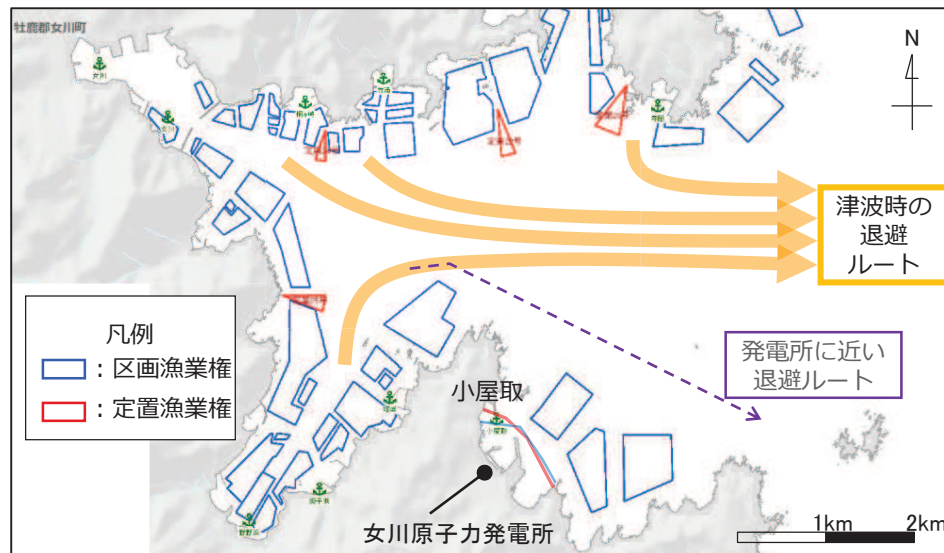


【参考2】漂流物の初期配置(5/11)

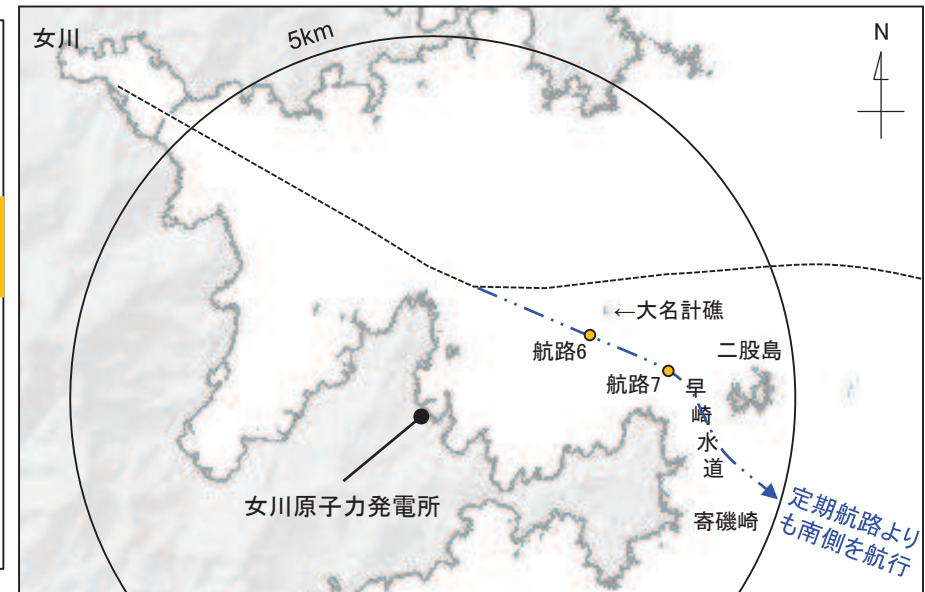
- なお、流向・流速の観点から確認するため、次頁以降で水粒子の動きを把握する方法である軌跡解析を実施した。軌跡解析を行うための初期位置については以下の内容を踏まえ、右上及び右下の図の位置とした。
- ✓ 発電所の前面は小屋取漁港及び発電所の航路となっていること及び区画漁業権があり、発電所が立地する小規模な湾内には小屋取漁港の小型漁船(FRP)よりも大きな漂流物はない。
- ✓ 発電所よりも西側の漂流物は発電所に到達する可能性は低い、西側の漁船が津波警報時に退避する場合、下図のような区画・定置漁業権範囲の漁具を避けたルートを通ると考えられることから、敷地前面付近を退避中に故障により航行不能となることを想定し、右上及び右下の図の位置を開始位置とした軌跡解析を行った。
- その結果、いずれの点においても東西方向を主とした流れが反映されており、津波の第二波以降ではゆっくりと時間をかけて漂流し、発電所に近づくような特徴は確認されなかった。



軌跡解析の水粒子の初期位置(1/2)



各漁港からの退避ルート



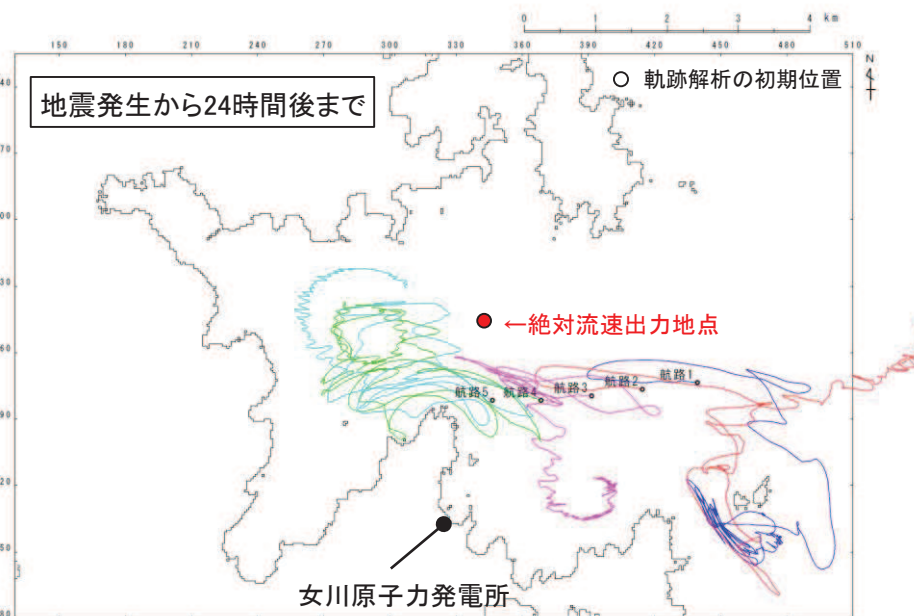
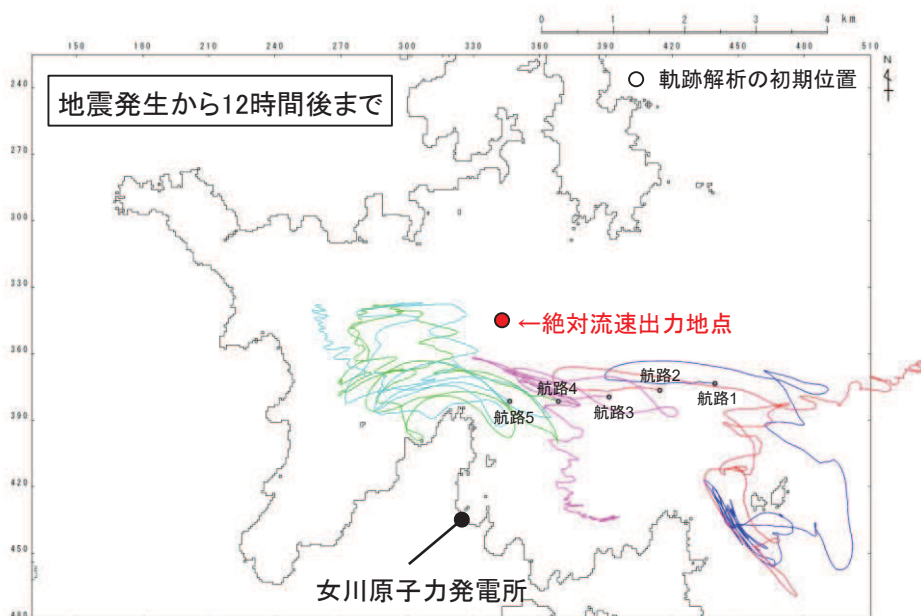
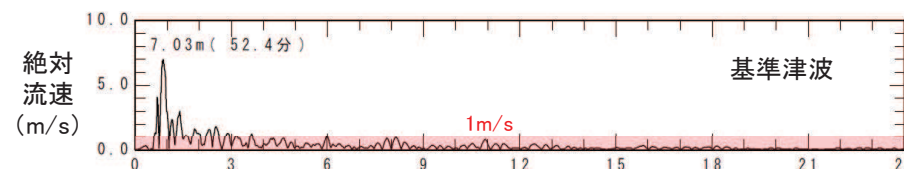
軌跡解析の水粒子の初期位置(2/2)

【参考2】漂流物の初期配置(6/11)

47

第663回審査会合(H30.12.18)
資料3-1-2 p66 一部加筆

- 通常退避ルートに5点(航路1~5)を設定して、軌跡解析を行った。
- その結果、いずれの点でも第一波の寄せ波と引き波でほぼ東西方向に移動し、その後の流速が遅くなった状況において、西側(航路4,5)では大貝崎の影響を受けながら女川湾内をゆっくりと移動し、東側(航路1,2)では早崎水道の影響を受けて沖合へ移動する特徴がある。一方、航路3では、両者の影響をそれほど受けず、発電所前面海域をゆっくりと移動する特徴があることを確認した。
- ルート上の5点がいずれも第一波で東西方向に移動する特徴は、退避ルートが津波の襲来方向と同じであることが要因である。また、その後の流速が遅くなってからは、周辺地形の影響を受けて、おおよそ3パターンの特徴があるが、発電所に漂流するような特徴がないことを確認した。
- 詳細を次頁に示す。

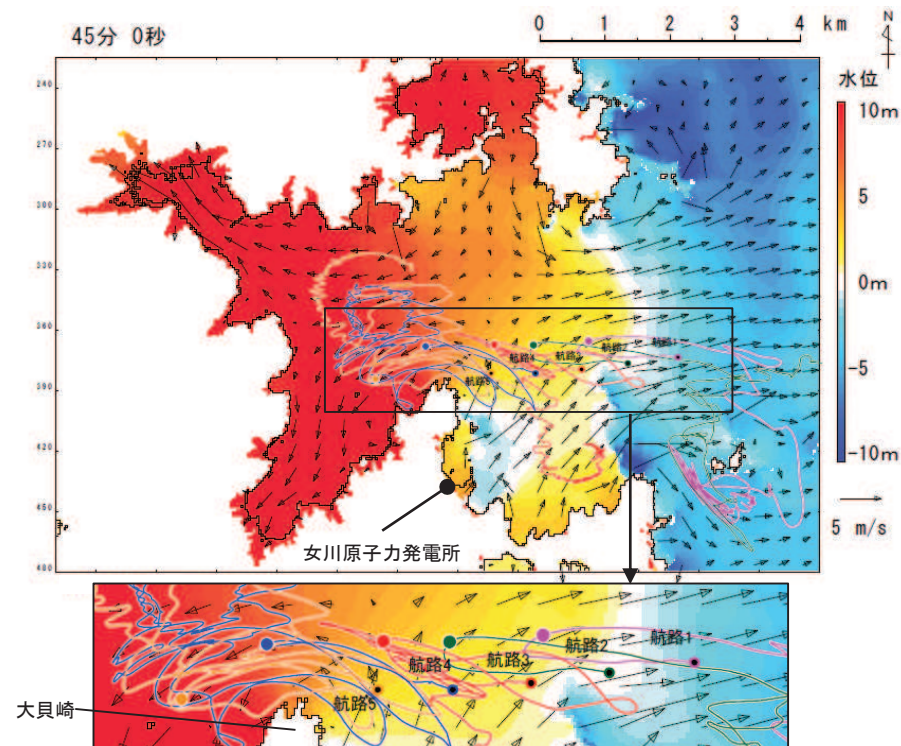
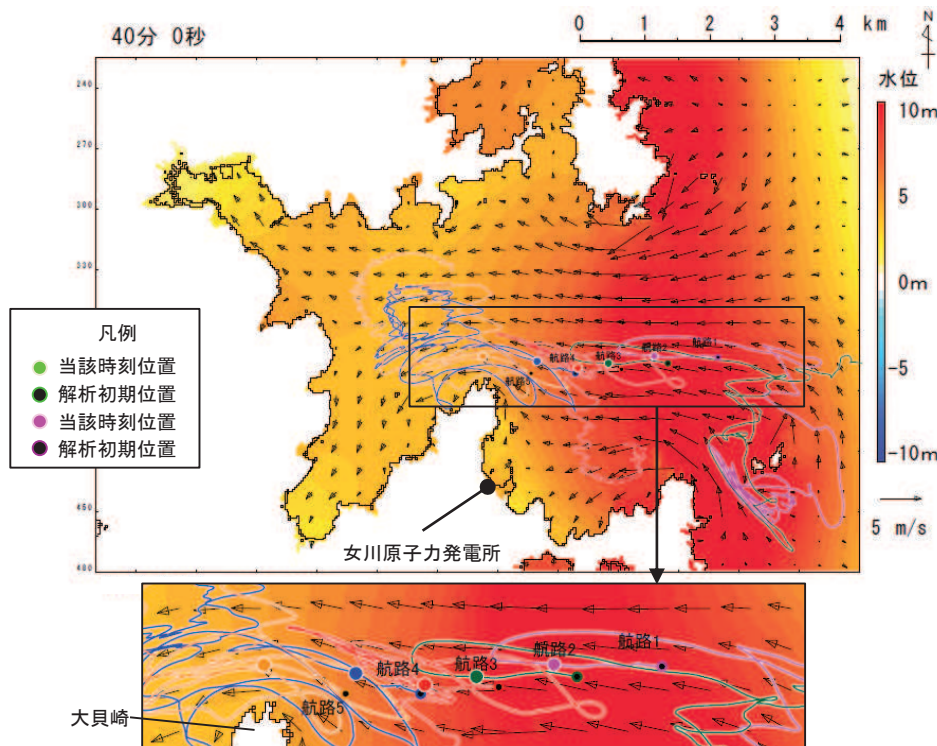


軌跡解析結果

【参考2】漂流物の初期配置(7/11)

- 地震発生から40分後から55分後までの5分おきの軌跡位置とその時刻の流速ベクトル図から解析結果の考察を行った。
- 以下に40分後と45分後の考察を示す。

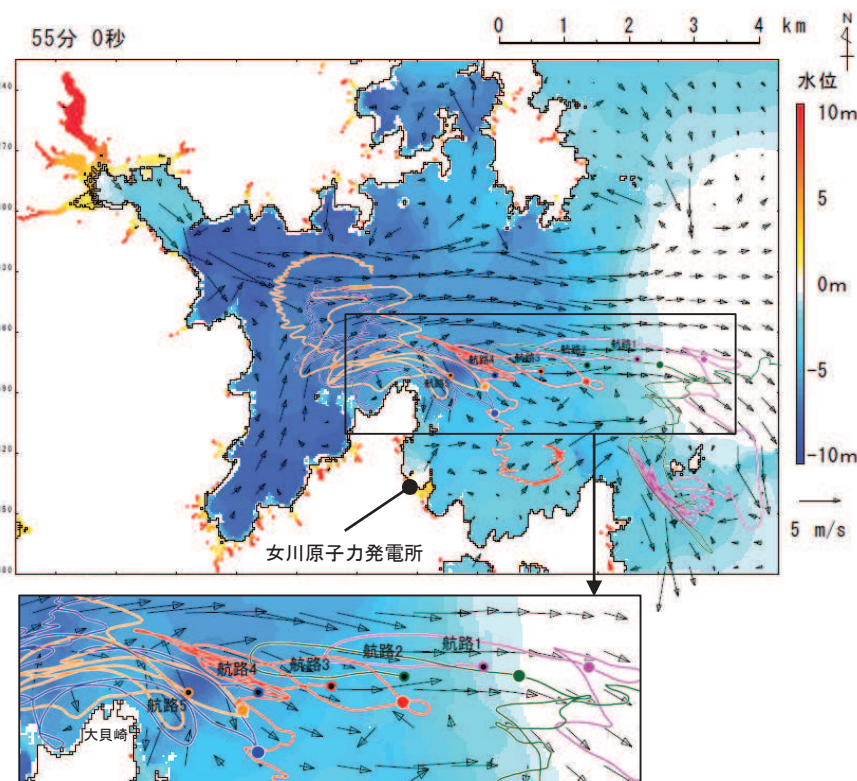
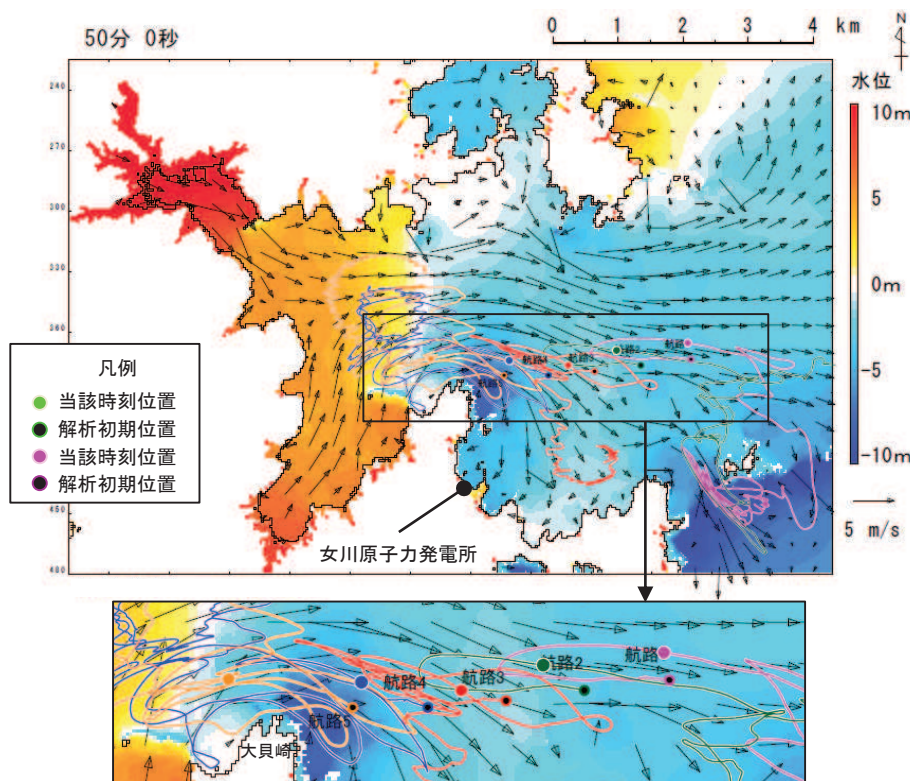
	航路1	航路2	航路3	航路4	航路5
40分後	津波の第一波の影響を受けて、解析開始位置から西側へ移動する。	津波の第一波の影響を受けて、解析開始位置から西側へ移動する。	津波の第一波の影響を受けて、解析開始位置から西側へ移動する。	津波の第一波及び大貝崎の地形の影響を受けて、解析開始位置から西北西側へ移動する。	津波の第一波及び大貝崎の地形の影響を受けて、解析開始位置から西北西側へ移動する。
45分後	女川湾の湾口では寄せ波から引き波に転じており、さらに発電所が立地する地形からの反射波の影響を受けてやや北東側へ移動する。	女川湾の湾口では寄せ波から引き波に転じており、さらに発電所が立地する地形からの反射波の影響を受けてやや北側へ移動する。	津波の第一波及び大貝崎の地形の影響を受けて、西北西側へ移動する。	津波の第一波及び大貝崎の地形の影響を受けて、さらに西北西側へ移動する。	津波の第一波の影響を受けてさらに湾奥へ移動するが、大貝崎の地形により回折の影響を受けて、南側の湾奥方向(西南西方向)へ移動する。



【参考2】漂流物の初期配置(8/11)

- 地震発生から40分後から55分後までの5分おきの軌跡位置とその時刻の流速ベクトル図から解析結果の考察を行った。
- 以下に50分後と55分後の考察を示す。

	航路1	航路2	航路3	航路4	航路5
50分後	引き波の影響を強く受けて東側へ移動する。	引き波の影響を強く受けて東側へ移動する。	大貝崎の地形の影響により東南東方向の引き波を強く受けて東南東側へ移動する。	大貝崎の地形の影響を受けた引き波によって東南東側へ移動する。	南側の湾奥からの引き波の影響を受けて、東北東側へ移動する。
55分後	引き波の影響を強く受けて東側へ移動する。	引き波の影響を強く受けて東側へ移動する。	引き波の影響を強く受けて東側へ移動する。	大貝崎の地形の影響を受けた引き波によって南東側へ移動する。	大貝崎の地形の影響を受けた引き波によって東南東側へ移動する。

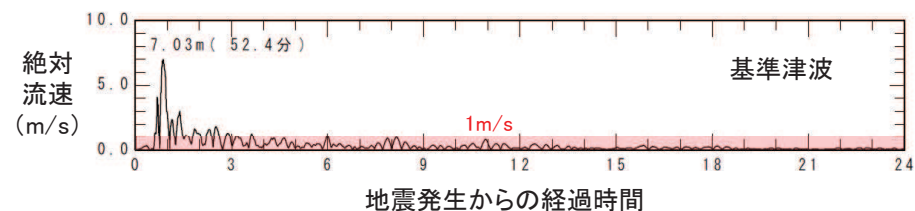
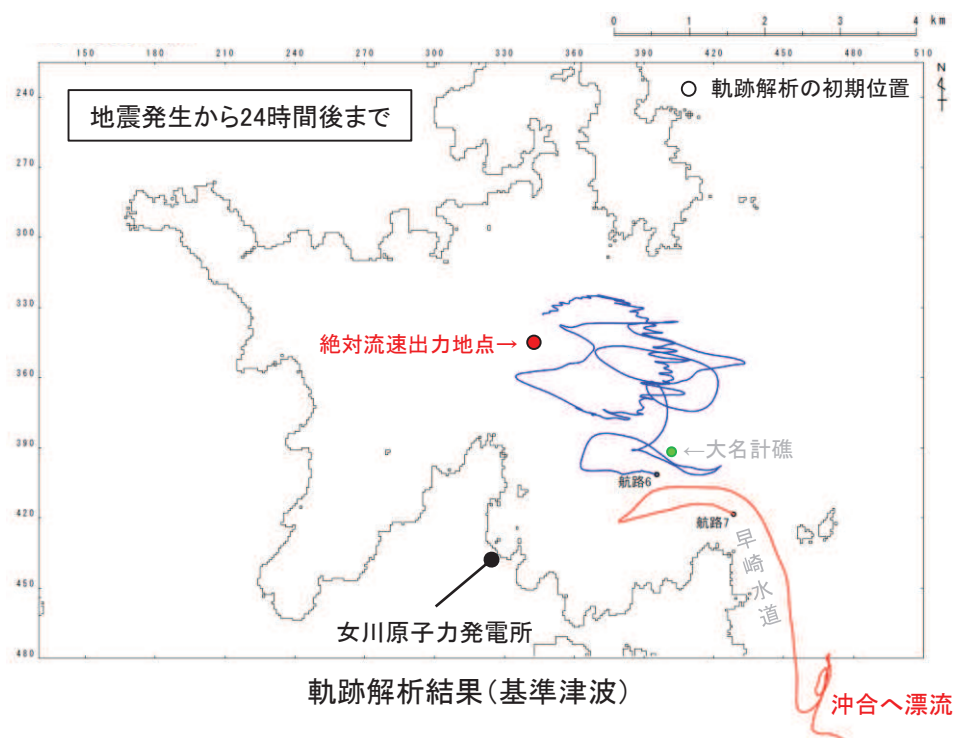


【参考2】漂流物の初期配置(9/11)

50

第663回審査会合 (H31.3.12)
資料1-4 p91 抜粋

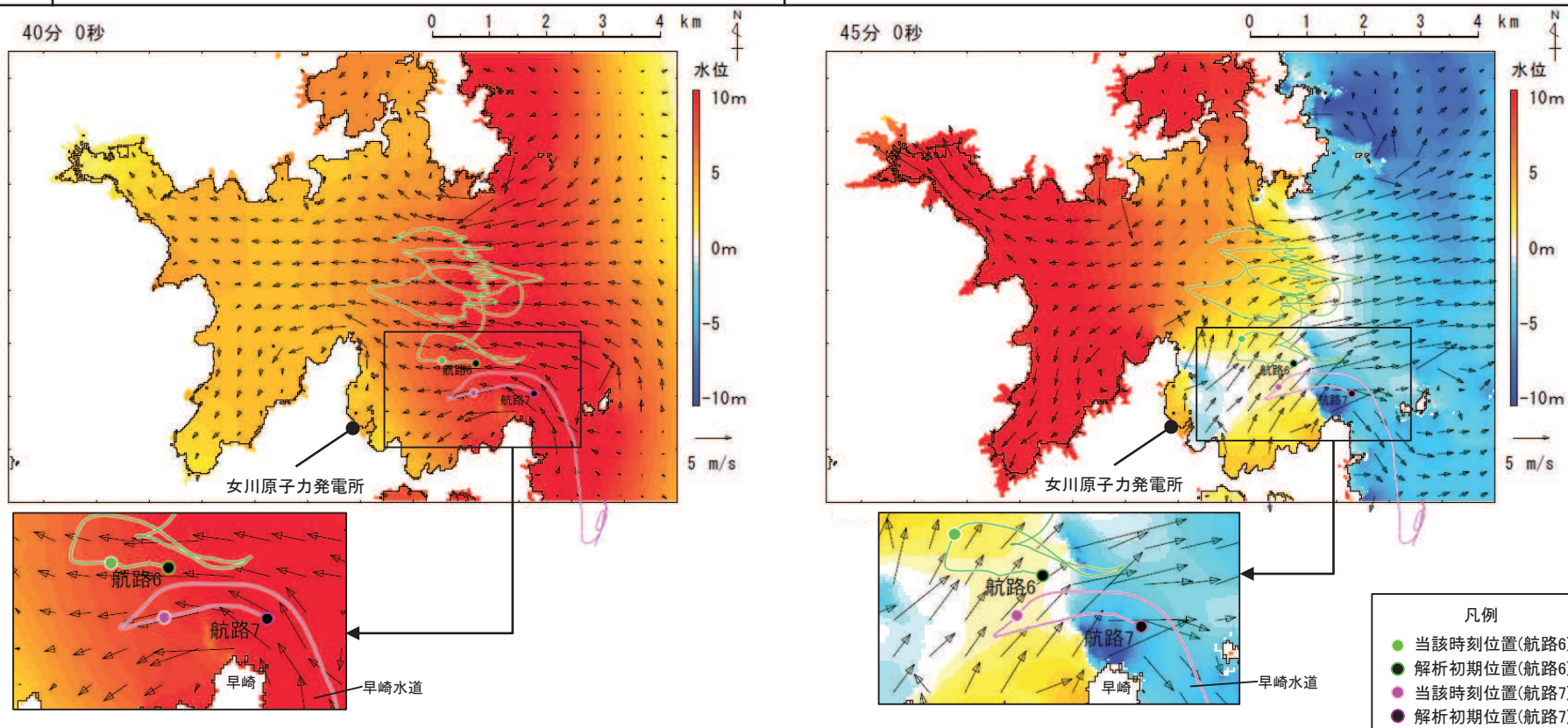
- ✓ 通常退避ルートよりも南側(発電所に近い側)のルートを退避することも想定されるため、そのルート上に2点(航路6,7)を設定して、軌跡解析を行った。
- ✓ その結果、両者ともに前頁の航路1~5と同様に津波の第一波で東西方向に移動する。その後、航路6は周辺地形の影響をあまり受けずに女川湾内を漂い、航路7は早崎水道に近いことからその影響を強く受けて沖合へ移動する特徴を確認した。
- ✓ ただし、発電所に漂流するような流れの特徴は確認されなかった。
- ✓ 詳細を次頁に示す。



【参考2】漂流物の初期配置(10/11)

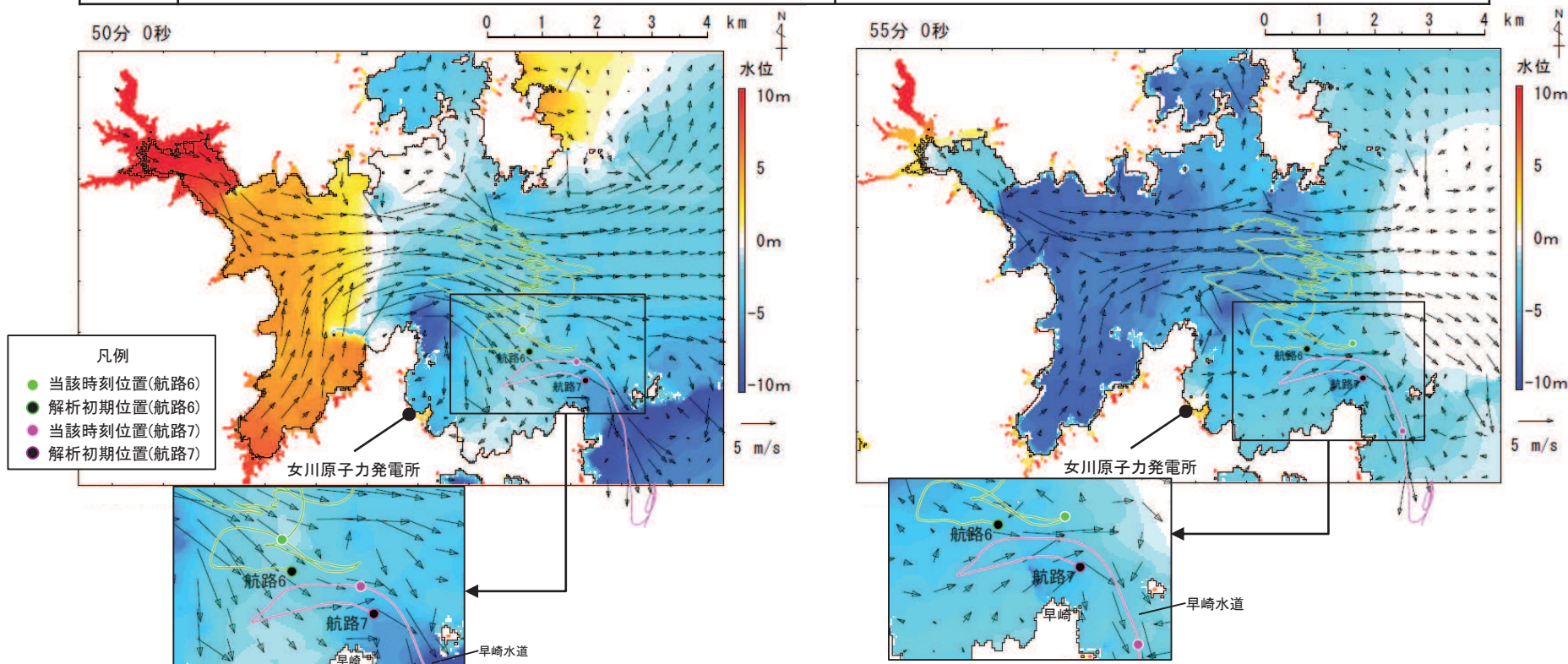
- 地震発生から40分後から55分後までの5分おきの軌跡位置とその時刻の流速ベクトル図から解析結果の考察を行った。
- 以下に40分後と45分後の考察を示す。

	航路6	航路7
40分後	津波の第一波の影響を受けて、解析開始位置から西側へ移動する。	早崎水道から襲来する津波の第一波の影響を受けて真西よりはやや北側に移動する。また、早崎水道を通る流速が速いため、航路6よりも移動距離が長い。
45分後	女川湾の湾口では寄せ波から引き波に転じており、さらに発電所が立地する地形からの反射波の影響を受けて真北よりもやや東側へ移動する。	女川湾の湾口では寄せ波から引き波に転じており、さらに発電所が立地する地形からの反射波の影響を受けて北東側へ移動する。



- 地震発生から40分後から55分後までの5分おきの軌跡位置とその時刻の流速ベクトル図から解析結果の考察を行った。
- 以下に50分後と55分後の考察を示す。

	航路6	航路7
50分後	女川湾全体で引き波に転じており、湾奥からの引き波の影響により、東側へ移動する。	女川湾全体で引き波に転じており、湾奥からの引き波の影響により、東側へ移動する。
55分後	女川湾全体で引き波に転じており、湾奥からの引き波の影響により、東側へ移動する。	引き波が津波来襲時とは逆方向に早崎水道を流れており、その影響を強く受けて、南へ移動する。



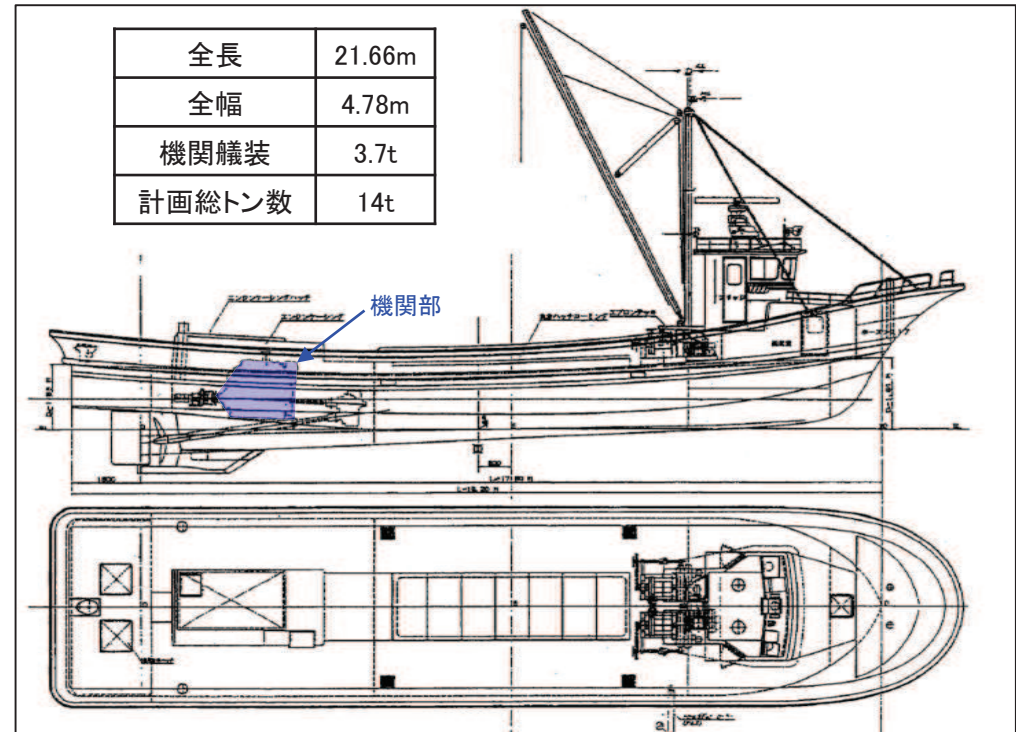
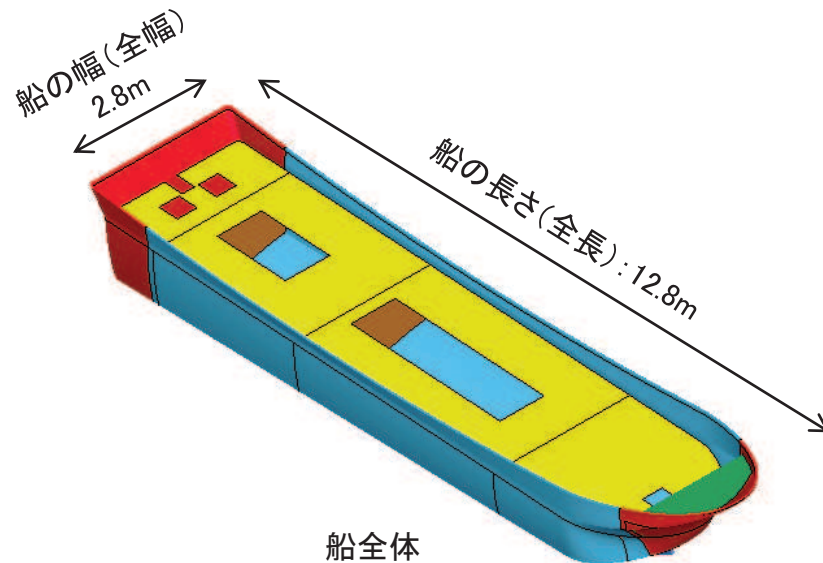
【参考3】衝突解析を用いた衝突形態の検討(1/5)

検討方法

FRP製の船舶を対象に、衝突解析を実施し、船首及び船尾からの衝突荷重を比較することで、衝突形態の妥当性について確認する。

モデル化の方針

- ✓ 漂流物であるFRP製の船舶は、「海技研報告」で示される総トン数14tのFRP船を基に、総トン数5tのFRP船の大きさに案分し、左下図及び次頁のようにシェル要素でモデル化した。
- ✓ 具体的には、船舶の全長の比率(21.66m:12.8m)からその他の寸法を案分した。

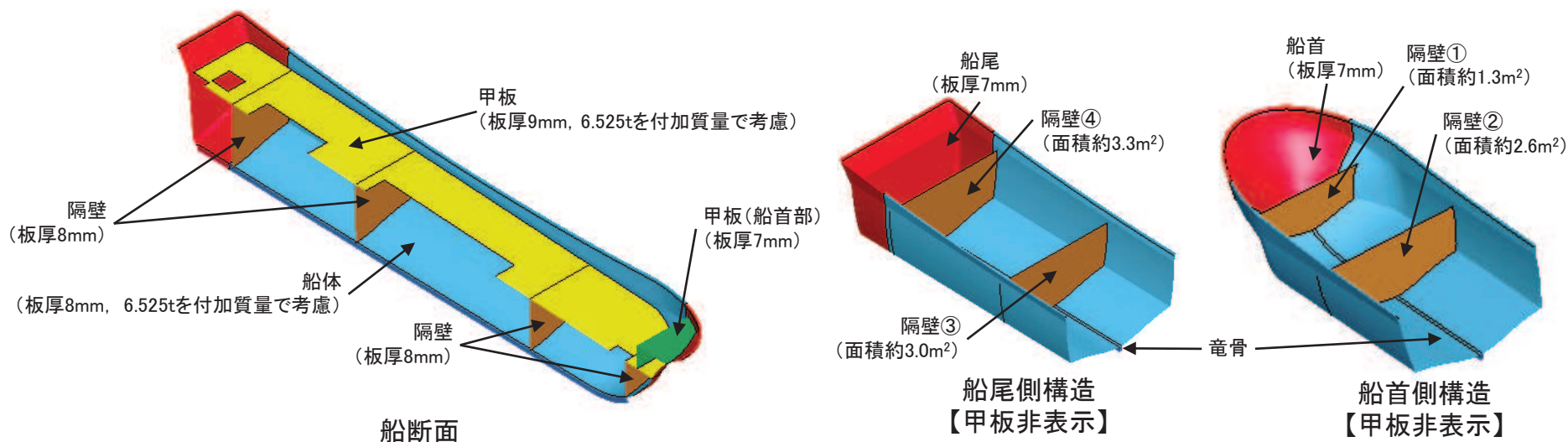


「小型漁船のインベントリ分析に関する研究—A:モデル船の建造・運航状況調査—
(海上技術安全研究所報告 第3巻 第5号(平成15年))」に一部加筆

モデルの詳細

✓ 船舶のモデルの詳細は以下のとおり

船舶の板厚	船首の板厚はp34の条件(5.89mm, 5.22mm)を基に、縦・横肋骨のモデル簡略化の観点から船首部の板厚を厚くすることで考慮し、7mmとする。船尾も同様に7mmとする。 また、「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」では船首及び船尾について中央部の板厚の0.85倍とする記載があることを踏まえ、船首及び船尾以外の船体(隔壁を含む)の板厚は8mmに設定する。なお、甲板は各種艙装及び貨物が載ることを踏まえ9mmとする。
質量	15t【総トン数5t×3=15】 ('漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」より、総トン数の3倍の重量として考慮) 船殻(船首, 船尾, 船体及び甲板)の質量は約1.95tであるため、残りの13.05tを船体及び甲板に付加質量として考慮する。



解析コード

解析コードは「LS-DYNA Ver.971 R6.0.0」を用いる。

材料定数

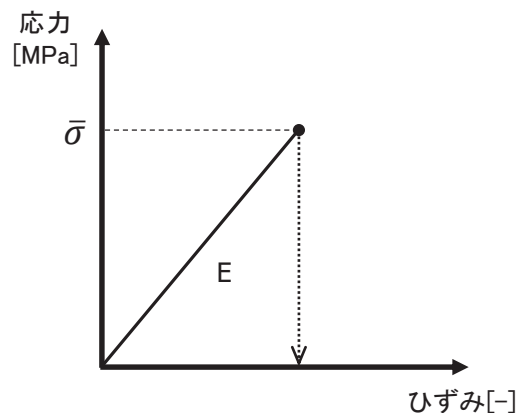
FRP製の船舶に使用する材料定数は、下表のとおり設定する。

ヤング率 E(MPa)	強度 $\bar{\sigma}$ (MPa)	ポアソン比
12000 *1	200 *2	0.4 *1

注記 *1:p33から設定
*2:「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」より設定

材料特性(FRPの応力—ひずみ関係)

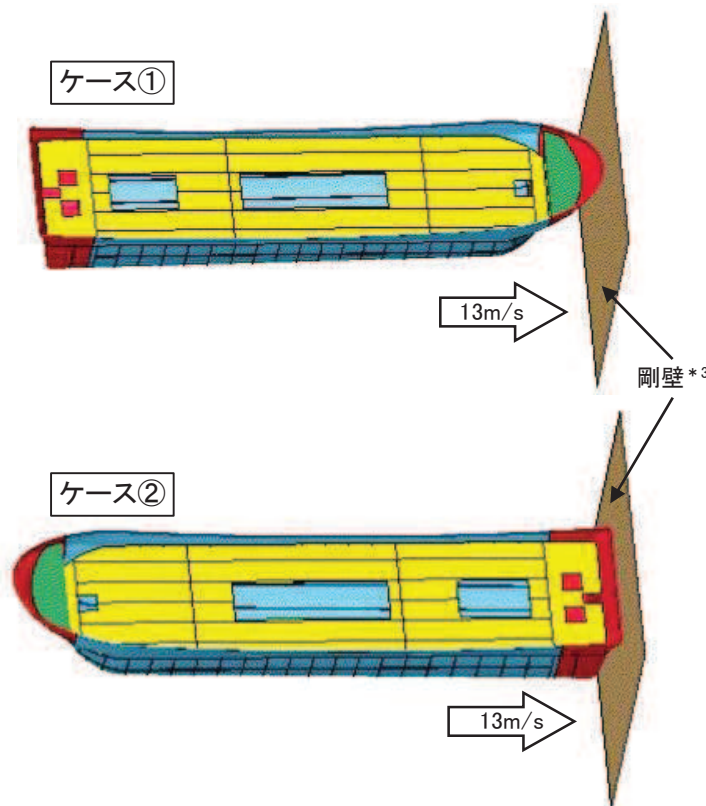
FRPの応力—ひずみ関係を下図に示す。なお、応力が強度 $\bar{\sigma}$ に達するとシェル要素は削除される設定とした。



解析ケース

解析ケースは下表のとおり。

ケース	衝突形態	衝突速度
①	船首方向	13m/s
②	船尾方向	13m/s

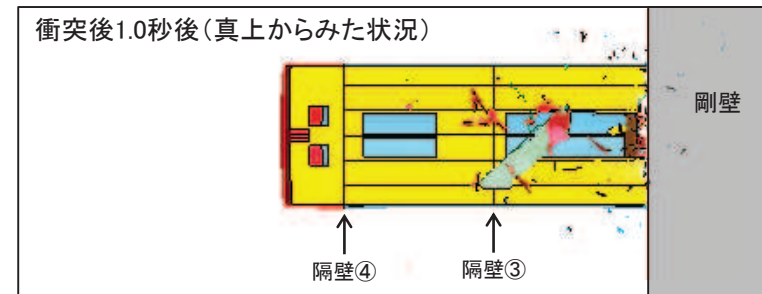
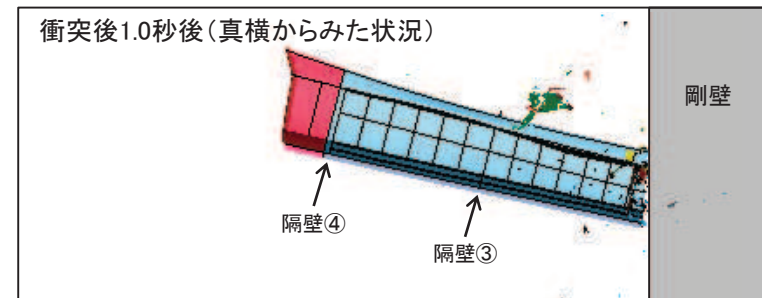
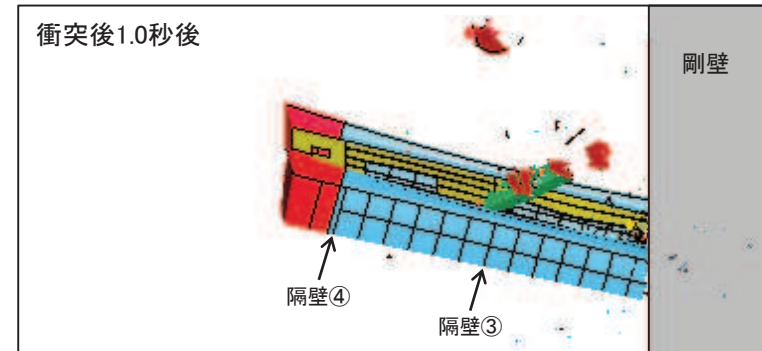
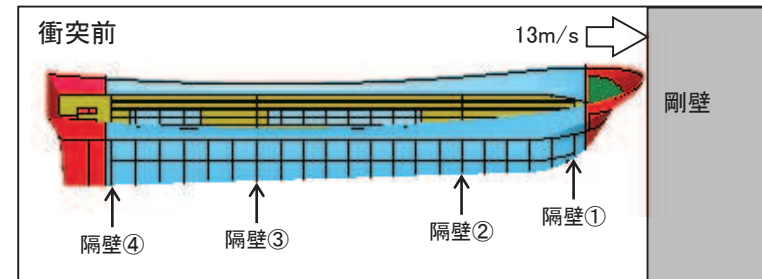
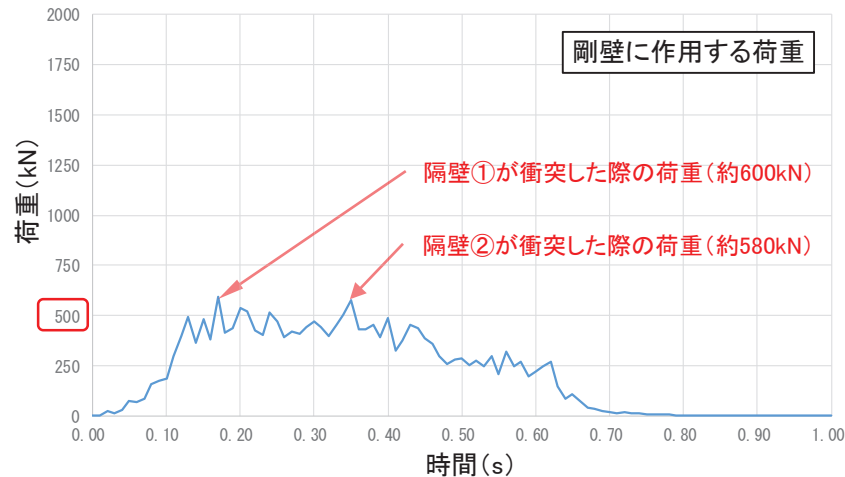
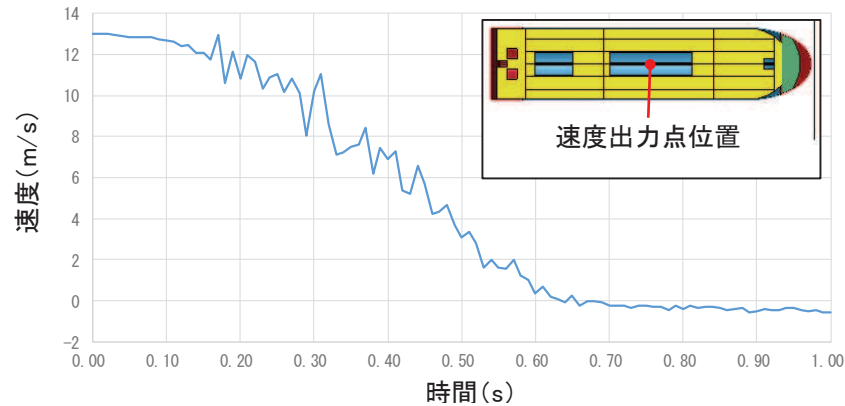


注記 *3: 剛壁は変形・移動しない条件とし、ヤング率200GPa、ポアソン比0.3の鋼製の塊としている。

【参考3】衝突解析を用いた衝突形態の検討(4/5)

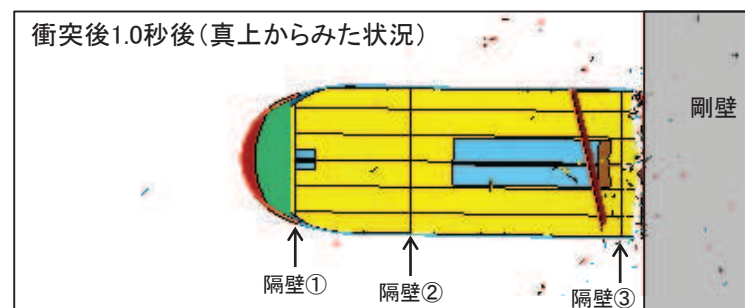
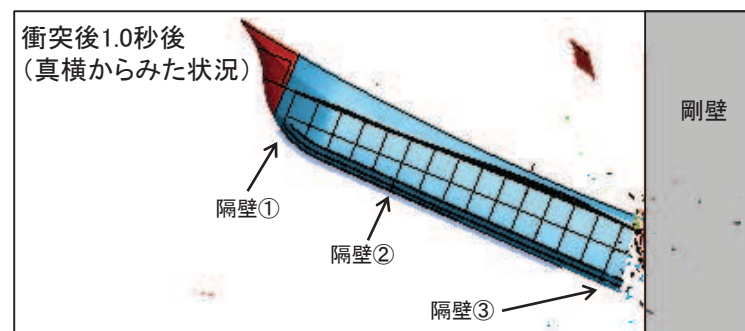
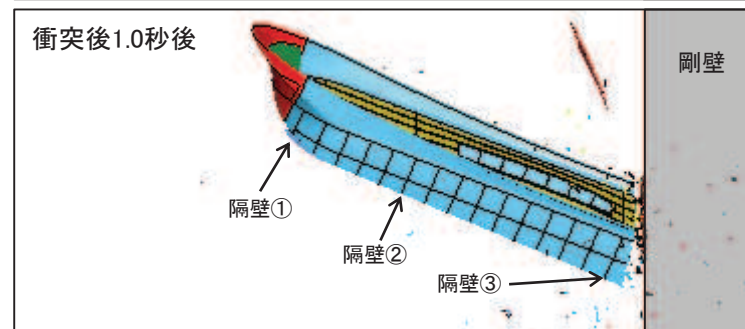
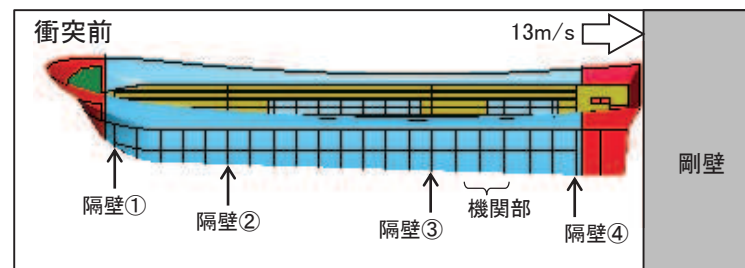
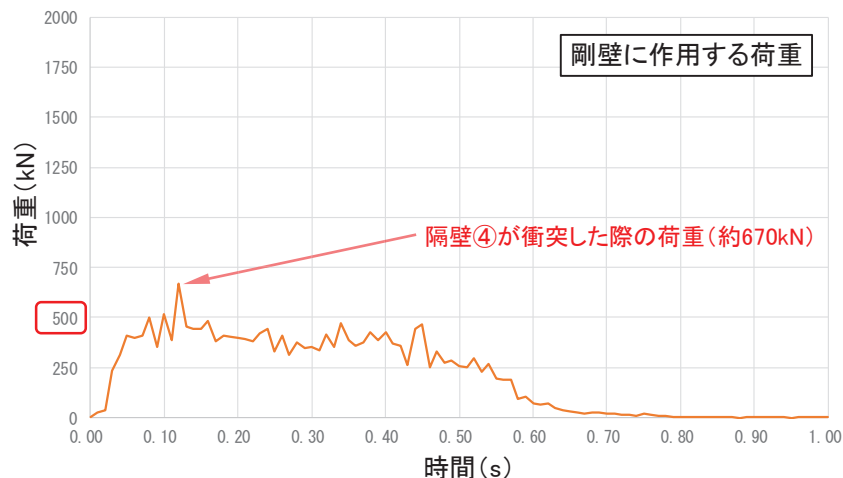
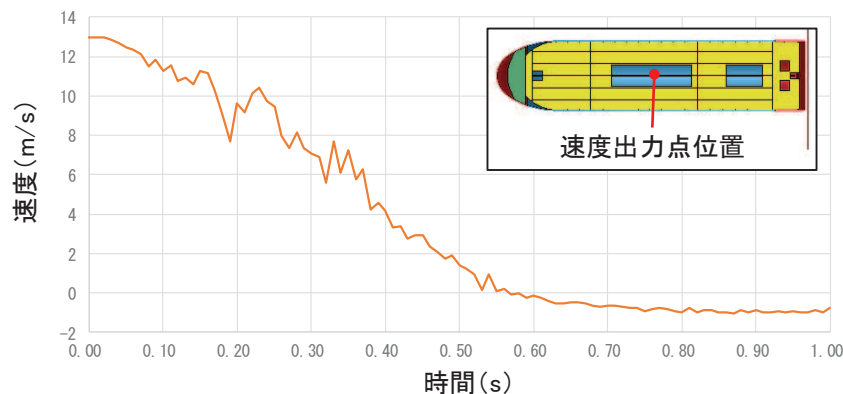
ケース①(船首)の解析結果

- ✓ 船首から衝突する際は、衝突直後から衝突速度が下がり、約0.7秒後には衝突速度がゼロとなる。
- ✓ また、衝突荷重としては、船首から破壊が生じて荷重が大きくなり、約500kNの衝突荷重が作用している。最大荷重としては瞬間的に約600kN(約0.17s)が作用しているが、これは隔壁が衝突した瞬間の荷重であり、約460kN/m²(隔壁の面積約1.3m²)の分布荷重が作用している状況である。



ケース②(船尾)の解析結果

- ✓ 船尾から衝突する際は、衝突直後から衝突速度が下がり、約0.6秒後には衝突速度がゼロとなる。
- ✓ また、衝突荷重としては、衝突直後から荷重が大きくなり、約500kNの衝突荷重が作用している。最大荷重としては瞬間的に約670kN(約0.12s)が作用しているが、これは隔壁が衝突した瞬間の荷重であり、約210kN/m²(隔壁の面積約3.3m²)の分布荷重が作用している状況である。



【参考4】船舶の衝突荷重に関する保守性の確認

- ▶ 船舶の衝突荷重算定は、「土木学会(1994)」を基にした場合の軸剛性 1.81×10^5 N/mを採用し、「FEMA(2012)」により算出したが、船舶の衝突荷重の保守性を確認する観点から、下表のとおり不確かさ及びばらつき要因として考えられる条件を変えることで、その影響について確認した(朱書き部がケースAから変えた条件)。
- ▶ その結果、各条件が衝突荷重に与える影響の程度を確認するとともに、前述で示したケース(A)の設定条件が保守的であり、衝突荷重が最も大きくなることを確認した。

ケース	船舶の構造による不確かさ			材料物性のばらつき		衝突荷重 (kN)	ケースAにおける 保守性の確認
	船舶の長さ (m)	船首傾斜部 の長さ(m)	それ以外の条件 (p34の条件)	ヤング率 (tf/m ²)	ポアソン比		
A (評価ケース)	12.8	0.256	土木学会(1994)から設定	1.22×10^6	0.4	1245	ケースBの1.75倍 ケースCの2.23倍 ケースDの1.34倍 ケースEの1.04倍 ケースFの1.05倍
B	12.8	<u>1.28</u> * ²	<u>強化プラスチック船規則 (日本海事協会, 2018年)</u> から設定	1.22×10^6	0.4	708	—
C	12.8	<u>1.28</u> * ²	土木学会(1994)から設定	1.22×10^6	0.4	556	—
D	12.8	0.256	土木学会(1994)から設定	<u>0.70×10^6</u> * ³	0.4	940	—
E	12.8	0.256	土木学会(1994)から設定	1.22×10^6	<u>0.308</u> * ³	1197	—
F	<u>11.0</u> * ¹	0.256	土木学会(1994)から設定	1.22×10^6	0.4	1177	—

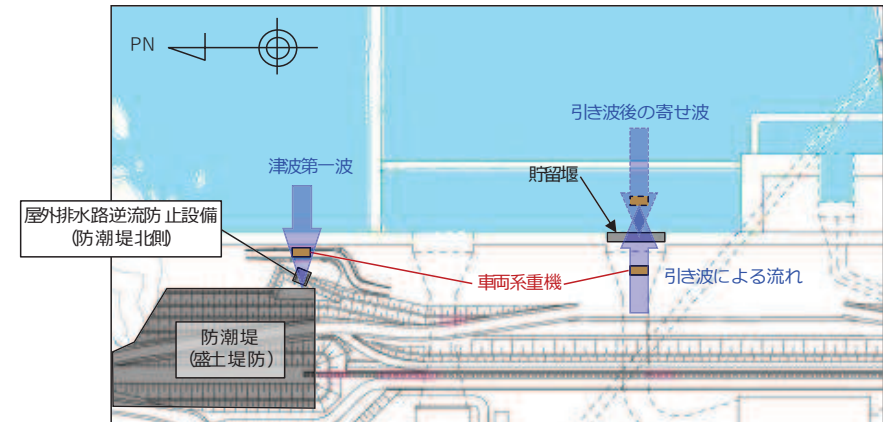
注記 *1:「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」より総トン数5tの船舶の長さ

*2:強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)から算出

*3:p33の最小値

【参考5】滑動により衝突する漂流物の衝突荷重算定方法

- 「直近陸域」からの漂流物のうち滑動して衝突する可能性のある車両系重機等について、右図のように屋外排水路逆流防止設備(防潮堤北側)及び防潮堤(盛土堤防)に津波第一波により衝突するか、その後の引き波と寄せ波により貯留堰に衝突することが想定される。
- 滑動により衝突する漂流物の衝突荷重については、以下の内容から算定した。



- ✓ 地上及び海底を滑動するものの衝突荷重算定式は、比較的少ない。
- ✓ FEMA(2019)によれば、漂流物の衝突に関しては、最新のASCE(2016)に従うように記載されている。
- ✓ ASCE(2016)によれば、流速4m/sの条件下で石材・コンクリート殻(2270kg)が海底を滑動する際の衝突荷重が以下のとおり示されている。重要度係数 I_{tsu} は、津波のリスク分類に応じて1.0~1.25が適用されるため、ここでは $I_{tsu}=1.25$ とする。

$$F_i = 36 \times I_{tsu} = 36 \times 1.25 = 45 \text{ (kN)} \quad \text{ここで、} F_i: \text{設計衝突力, } I_{tsu}: \text{重要度係数}$$

- ✓ 参考としてASCE(2016)の例示に基づき、車両系重機(41.2t)が地上及び海底を滑動した場合の衝突荷重を算定すると、下記のとおりとなり、FEMA(2012)より算定した巡視点検用車両(2.15t)の衝突荷重(1855kN)よりも小さい。

$$F_i = 36 \times 1.25 \times (13/4) \times (41200/2270)^{0.5} = 624 \text{ (kN)} \quad (\text{流速: } 13\text{m/s, 衝突物重量: } 41.2\text{t})$$

- ✓ 車両の有効軸剛性は石材・コンクリート殻が塊として有する剛性に比べて小さいと想定される。したがって、車両の有効軸剛性を精緻に考慮して衝突荷重を算定すると、上記で算定したものより小さくなるものと考えられる。
- ✓ なお、その他滑動状態で衝突する可能性があるものとして、角落し(約7t)やキュービクル類(約8t)が挙げられるが、それらの重量は車両系重機よりも十分に小さいことを確認している。