

本資料の内容は、「補足-140-1【津波への配慮に関する説明書の補足説明資料】」の「4.3 漂流物による衝突荷重について」へ反映予定

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3
提出年月日	2021年5月31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5月31日
東北電力株式会社

前回会合(4/27)における指摘事項

➤ 第970回審査会合において、主要説明項目(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)にて説明した)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」について説明し、以下の指摘があったことから、指摘事項に対する回答内容を説明する。

実施日	指摘事項
令和3年4月27日 第970回審査会合	FRP船舶の軸剛性算定方法に関して、衝突解析の位置付けを踏まえて、その妥当性と設計への適用性を分離して説明すること。特に、軸剛性の算定に用いている知見の適用の考え方や適用範囲を理論的に説明するとともに、設計への適用として、鋼製船舶とFRP船舶の構造形式、材質、船舶の損傷モードの同等性を説明した上で、軸剛性の算定における物性のばらつき、適用する規格基準類、衝突形態の不確かさを整理し、設計に対する余裕を説明すること。



回答の概要	記載箇所
<p>【FRP船舶の軸剛性算定方法に関する妥当性】 衝突時における船舶の破壊に関する整理を行った上で、軸剛性の算定に用いている土木学会(1994)の方法が妥当であることを、以下の内容を踏まえて示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 鋼製船舶とFRP船舶は、形状、構造、材質の力学特性及び損傷モードにおいて類似(同等)性を有する。 ✓ 軸剛性算定に係る船舶の構造条件に用いる文献は適用性がある。 ✓ 軸剛性算定に係る材料物性(材質の条件)に用いる文献は適用性がある。 	<p>「5. 漂流物による衝突荷重の算定(衝突荷重の設定フロー)」及び「5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定」 【p28-37, 参考5】</p>
<p>【土木学会(1994)の方法を用いた軸剛性より算出する衝突荷重の設計への適用性】 以下の内容から土木学会(1994)の方法を用いた軸剛性より算出する衝突荷重は設計への適用性があると判断した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 軸剛性算定に係る船舶の構造条件は、妥当性確認で適用した値とは異なる方法で定め、軸剛性が保守的になる値を採用した。 ✓ 軸剛性算定に係る材料物性(材質の条件)は、不確かさやばらつきを有する条件であることを踏まえ、適用性を確認した文献の最大値を採用した。 ✓ 保守性を考慮したケースで算出した軸剛性は、妥当性を確認したケースの軸剛性よりも3倍以上の値であることを確認した。 	<p>「5. 漂流物による衝突荷重の算定(衝突荷重の設定フロー)」及び「5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定」 【p38-39, 参考6】</p>
<p>【衝突解析の位置付け及び衝突形態による影響の確認】 衝突解析は、衝突形態による影響を確認するために実施するものであることを明確にした。また、真横からの衝突及び斜め方向からの衝突解析結果を追加し、衝突形態による影響は上記の保守性を確認したケースの軸剛性から算出される衝突荷重に包絡されることを確認した。</p>	<p>「5. 漂流物による衝突荷重の算定(衝突荷重の設定フロー)」及び「5. 2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認」 【p40-47, 参考7】</p>

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

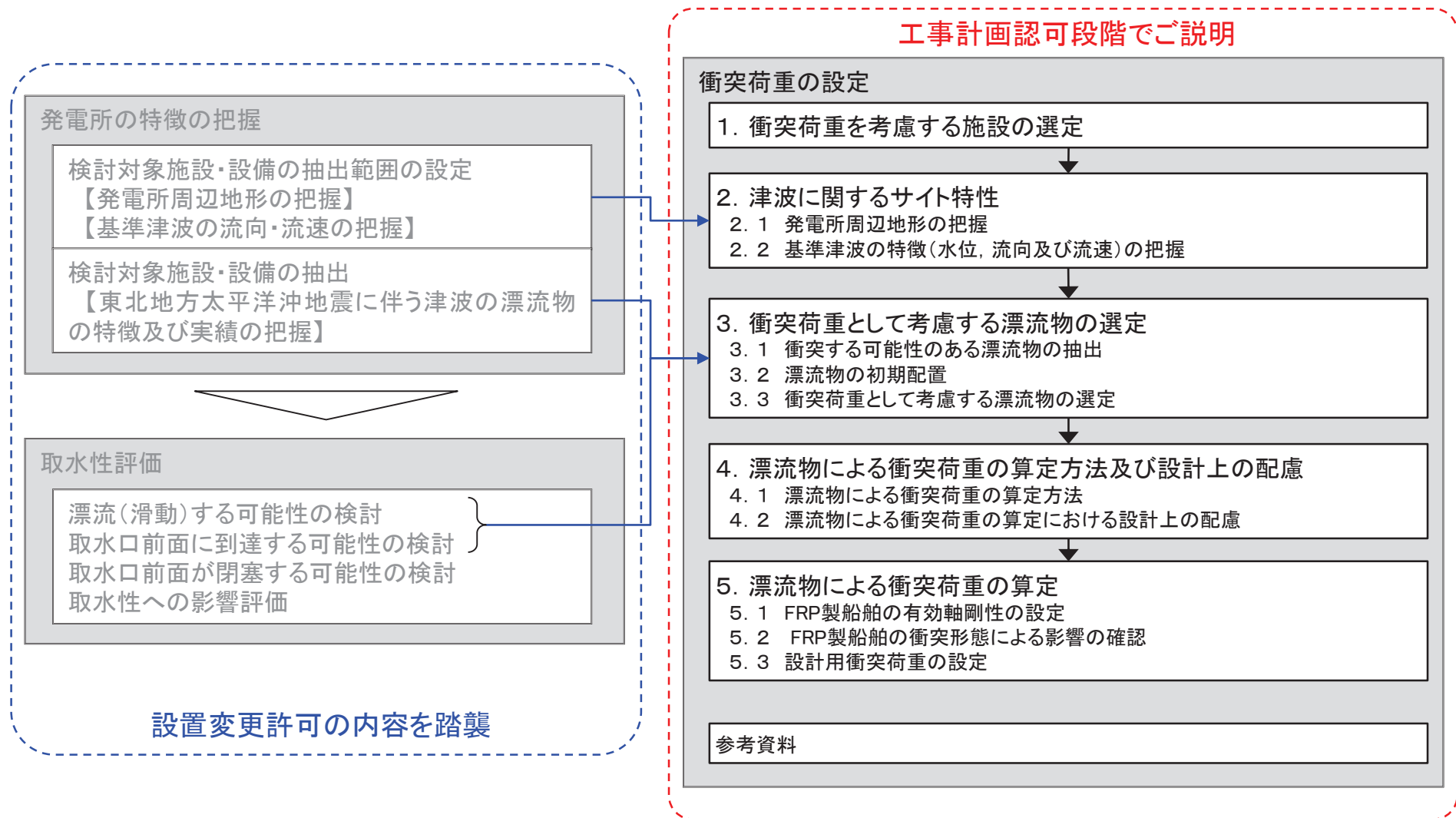
3.7.1 漂流物による波及的影響の検討

【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。

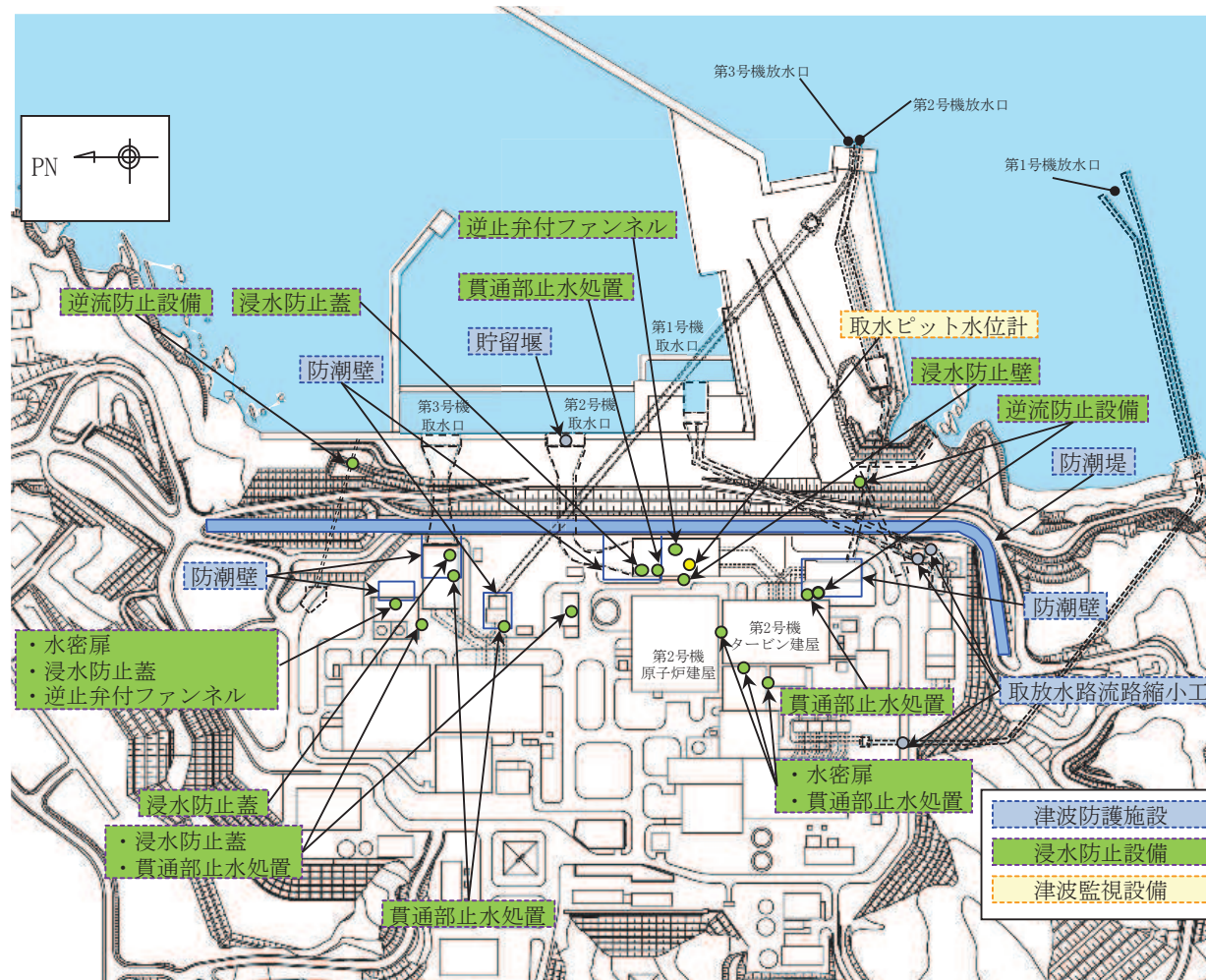
- 漂流物に対する要求事項に対して、工事計画認可では、設置変更許可における「発電所の特徴の把握」及び「取水性評価」を踏襲し、それらを踏まえた衝突評価を行うための衝突荷重を設定する。



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】



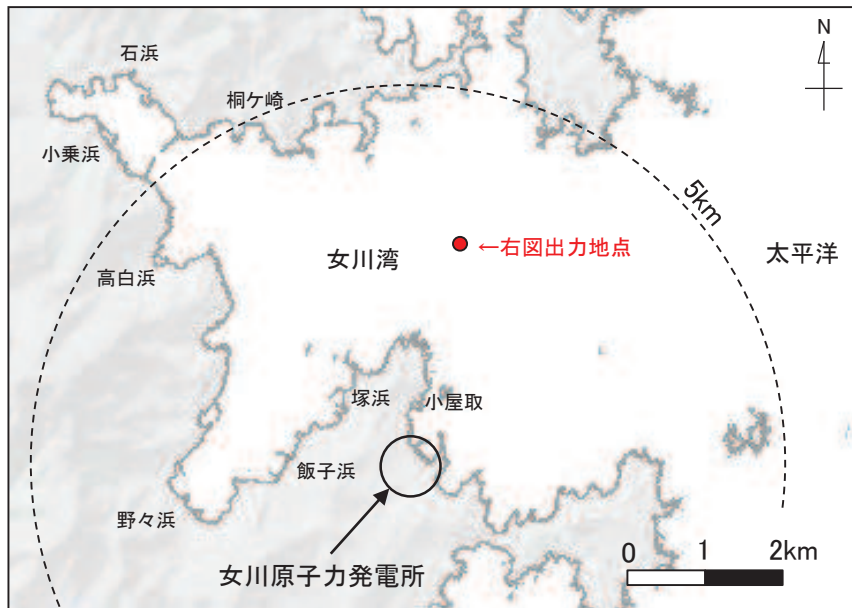
2.2 基準津波の特徴(水位, 流向及び流速)の把握(1/3)

第692回審査会合(H31.3.12)
資料1-4 p58 一部加筆

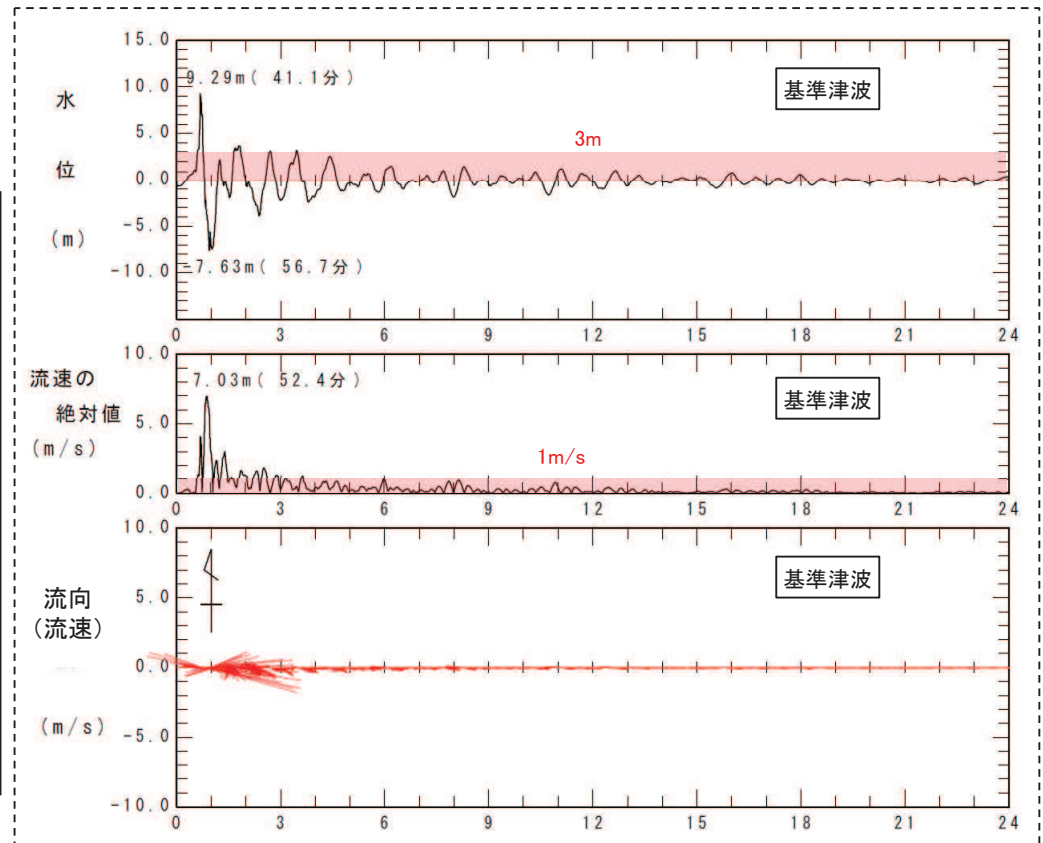
【女川湾内の津波の特徴】

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。



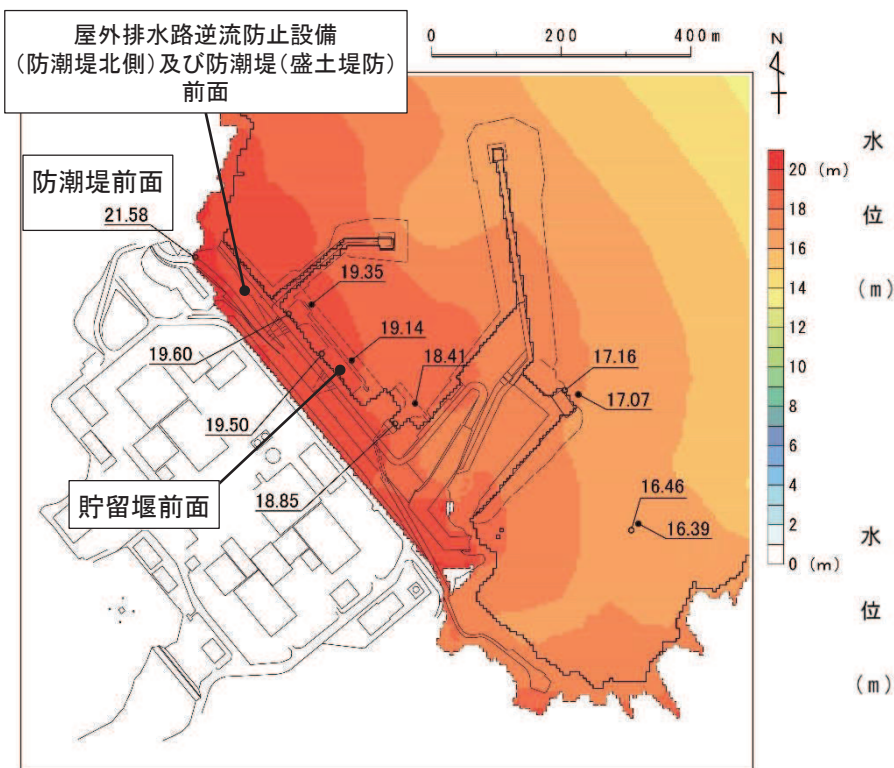
【水位, 流速の絶対値及び流向(流速)の出力点位置】



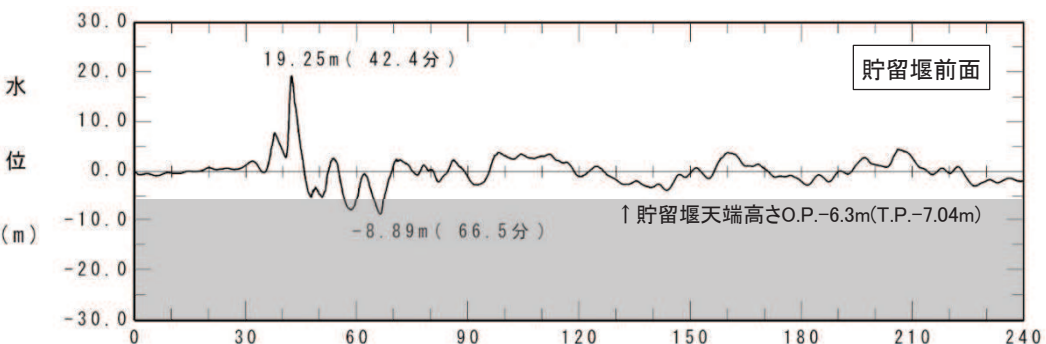
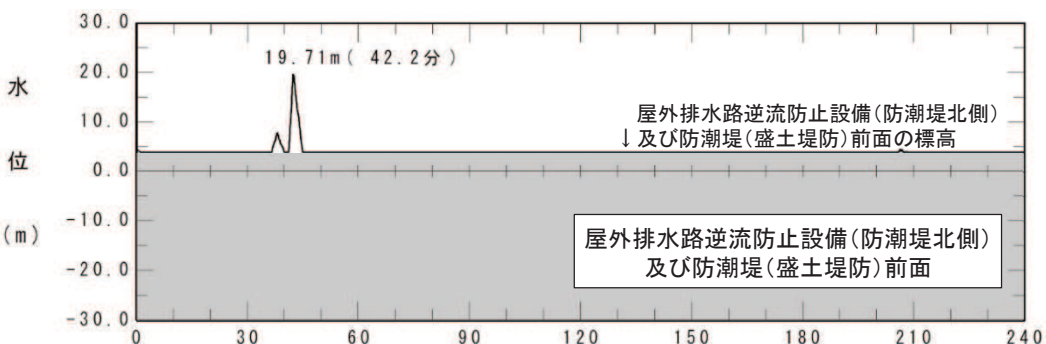
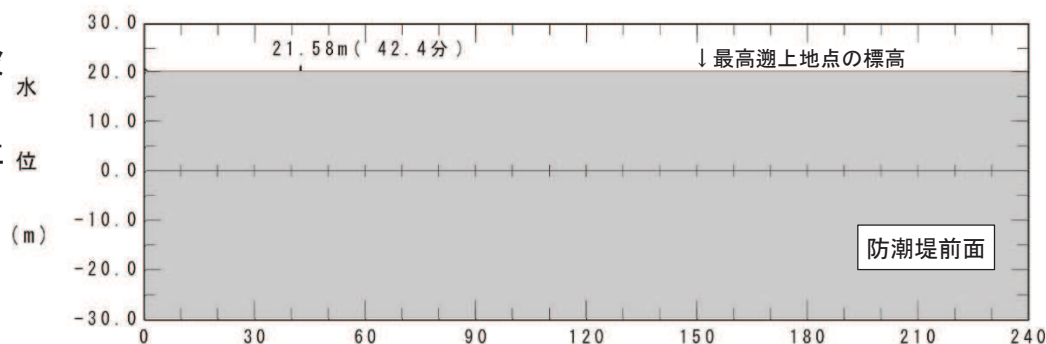
2.2 基準津波の特徴(水位, 流向及び流速)の把握(2/3)

【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)



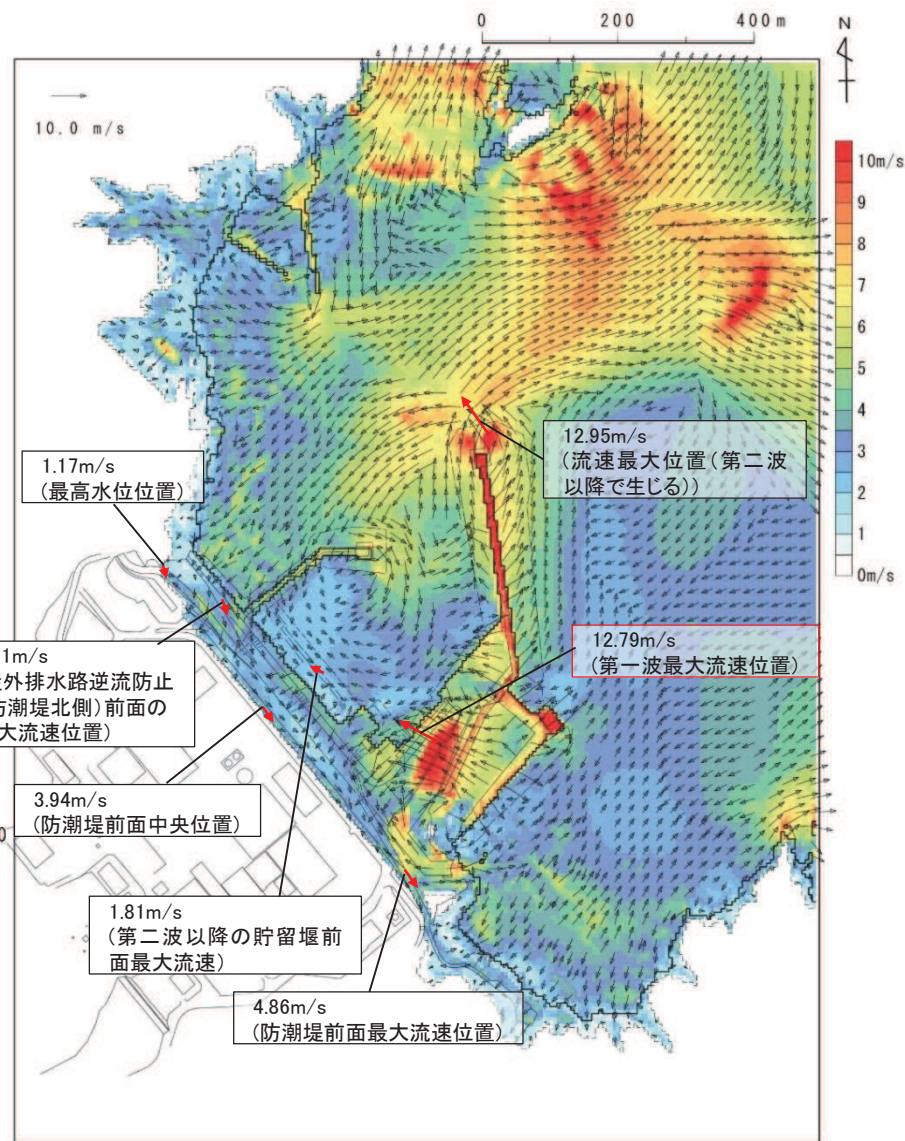
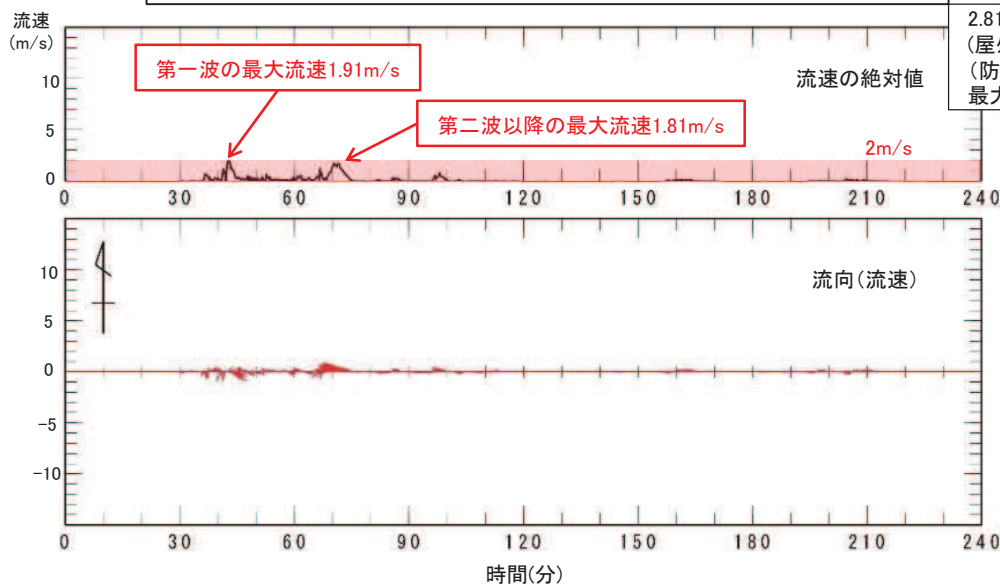
水位時刻歴波形

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。



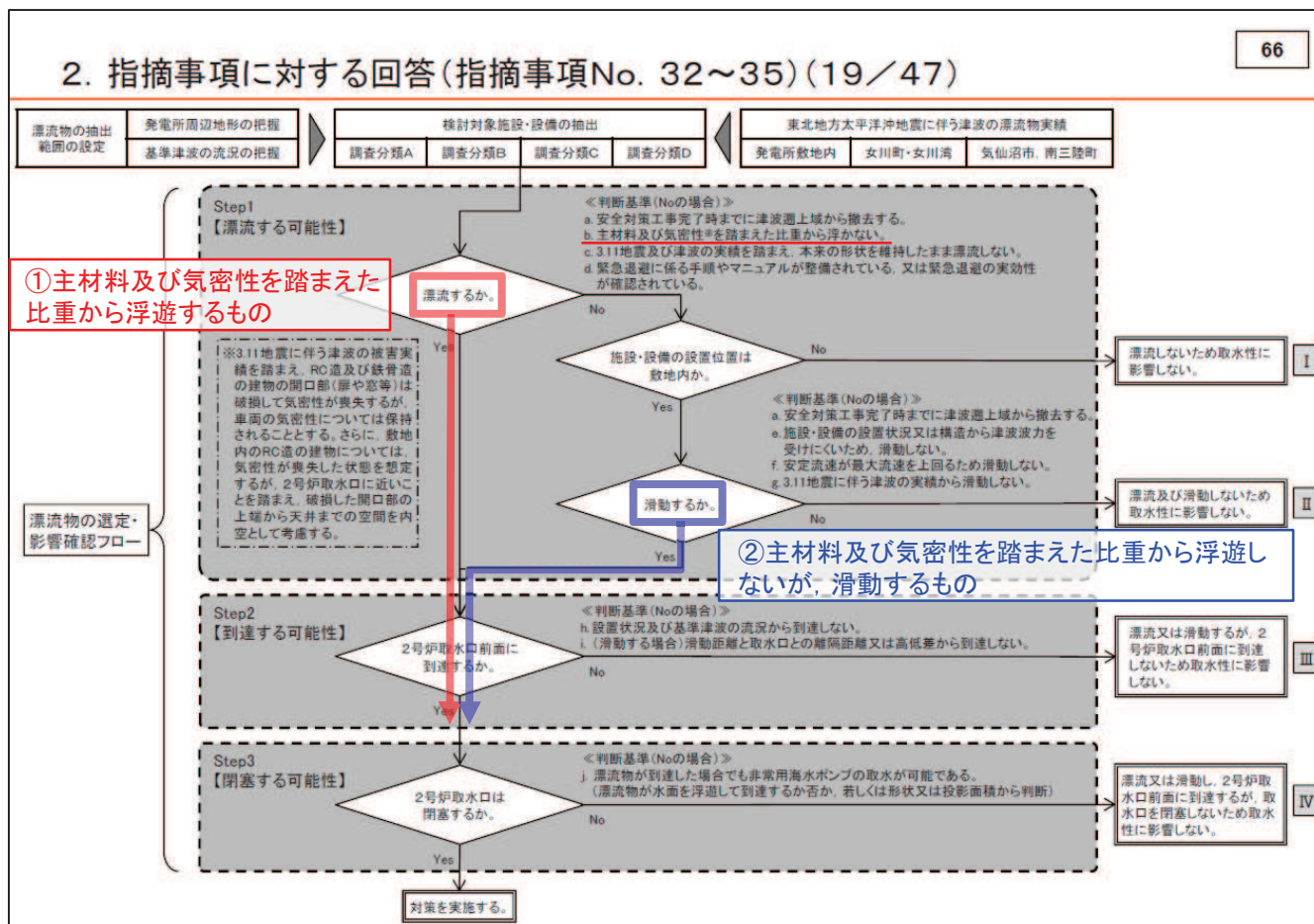
基準津波における最大流速分布図(全時刻)

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。

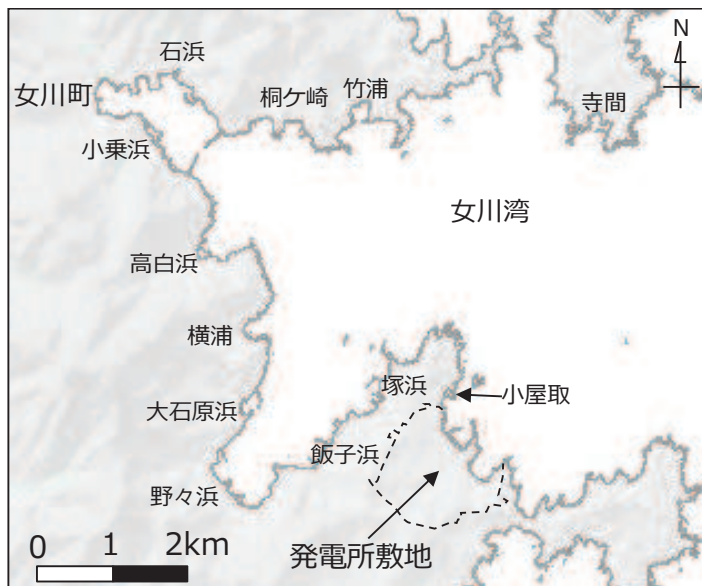


3. 1 衝突する可能性のある漂流物の抽出(2/2)

- 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
	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。

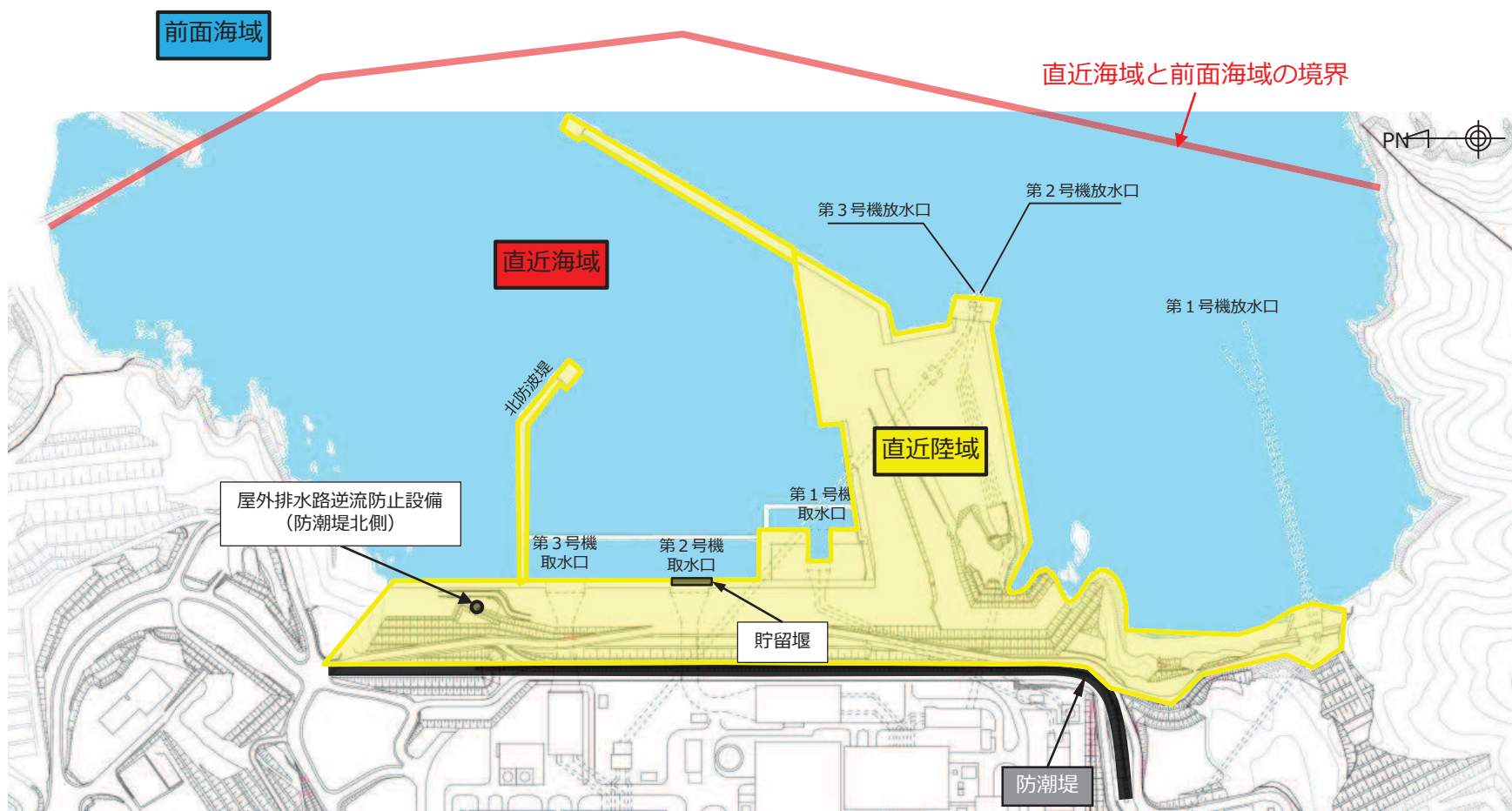
*2: 小屋取地区以外の漁船は、約400隻であり、その9割以上が総トン数5t未満である。また、総トン数10~19tの漁船は5隻(塚浜:2隻, 飯子浜:1隻, 寺間:2隻)のみで、各漁港前面の区画漁業権範囲内で養殖を行っているか、女川湾よりも太平洋側で漁を行っている。

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。

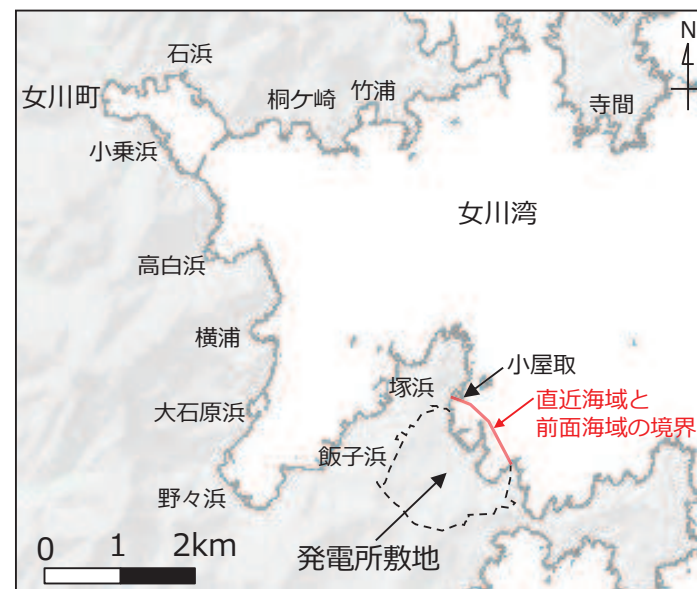


「直近陸域」、「直近海域」及び「前面海域」の区分

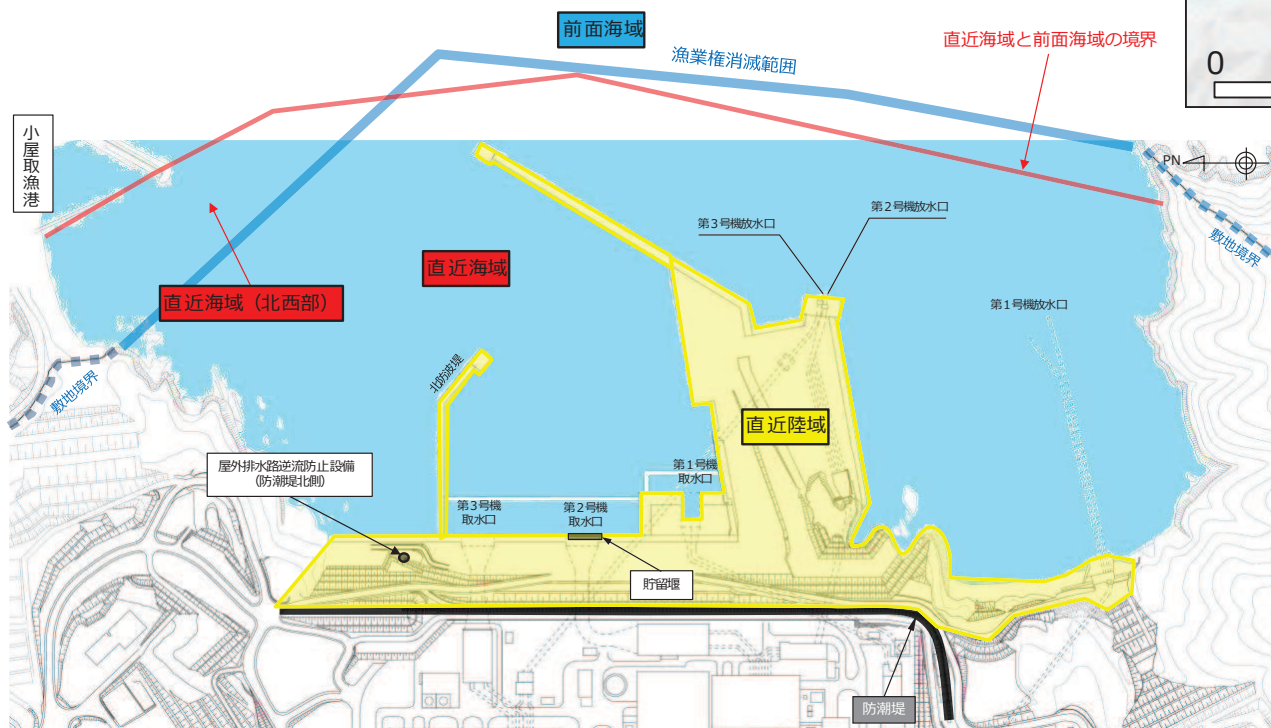
3.2 漂流物の初期配置(2/6)

【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)。



女川原子力発電所周辺



「直近海域」と漁業権消滅区域の関係

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)

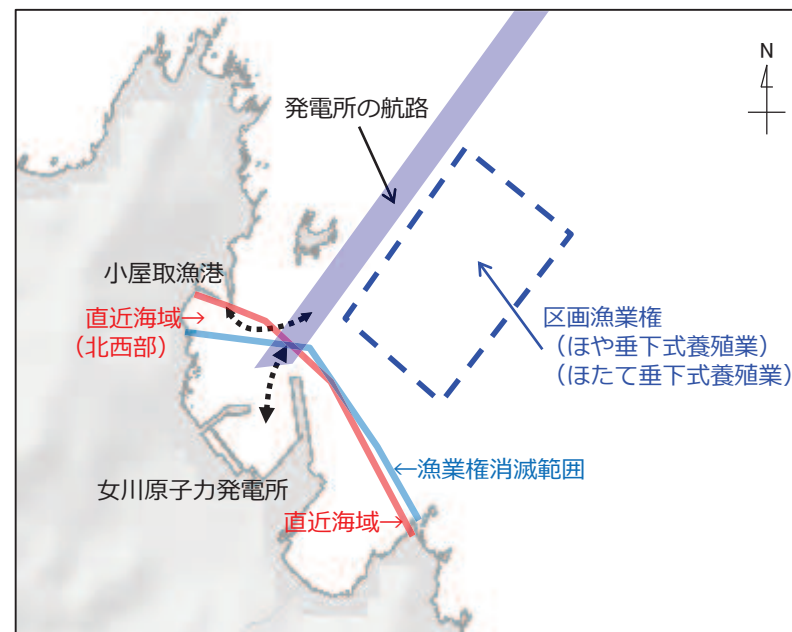
- ✓ 「直近海域」の大部分は漁業権消滅区域として設定されていることから、この範囲では漁が行われていない。
- ✓ 一方、「直近海域(北西部)」は漁業権があり、小屋取漁港の港口に位置していることから、小屋取漁港の小型漁船(FRP)が漁をしていることが想定される。ただし、「直近海域(北西部)」近傍は発電所及び小屋取漁港の航路となっていることから、航行の安全面の観点で、小屋取漁港の小型漁船(FRP)以外が「直近海域(北西部)」で漁をしている可能性はない。

(航行中の漁船)

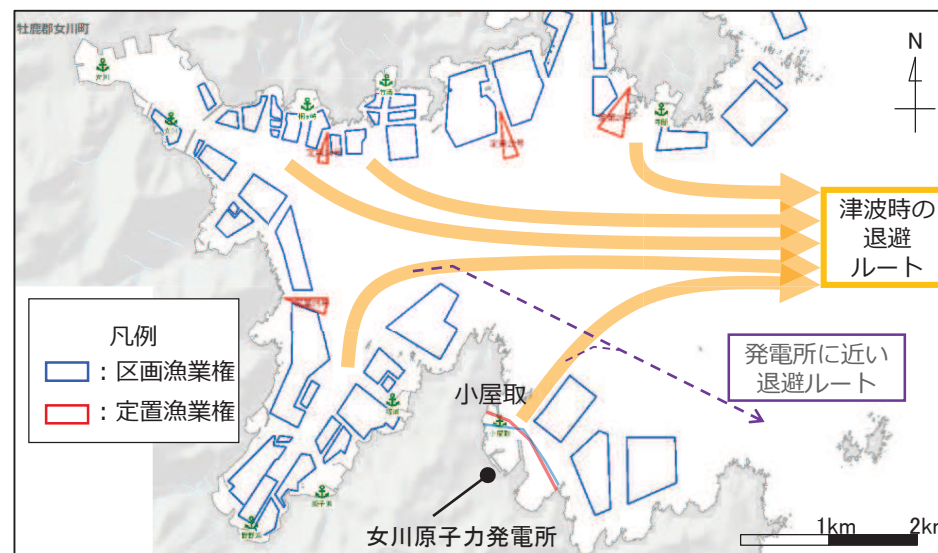
- ✓ 「直近海域」は小屋取漁港の航路となっていることから、小屋取漁港の小型漁船(FRP)は区画漁業権範囲内及び沖合へ移動する際に「直近海域」を航行することが想定される。
- ✓ 一方、発電所は小規模な湾の奥に立地していること、「直近海域(北西部)」近傍は発電所及び小屋取漁港の航路となっていること及び発電所前には区画漁業権が設定されており、ほや、ほたて及びかき垂下式養殖による棚があることから、小屋取漁港以外の漁船が「直近海域」を航行することはない。

(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

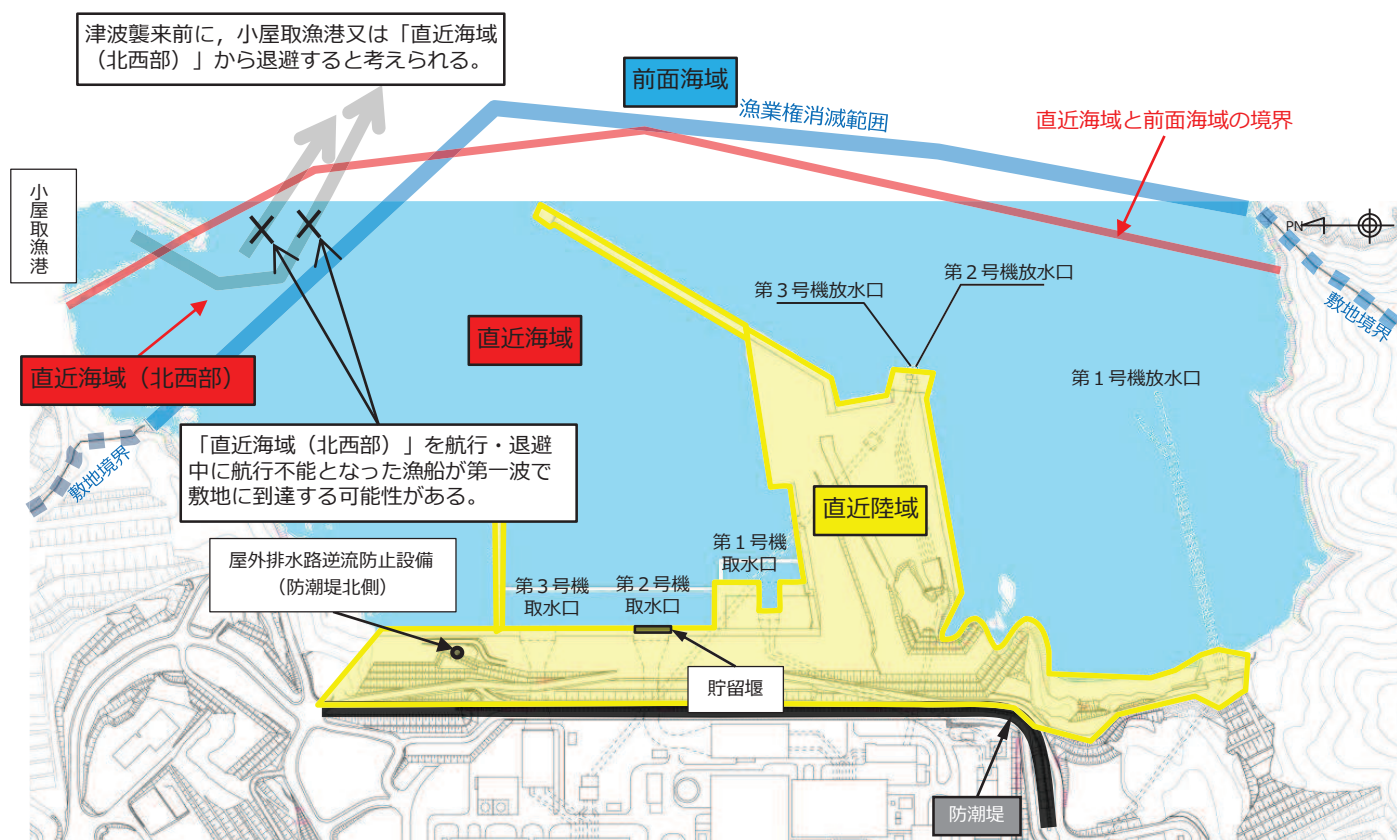


津波警報時の退避ルート

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)

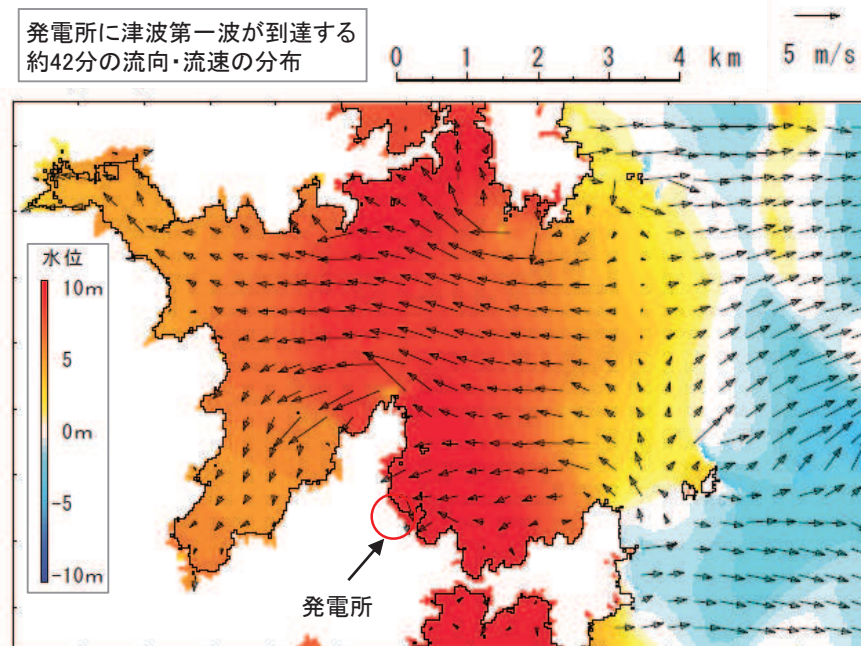
【前面海域】

- 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
		がれき	—
	陸域	がれき	—
		車両	—
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	陸域	車両	—*3	浮遊
		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。

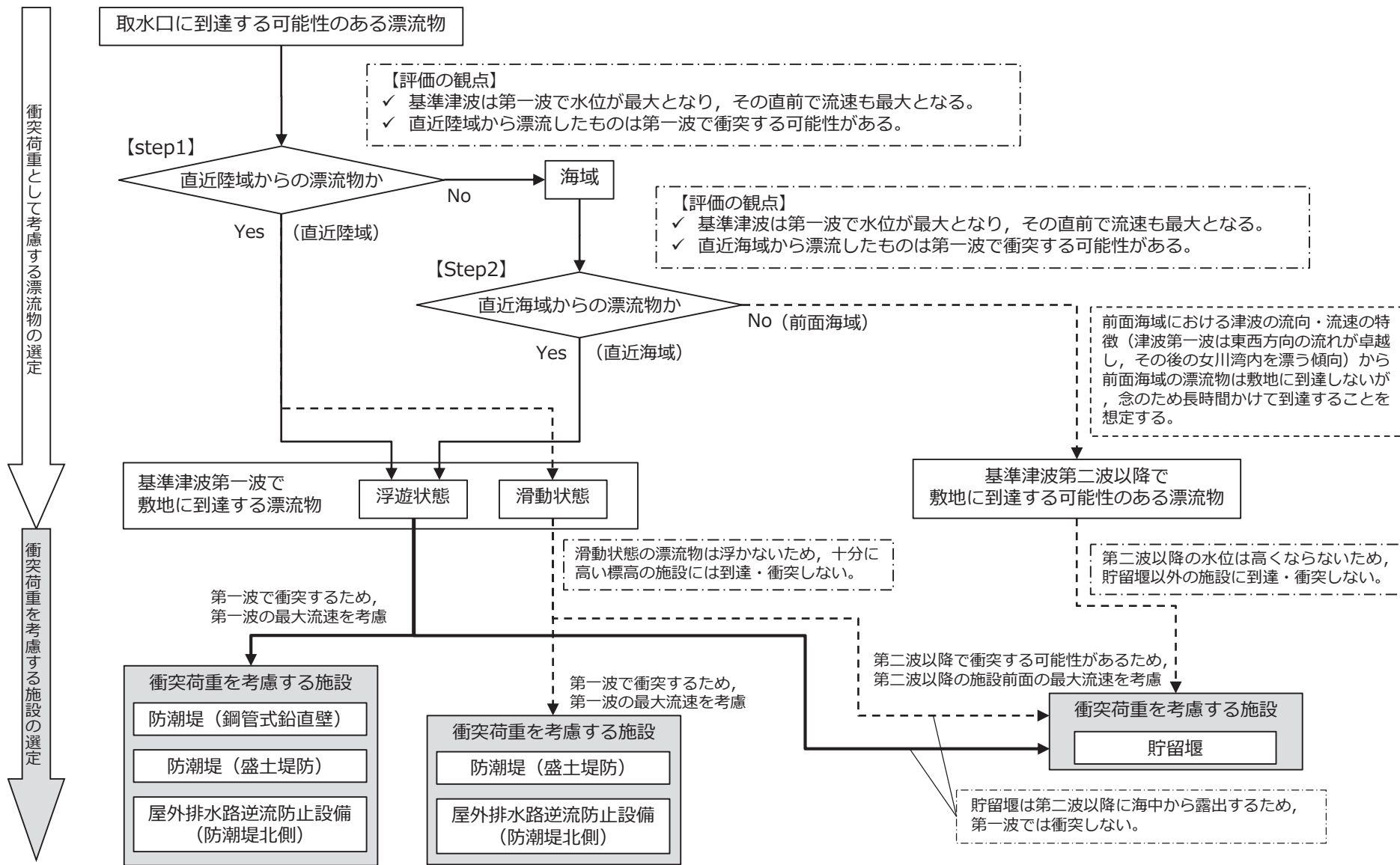
「直近海域」からの漂流物に選定する。最も重量のある小型漁船(FRP, 排水トン数15t)を代表漂流物とする。

「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。

なお、後述の「5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認」において、津波により漂流した船舶の衝突形態は複雑な挙動となることを踏まえ、漂流物が斜め方向から衝突した場合にねじれの影響を確認する必要がある施設に対しては、斜め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 FRP製船舶の有効軸剛性の設定
- 5. 2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認
- 5. 3 設計用衝突荷重の設定

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、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(p48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。

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*3	前面海域	道路橋示方書	—	—	—	○

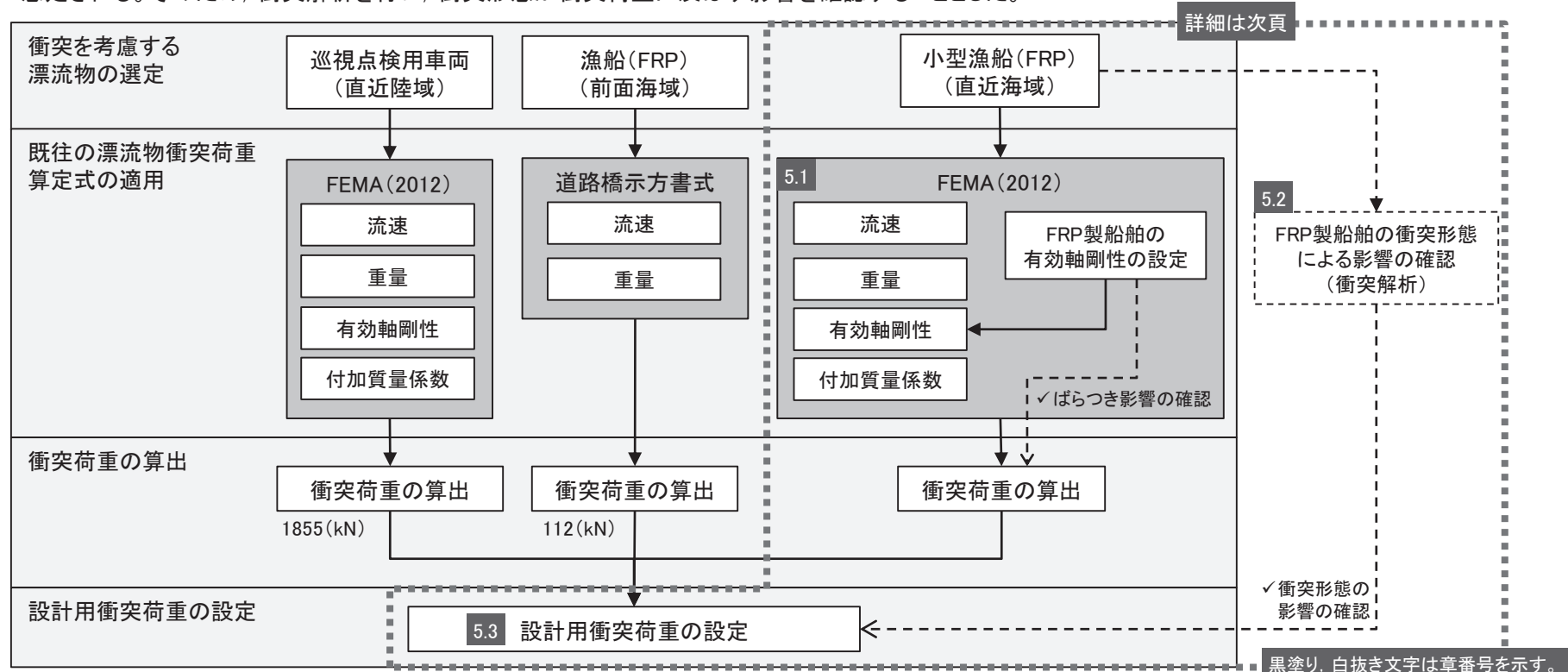
注記*1: 滑動状態で衝突を考慮する車両系重機(41.2t)は、「ASCE(2016)」を参考に、衝突荷重を算定することとした(詳細は参考3)。

*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。

*3: 発電所周辺の最大流速13m/sとした場合の影響についても確認する。

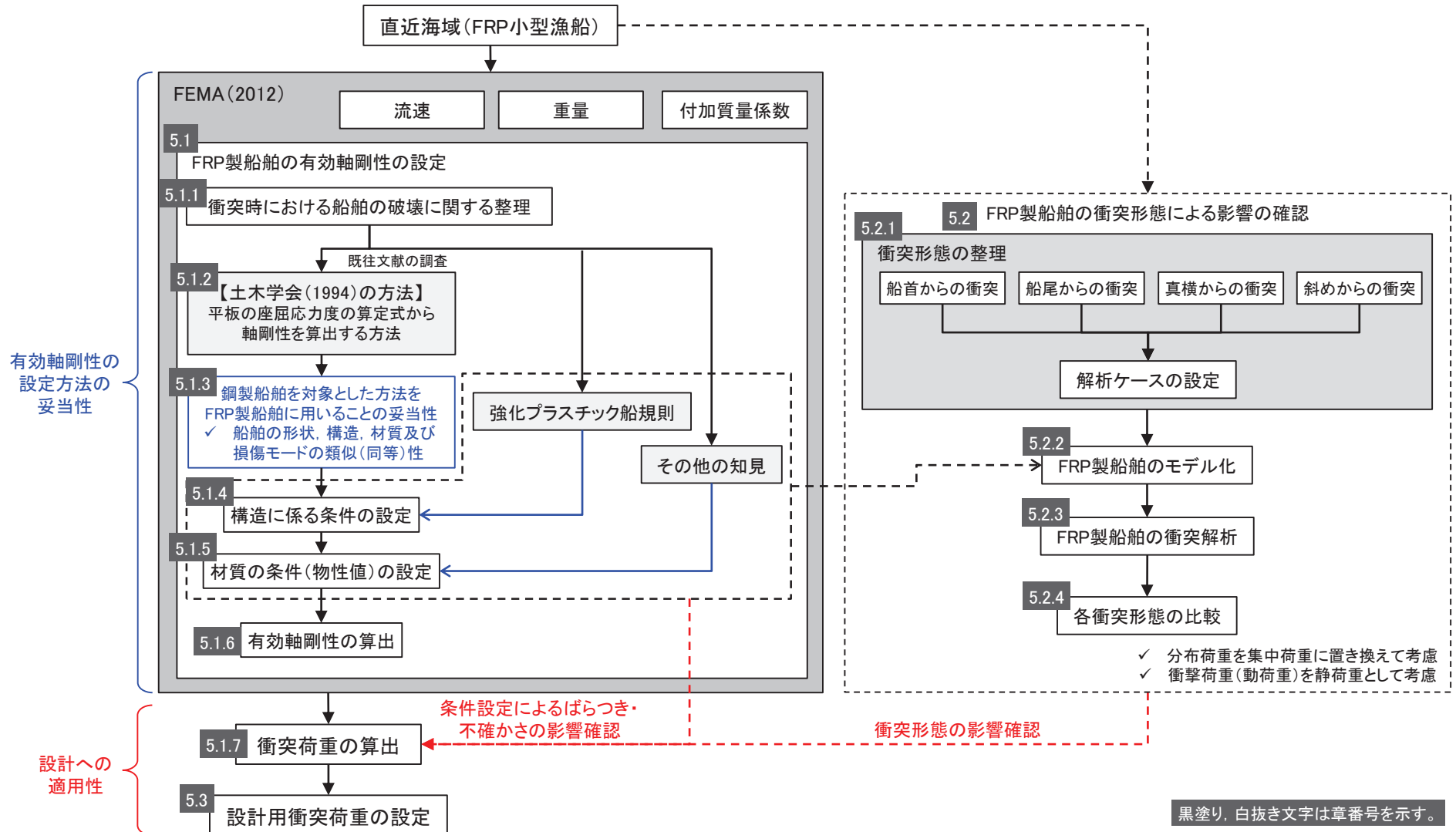
5. 漂流物による衝突荷重の算定(衝突荷重の設定フロー(1/2))

- 「直近陸域」の巡視点検用車両, 「直近海域」の小型漁船(FRP)及び「前面海域」の漁船(FRP)の衝突荷重算出の流れを以下に示す。なお, 滑動状態で衝突を考慮する車両系重機は, 「ASCE(2016)」を参考に, 衝突荷重を算定する(詳細は参考3)。
- 上記の漂流物のうち「直近陸域」の巡視点検用車両及び「直近海域」の小型漁船(FRP)については, 「FEMA(2012)」を適用することから, 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, 巡視点検用車両及び小型漁船(FRP)ともに, 最大値の $C=1$ を適用する。
- 有効軸剛性 k 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(車両の軸剛性の妥当性は参考4)。一方, 小型漁船(FRP)については以下の内容から材質がFRPであることを考慮した軸剛性を個別に設定することとする。
 - ✓ 船舶の軸剛性としては, 「甲斐田・木原(2017)」が既往の文献を整理し, 総トン数400~4000tの鋼製の大型船舶の有効軸剛性が示されている。
 - ✓ 一方, 評価対象としている船舶は小屋取漁港の漁船で, 最大の総トン数は約5tであることから, 大型船舶から小型船舶へ外挿する方法が考えられるが, 小屋取漁港の小型漁船はいずれもFRP製の船舶であるため, 材質の違いにより外挿する方法は適用が困難であると考えられる。
- また, 船舶は本質的に浮く構造であり, 車両に比べて長軸と短軸が明瞭であることから, 漂流物となって襲来する際には複雑な挙動となることが想定される。そのため, 衝突解析を行い, 衝突形態が衝突荷重に及ぼす影響を確認することとした。



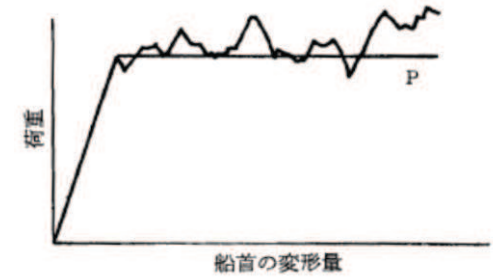
5. 漂流物による衝突荷重の算定(衝突荷重の設定フロー(2/2))

- ▶ 小型漁船(FRP)の衝突荷重はFEMA(2012)から算出することとし、衝突形態による影響を衝突解析により確認することとする。小型漁船(FRP)の衝突荷重算出の詳細フローを以下に示す。
- ▶ FEMA(2012)に用いる船舶の有効軸剛性の設定にあたっては、有効軸剛性の設定方法の妥当性(FRP製船舶と鋼製船舶の同等性、用いる知見の適用性)を示した上で、有効軸剛性の算定における各パラメータのばらつきを考慮した上で、設計への適用性を確認することとする。



5. 漂流物による衝突荷重の算定 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定
 5. 1. 1 衝突時における船舶の破壊に関する整理

- 「土木学会(1994)」によれば、右図及び下図に示すように、剛性及び強度が大きい海洋構造物に対する船舶の圧壊荷重と変形量との関係が示されており、以下の①～②のような破壊進展となる。
 - ① 船舶の衝突初期は、船首が傾斜しているため接触面が小さく、圧壊が進むに従って荷重(反力)はほぼ直線的に増加する。
 - ② 船舶の破壊が進み、船首の傾斜部が全部破壊し、船体の全面が海洋構造物に接触すると、その後の荷重はほぼ一定値に達する。この時の荷重は、船首側からの圧壊による座屈荷重とほぼ同等とみることができるとされている。
- 弾性体として設計する浸水防護施設(防潮堤、逆流防止設備(防潮堤北側)及び貯留堰)に対して、小型漁船(FRP)の座屈強度は小さいと考えられることから、「土木学会(1994)」で示されている破壊進展と同様に、FRP製船舶が圧壊していくこととなり、圧壊が進むにつれて衝突エネルギーが減少しつつ圧壊荷重が上限となって圧壊は終了する。これと同時に、被衝突側の強固な弾性体である浸水防護施設にその圧壊荷重(最大荷重)が作用する。
- 以上を踏まえ、FRP製船舶の圧壊荷重を求めた上で、軸剛性を算出することとする。



荷重と船首の変形量(「土木学会(1994)」)

土木学会(1994)

「船が海洋構造物に船首衝突し、船首から圧壊が起こり食い込んで行くときは、まず船首前端から船首傾斜部が圧壊する。そして、さらに圧壊が進むと深さが一樣となる船首部の圧壊へと食い込みが拡大していく。」
 「衝突船が海洋構造物に衝突し、船体が圧壊するときは、その衝突エネルギーは船首の圧壊によって吸収される。この船首の圧壊による吸収エネルギーは、図3.6の点線で囲まれる面積で求められる。」

【解釈】

図3.3の船首傾斜部(赤色部)が壊れる際には、図3.6及び図3.7の赤色部で示すように圧壊荷重及び船側の吸収エネルギーが増加する。一方、船首傾斜部が完全に壊れ、図3.3の船首傾斜部よりも船体側(青色部)が壊れ始めると、構造が長手方向に一樣であることから、図3.6のように圧壊荷重は一定となり、吸収エネルギーは図3.7のように線形に増加することとなる。

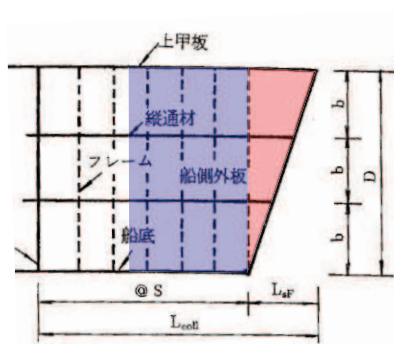


図 3.3 船首部の標準型

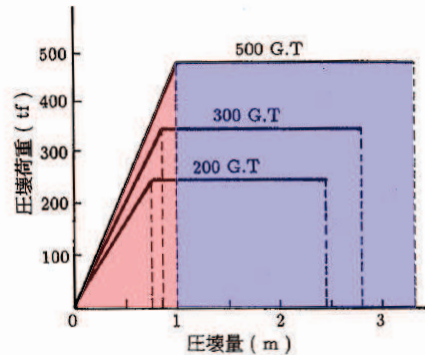


図 3.6 圧壊荷重と圧縮量

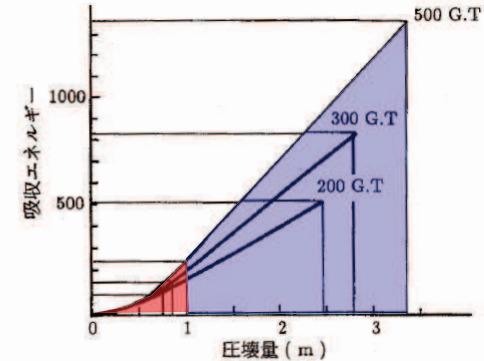


図 3.7 船側強度の算定

荷重と船首の変形量(「土木学会(1994)」)に一部加筆)

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5.1.2 土木学会の方法

- 「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、船首形状寸法等に乗じて求められるとしている。「土木学会(1994)」で検討対象としている船舶は、大型の鋼製船舶ではあるが、座屈強度 σ_c の算定式は一般的な平板の座屈応力度の算定式であることから、ヤング率とポアソン比で適切に考慮することで、鋼製以外の船舶にも適用可能である。
- また、「土木学会(1994)」によれば、船舶の破壊が進み、船首傾斜部 L_{sf} がすべて破壊した際に圧壊荷重 P_c に達し、その後圧壊荷重 P_c が一定値として作用することとなる。そのため、圧壊荷重 P_c を船首傾斜部 L_{sf} で除した値が船舶の軸剛性 k_c となる。
- なお、「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」によれば、「圧縮荷重が作用する場合には、圧縮強度を基準に構造設計するのではなく、座屈強度を基準に構造設計する必要がある。」とされていることから、FRP製船舶の圧壊荷重に座屈強度を用いることは妥当であると考えられる。
- 以上を踏まえ、「土木学会(1994)」に示された圧壊荷重の算出方法を用いて、軸剛性を算出する。

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

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

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

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)

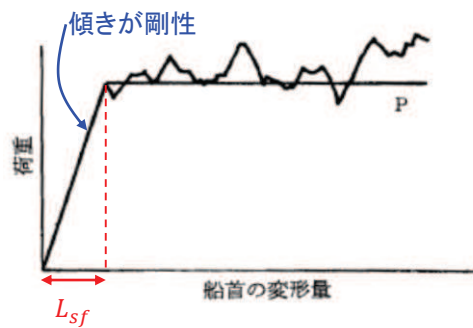
E : ヤング率 (tf/m²)

a : 横肋骨心距 (mm)

b : 縦肋骨心距 (mm)

D : 船の深さ (m)

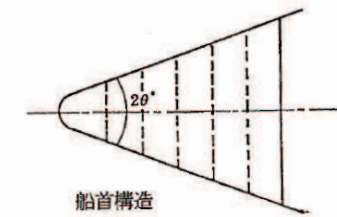
2θ : 船首角度 (°) (35° ~ 70°)



荷重と船首の変形量
(「土木学会(1994)」に一部加筆)



船首部の標準型
(「土木学会(1994)」に一部加筆)



船首構造
船首角度(「土木学会(1994)」)

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5. 1. 3 鋼製船舶を対象とした方法をFRP製船舶に用いることの妥当性(1/3)

- 「土木学会(1994)」で示されている座屈強度 σ_c の算定式は一般的な平板の座屈応力度の算定式であるため、ヤング率とポアソン比で適切に考慮することで、FRP製船舶に適用することが可能であると考えられるが、「土木学会(1994)」で検討対象としている船舶が鋼製船舶ではあることを踏まえ、FRP製船舶と鋼製船舶の形状、構造、材質及び損傷モードに関する類似(同等)性について検討を行った。

【船舶の形状に関する類似(同等)性】

- 「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、ほたての養殖に使用する総トン数14tのアルミ合金漁船とFRP製の船舶の図面が示されている。
- FRP漁船とアルミ合金漁船の寸法、外形及び断面はほぼ同じである。
- なお、評価対象である小屋取漁港の小型漁船もほたての養殖を営んでいることから、右の図で示されているFRP漁船と概ね同様の形状である。
- 以上から、FRP製船舶と鋼製船舶は同じ形状であると判断した。

表-2.1 アルミ合金漁船の主要目表

全長	21.66m
全幅	4.78m
型深さ	1.21m
登録長	17.60m
登録幅	4.38m
登録深さ	1.20m
測定長	19.20m
測定幅	3.90m
測定深さ	1.20m
計画総トン数	14トン
主機関	YANMAR 6LX-ET (定格出力) 650PS
定員	6人
用途	小型機船底びき網漁業
燃料油の種類	A重油
燃料油の消費量	160g/(ps・hr)
発電機動力	主機駆動



写真-2.1 アルミ合金漁船

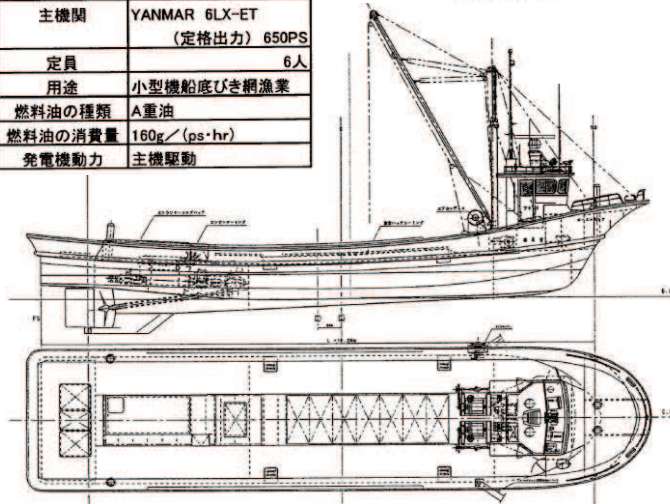


図-2.1 アルミ合金漁船の一般配置図

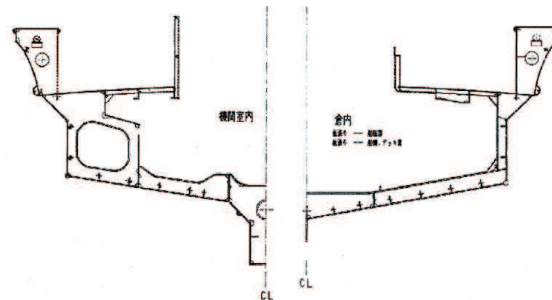


図-2.2 アルミ合金漁船の中央断面図

表-2.6 FRP漁船の主要目表

全長	21.66m
全幅	4.78m
型深さ(D)	1.21m
登録長	17.60m
登録幅	4.18m
登録深さ	1.38m
測定長	19.20m
測定幅	3.90m
型深さ(Dm)	1.20m
計画総トン数	14トン
主機関	YANMAR 6LAH-ST (定格出力)550PS
定員	5人
用途	小型機船底びき網漁場
燃料油の種類	A重油
燃料油の消費量	162g/(ps・hr)
発電機動力	主機駆動



写真-2.2 FRP漁船

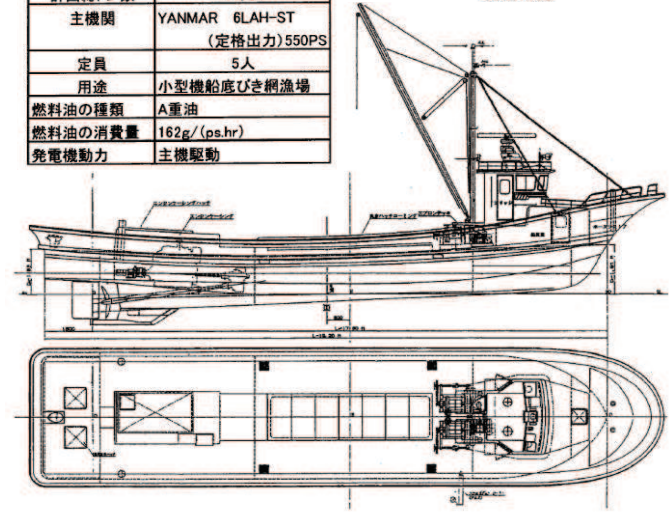


図-2.4 FRP漁船の一般配置図

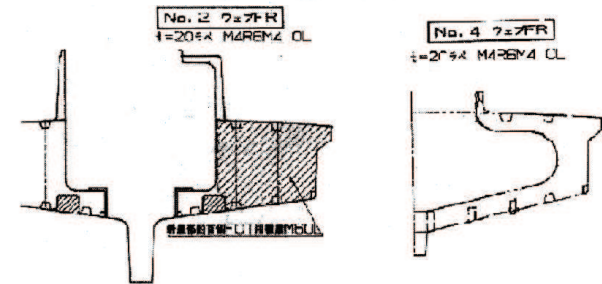


図-2.5 FRP漁船の横断面図

アルミ合金漁船(左)及びFRP漁船(右)の構造
 (「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))」)

5.1.3 鋼製船舶を対象とした方法をFRP製船舶に用いることの妥当性(2/3)

【船舶の構造に関する類似(同等)性】

- 座屈強度 σ_c を算出する際に必要となる船側外板厚等について、FRP製船舶と鋼製船舶の算出方法を比較し、両者に類似性があることを確認した。
 - ✓ 「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018)」によれば、中央部の船側外板厚は $15S\sqrt{d + 0.026L}$ (S :肋骨の心距, d :計画最大満載喫水)とされている。この算定式に関しては、「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会会誌, 1978)」では、「波浪中を航行する船が受ける外力は、船の大きさ、形状等によって異なるが、特別な場合を除き、船体の材質によって変わらないと考えられる。したがって船底や船側の波浪外力、水密隔壁や深水タンク隔壁に作用する外力は、すべて鋼船規則に定められている外力を用いた。」とされており、外板の厚さを算出するために用いる外圧(水頭)について「荷重を鋼船規則に合わせ、波浪変動圧を考慮に入れた($d+0.026L$)とした。」とあることから、FRP製船舶の船側外板厚算定式は、鋼製船舶を基本にしていることから、両者は類似性を有する。
 - ✓ また、縦強度、甲板、肋骨、船底等の主要構造について、「鋼船規則(日本海事協会)」、「小型鋼製漁船((社)漁船協会, 昭和46年)」及び「小型鋼船構造規則(詳細不明)」の鋼製船舶を基に「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018)」で規定されていることから、FRP製船舶と鋼製船舶の構造は類似性を有する。

FRP製船舶と鋼製船舶の同等(類似)性に関する整理

項目	引用文献	確認内容	同等(類似)性
全体形状	「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))」	文献に示されているFRP漁船とアルミ合金漁船の寸法、外形及び断面がほぼ同じであることを確認した。	○
船側外板厚	「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018)」 「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会会誌, 1978)」	FRP製船舶と鋼製船舶に作用する外力が同じであり、FRP製船舶の船側外板厚算定式が鋼製船舶を基にしていることを確認した。	○
その他の主要構造	「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018)」 「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会会誌, 1978)」 「鋼船規則(日本海事協会)」 「小型鋼製漁船((社)漁船協会, 昭和46年)」 「小型鋼船構造規則(詳細不明)」	FRP製船舶の縦強度、甲板、肋骨、船底等の主要構造が鋼製船舶の構造を参考にしたり、同様の考えを採用していることを確認した。	○

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5.1.3 鋼製船舶を対象とした方法をFRP製船舶に用いることの妥当性(3/3)

【船舶の材質の力学特性及び損傷モードの類似(同等)性】

- 「土木学会(1994)」で示されている座屈強度 σ_c は、一般的な平板の座屈応力度の算定式から求められているため、FRPのヤング率とポアソン比を用いることで、FRP製の船舶の座屈強度を算出することが可能であるが、「土木学会(1994)」で検討対象としている船舶が鋼製船舶であることを踏まえ、それぞれの材料である鋼材とFRP材の材質及び損傷モードについて整理を行い、両者に類似性があることを確認した。
- ✓ FRP製船舶と鋼製船舶は、それぞれ構成している部位の材質は異なるものの、どちらも主として薄板を組み合わせた構造であるため、圧縮方向の力が作用した場合には座屈しやすいという点で類似性を有する。
 - ✓ 「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」によれば、「FRPは微視的には不均質材料であるが、巨視的には等方性または直交異方性の力学特性を持つ均質材料として取り扱うことができる。このような場合には、等方性または直交異方性の座屈理論をそのまま利用できる。」としている。一方、鋼材は等方性の力学特性を持つ均質材料であるため、両者は類似した力学特性を有する。

FRP製船舶と鋼製船舶の同等(類似)性に関する整理

項目	引用文献	確認内容	同等(類似)性
材質の力学特性	「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」	FRP製船舶の材料であるFRPと鋼製船舶の材料である鋼材は、どちらも等方性の力学特性を持つ均質材料であることを確認した。	○
損傷モード	「基礎からわかるFRP(強化プラスチック協会編, 2016)」	FRP製船舶と鋼製船舶は、どちらも薄板を組み合わせた構造であるため、圧縮方向の力が作用した場合に座屈しやすいことを確認した。	○

前頁までの検討により、FRP製船舶と鋼製船舶は形状、構造、材質に関して類似(同等)性を有することから、FRP製船舶の圧壊荷重算出にあたり「土木学会(1994)」の方法を用いることは妥当である。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5.1.4 FRP製船舶の構造に係る条件の設定(文献の適用性)

➤ FRP製船舶の座屈強度を算出する際に必要となる船舶の構造条件については、用いる文献の適用性を確認した上で、下表のとおりとする。

船舶の構造に関する整理(適用性)

項目	引用文献	適用性	評価	引用文献の値	採用値	
船舶構造	船舶の長さ L	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」の総トン数5tの諸元(船の長さ)	本図書は、「漁港漁場整備法」に基づき「漁港・漁場の施設の設計において参考となる技術的な知見を記載したものである。」とされており、全漁業種類の漁船の平均値が示されていることから、適用可能と判断した。	○	11.0(m)	11.0(m)
	船の深さ*1 D	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」の総トン数5tの最大喫水	本図書は、「漁港漁場整備法」に基づき「漁港・漁場の施設の設計において参考となる技術的な知見を記載したものである。」とされており、全漁業種類の漁船の平均値が示されているが、最大喫水と船の深さは異なることから、適用不可と判断した。	×	1.8(m)	1.22(m)
		「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))」から案分	本図書は、実際に漁業で使用されていた総トン数約14tのFRP製漁船の形状が示されていることから、総トン数5tに案分することで適用可能と判断した。	○	<u>1.22(m)</u> *2	
	船側外板厚 t	「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」の前後部の外板の厚さ	本規則は、法定検査と同等(本規則に従った船級検査に合格することで、法定検査を省略することが可能)であり、船舶の長さが35m未満のFRP製船舶に適用される規則であることから適用可能と判断した。	○	5.89(mm)	5.89(mm)
	横肋骨心距 a	「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」の肋骨心距	本規則は、法定検査と同等(本規則に従った船級検査に合格することで、法定検査を省略することが可能)であり、船舶の長さが35m未満のFRP製船舶に適用される規則であることから適用可能と判断した。	○	500(mm)	500(mm)
	縦肋骨心距 b	「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」の肋骨心距	本規則は、法定検査と同等(本規則に従った船級検査に合格することで、法定検査を省略することが可能)であり、船舶の長さが35m未満のFRP製船舶に適用される規則であることから適用可能と判断した。	○	500(mm)	500(mm)
	船首角度 2θ	「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))」から推定	本図書は、実際に漁業で使用されていた総トン数約14tのFRP製漁船の形状が示されていることから適用可能と判断した。	○	70°*2	70°
	船首傾斜部の長さ L _{sf}	「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))」から案分	本図書は、実際に漁業で使用されていた総トン数約14tのFRP製漁船の形状が示されていることから、総トン数5tに案分することで適用可能と判断した。	○	1.52(m)*2	1.52(m)

注記*1:「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」によれば、「船の深さ(D)とは、船の長さの中央で測った船体外板の下面、又は船体中心線と船体外板下面の延長線との交点から船側における上甲板の上面までの垂直距離をいい、単位はメートル(m)とする。」とされている。

*2:算出方法の詳細は参考5に示す。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定
 5. 1. 5 FRP製船舶の材質の条件の設定(文献の適用性)

➤ FRP製船舶の座屈強度を算出する際に必要となるヤング率及びポアソン比については、用いる文献の適用性を確認した上で、下表のとおりとする。

ヤング率及びポアソン比に関する整理(適用性)

項目	引用文献	適用性	評価	引用文献の値*1	採用値*2	
材料物性	ヤング率(曲げ弾性率)	「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	本規則は、「長さが35m未満の普通の形状のFRP船(油タンカーを除く。)で、普通の主要寸法比を有するものに適用する。」とされており、平均的な曲げ弾性係数を示しているが、最低値を規定している可能性があるため、適用不可とした。	×	$6.86 \times 10^3(\text{N/mm}^2)$ 【 $0.7 \times 10^6(\text{tf/m}^2)$ 】	1.2×10^6 (tf/m^2)
		「強化プラスチック船規則検査要領(日本海事協会, 2018年)」の曲げ弾性係数の判定基準	上記規則に対する検査要領であり、船体材料(ガラス繊維基材)の判定基準を示したものであることから、適用可能と判断した。	○	$11.78 \times 10^3(\text{N/mm}^2)$ 【 $1.2 \times 10^6(\text{tf/m}^2)$ 】	
		「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	本図書は、「漁港漁場整備法」に基づき「漁港・漁場の施設の設計において参考となる技術的な知見を記載したものである。」とされており、漁船の成形法であるハンドレイアップ成形法による曲げ弾性率を示したものであることから、適用可能と判断した。	○	9~12(GPa) 【 $1.08 \times 10^6(\text{tf/m}^2)$ 】	
		「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)」	本文献は、船体構造が詳細に示されているが、FRP船舶については紹介されている程度であり、示されているヤング率も典型的な値として紹介されているのみで、値の根拠が示されていないことから、適用不可と判断した。	×	10.7(kN/mm ²) 【 $1.09 \times 10^6(\text{tf/m}^2)$ 】	
		「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	本文献は、非金属材料の物性値を幅広く掲載しており、漁船の成形法であるハンドレイアップ成形法による曲げ弾性率を示したものであることから、適用可能と判断した。	○	1050~1140(kgf/mm ²) 【 $1.10 \times 10^6(\text{tf/m}^2)$ 】	
ポアソン比	「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)」	FRP材料の巨視的材料係数としてポアソン比が示されているが、I型断面の梁構造の値であり、船舶とは使用目的がことなるため、適応不可とした。	×	0.1, 0.29, 0.308, 0.32	0.336	
		「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)	本文献は、非金属材料の物性値を幅広く掲載しており、漁船の成形法であるハンドレイアップ成形法によるポアソン比を示したものであることから、適用可能と判断した。	○		<u>0.336</u> (0.320~0.358)

注記*1: 文献に記載されている値が範囲を示している場合は平均値とする。また、各項目で適用性ありと評価されたものの最大値を下線で示す。

*2: 各項目で適用性ありと評価された中から最大値を採用する。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5. 1. 6 FRP製船舶の材質の条件の設定(文献の適用性)

【軸剛性の設定にあたり妥当性を確認したケース】

- 軸剛性の設定にあたり妥当性を確認したケースの各条件は右の表のとおりであり、これらの設定値を用いて船舶の軸剛性を算出すると、 0.47×10^5 (N/m)となる。
- なお、この軸剛性を用いてFEMA(2012)から衝突荷重を算出すると、635(kN)となる。

項目		軸剛性の設定にあたり妥当性を確認したケース
船舶構造	船舶の長さ L	11.0(m)
	船の深さ D	1.22(m)
	船側外板厚 t	5.89(mm)
	横肋骨心距 a	500(mm)
	縦肋骨心距 b	500(mm)
	船首角度 2θ	70(°)
	船首傾斜部の長さ L_{sf}	1.52(m)
材料物性	ヤング率 E (曲げ弾性率)	1.2×10^6 (tf/m ²)
	ポアソン比 ν	0.336
圧壊荷重		72.3(kN)
有効軸剛性		0.47×10^5 (N/m)
衝突荷重(FEMA(2012))		635(kN)

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

$$(k = (b/a + a/b)^2)$$

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

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

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5. 1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5. 1. 7 FRP製船舶の衝突荷重の算出

【軸剛性の設定にあたり保守性を考慮する際の方針】

- 上記の軸剛性は、軸剛性設定にあつての各条件(構造及び材料物性)の妥当性は確認しているものの、設計へ適用するためには保守性を考慮する必要がある。そのため、以下の方針で保守性の考慮について整理した。
 - ✓ 材料物性であるヤング率及びポアソン比については、不確かさ及びばらつきがある条件であるため、それぞれ文献で確認した値の最大値を採用することで、保守性を考慮する。
 - ✓ 「土木学会(1994)」では、船首角度以外の条件は船舶の長さ L の関数として記載されている。そのため、妥当性を確認したケースの船舶の長さ11mとした場合の軸剛性を算出する。さらに、船舶の長さをさらに長くした場合の検討も行い、軸剛性の保守性を考慮する。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定

5.1.7 FRP製船舶の衝突荷重の算出

- 前頁の方針に従い保守性を考慮した軸剛性算出の各条件を下表に示す。
- その結果、保守性確認ケース1では 1.56×10^5 (N/m)、保守性確認ケース2では 1.74×10^5 (N/m)となり、保守性確認ケース2の方が大きく、p37で示した妥当性を確認したケースの軸剛性(0.47×10^5 (N/m))よりも3倍以上の値であることから、保守性確認ケース2の軸剛性(1.74×10^5 (N/m))を採用する。

項目	設定・算出方法	保守性確認ケース1	保守性確認ケース2	
船舶構造	船舶の長さ L	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」の総トン数5tの諸元(船の長さ)に加えて、その長さを超える場合も考慮	「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」の総トン数5tの諸元(船の長さ): 11.0(m)	「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会誌, 1978年)」から総トン数5tに最も近い船の長さ: 12.8(m)*
	船の深さ D	「土木学会(1994)」より $0.08 \times L$ にて算出	$0.08 \times 11.0 = 0.88$ (m)	$0.08 \times 12.8 = 1.02$ (m)
	船側外板厚 t	「土木学会(1994)」より $0.82\sqrt{L} + 2.5$ にて算出	$0.82 \times 11.0^{0.5} + 2.5 = 5.22$ (mm)	$0.82 \times 12.8^{0.5} + 2.5 = 5.434$ (mm)
	横肋骨心距 a	「土木学会(1994)」より $450 + 2L$ にて算出	$450 + 2 \times 11.0 = 472$ (mm)	$450 + 2 \times 12.8 = 475.6$ (mm)
	縦肋骨心距 b	「土木学会(1994)」より $550 + 2L$ にて算出	$550 + 2 \times 11.0 = 572$ (mm)	$550 + 2 \times 12.8 = 575.6$ (mm)
	船首角度 2θ	「土木学会(1994)」より $2\theta = 35 \sim 70^\circ$ とされていることを踏まえ、保守的になるよう 35° を採用	35°	
	船首傾斜部の長さ L_{sf}	「土木学会(1994)」より $0.25 \times D$ にて算出	$0.25 \times (0.08 \times 11) = 0.22$ (m)	$0.25 \times (0.08 \times 12.8) = 0.256$ (m)
材料物性	ヤング率 (曲げ弾性率)	以下の3つの文献で示されている値の最大 <ul style="list-style-type: none"> 「強化プラスチック船規則検査要領(日本海事協会, 2018年)」の曲げ弾性係数の判定基準 「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 「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 	1.22×10^6 (tf/m ²)	
	ポアソン比	「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)で示されている値の最大	0.358	
圧壊荷重		34.3 (kN)	44.5 (kN)	
有効軸剛性		1.56×10^5 (N/m)	1.74×10^5 (N/m)	
衝突荷重(FEMA(2012))		1156 (kN)	1221 (kN)	

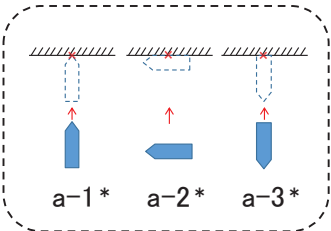
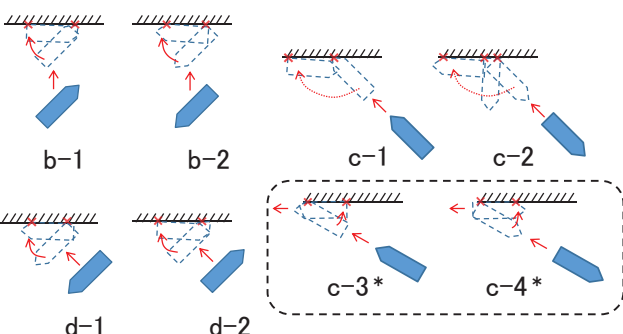
注記*: 総トン数5tの船舶に12.8mの長さを用いることの保守性については参考6に示す。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認

5.2.1 船舶の衝突形態の整理

- 船舶は本質的に浮く構造であるため、漂流物となって襲来する際には複雑な挙動となることが想定される。また、船舶は車両に比べて長軸と短軸が明瞭であることから、衝突形態による荷重への影響を衝突解析により確認する。
- まず、船舶の衝突形態の特徴について、下表のとおりまとめた。
- これらの衝突パターンのうち、b、c及びdシリーズは荷重が分散する等の影響により、aシリーズに含まれる事象と考えられる。また、aシリーズのうち、真横(a-2)は衝突幅から施設に衝突しないか、施設が負担する荷重が小さくなるため、船首(a-1)及び船尾(a-3)で衝突する場合が厳しくなると考えられる。
- ただし、衝突形態の影響を確認するため、船首(a-1)、真横(a-2)、船尾(a-3)の3ケースに加えて、斜め船首(c-3)及び斜め船尾(c-4)を加えた5ケースの衝突解析を実施する。

船舶の衝突形態の特徴

衝突パターン	衝突形態の特徴
	<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。
	<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度を超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。

注記* : 衝突解析を実施する衝突パターン

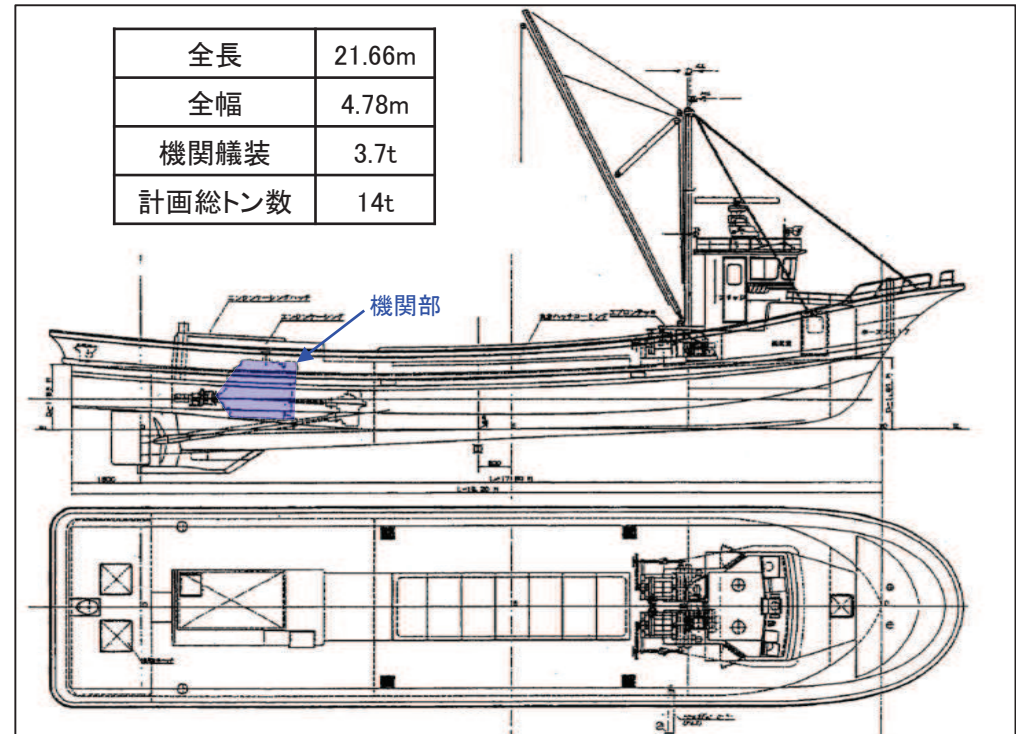
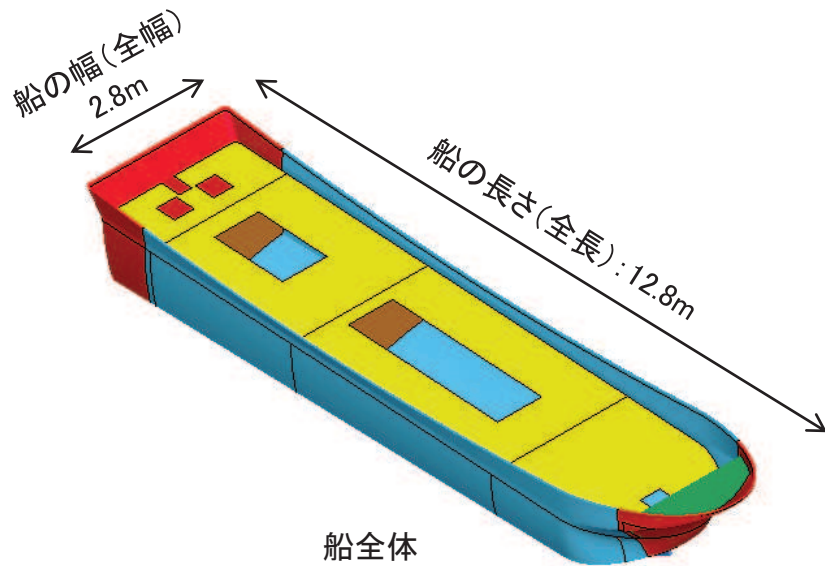
5. 2. 2 FRP製船舶のモデル化

検討方法

FRP製船舶を対象に、船首からの衝突、船尾からの衝突、船舶真横からの衝突、斜め船首からの衝突及び斜め船尾からの衝突について、衝突解析を実施し、衝突形態の影響について確認する。

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。



「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. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認

5.2.3 FRP製船舶の衝突解析

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

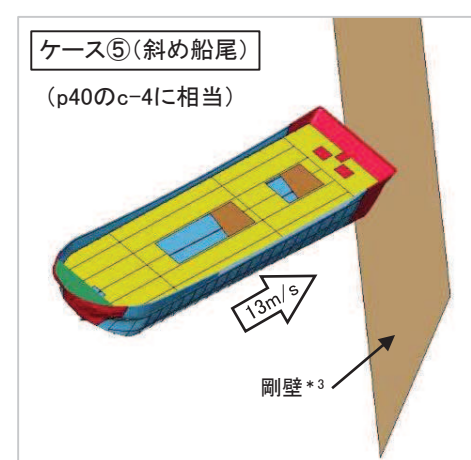
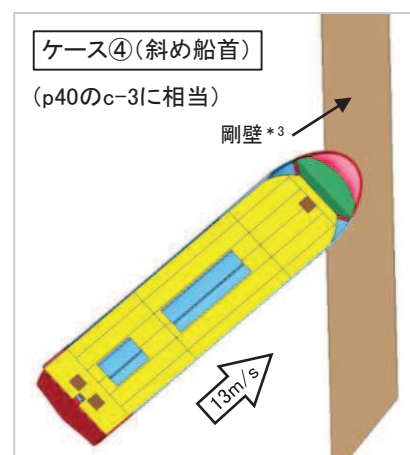
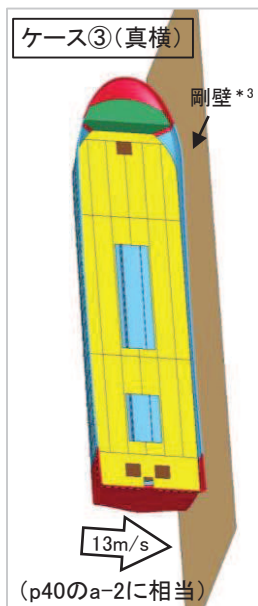
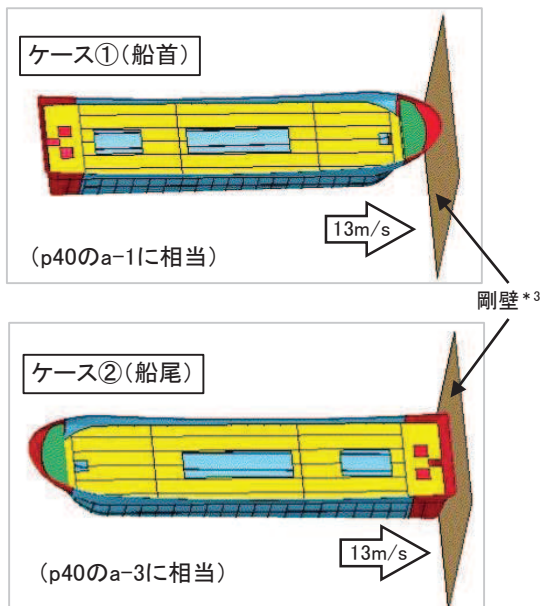
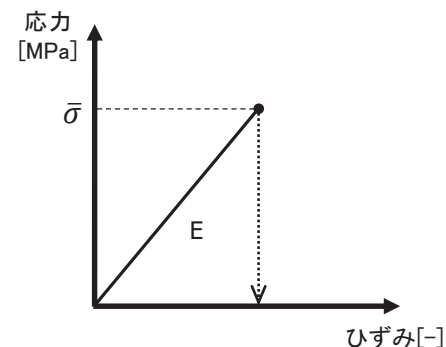
- 注記 *1:p39から設定
 *2:「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」より設定
 *3:p39から保守的に設定

解析ケース

解析ケースは下図のとおりで、いずれのケースも衝突速度(絶対値)は13m/sとする。

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。

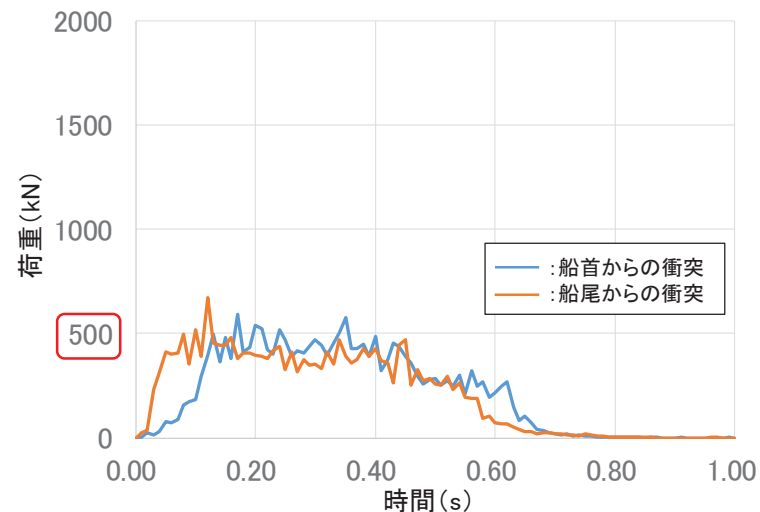


注記*3:剛壁は変形・移動しない条件とし、ヤング率200GPa, ポアソン比0.3の鋼製の塊としている。

5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認
 5.2.4 各衝突形態の比較(1/5)

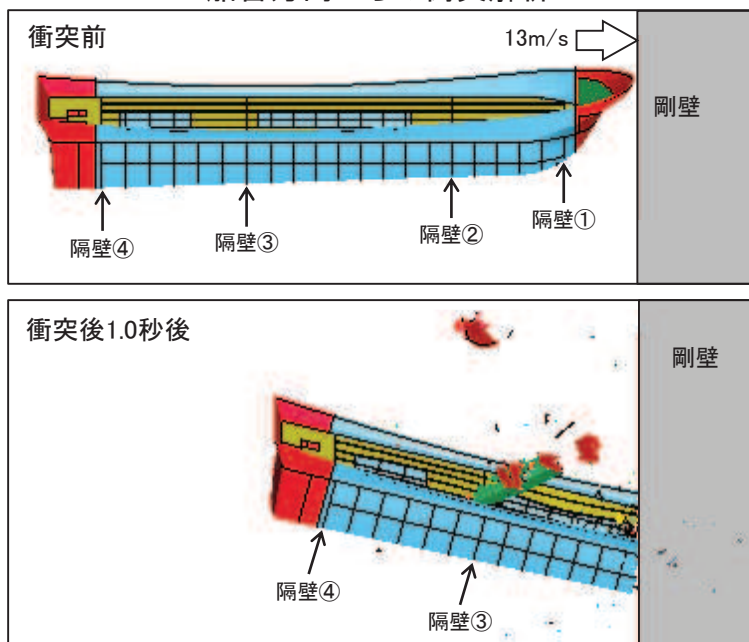
ケース①(船首)及びケース②(船尾)の解析結果

- ✓ ケース①(船首)及びケース②(船尾)の結果, どちらの衝突形態の荷重も500kN程度(瞬間最大で約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7に示す)。
- ✓ また, 力積については, ケース①(船首)が約214(kN・s), ケース②(船尾)が約211(kN・s)であり, 力積からも同等であることが分かった。
- ✓ 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。

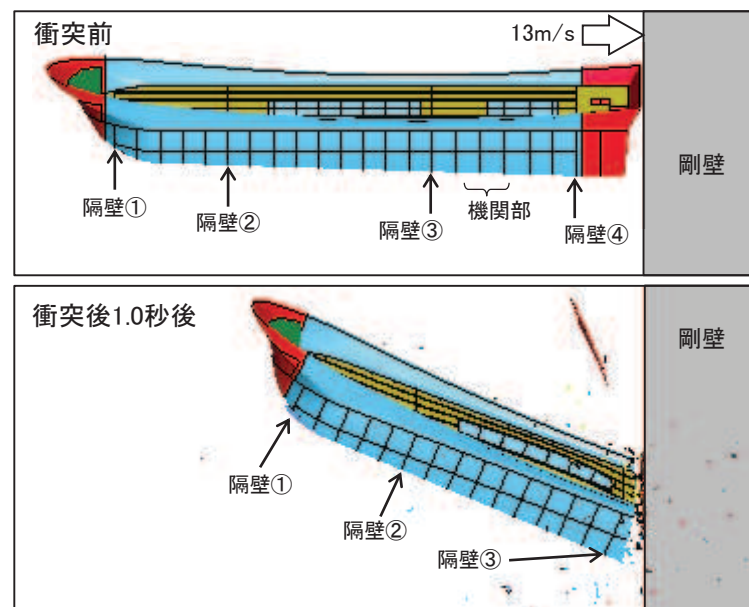


衝突荷重の時刻歴(船首, 船尾)

船首方向からの衝突解析



船尾方向からの衝突解析

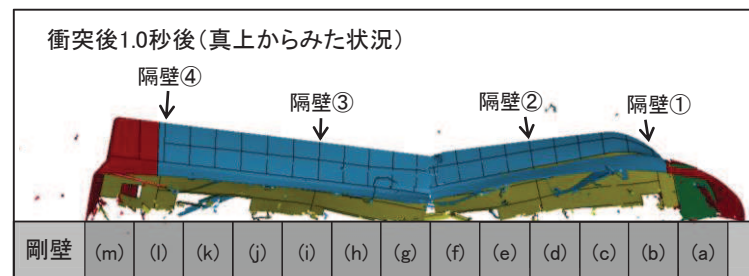
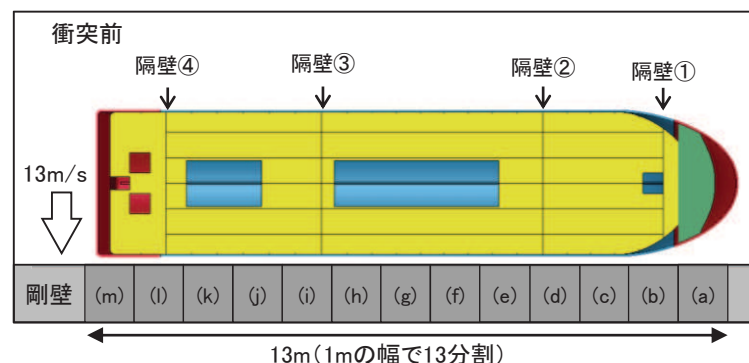


5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認

5.2.4 各衝突形態の比較(2/5)

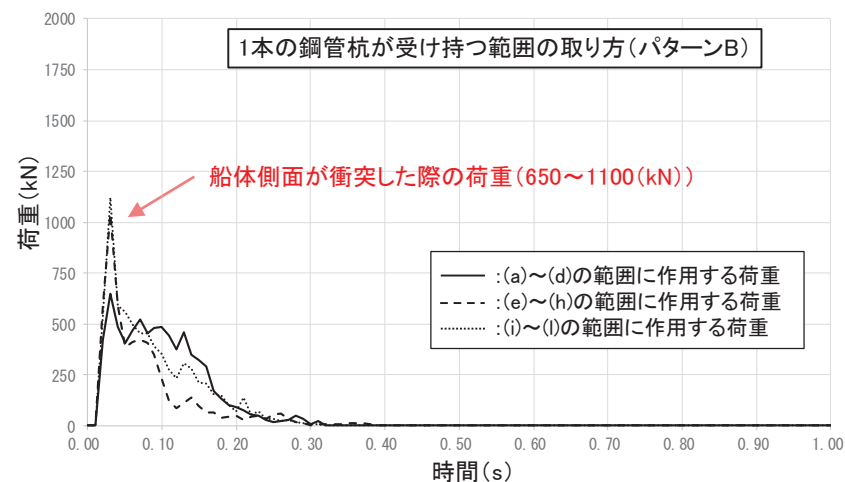
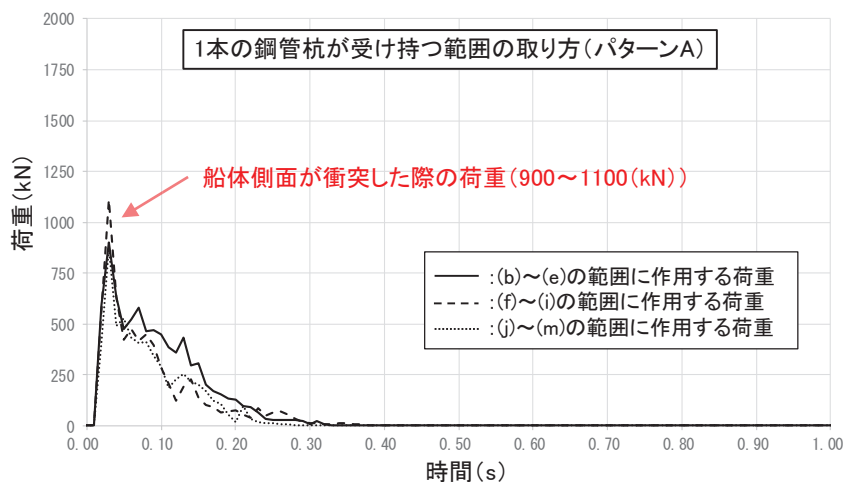
ケース③(真横)の解析結果

- ✓ ケース③(真横)の結果から、船舶の長さ(12.8m)全体で剛壁に荷重が作用しており、およそ船舶の長さの分布荷重となっていることが分かった(解析結果の詳細は参考7に示す)。防潮堤(鋼管式鉛直壁)の鋼管杭1本が受け持つ幅は4mであることから、真横から衝突する場合には鋼管杭3本以上で衝突荷重を分担することになる。
- ✓ そのため、鋼管杭1本が受け持つ荷重を確認する必要があることから、右図のように剛壁を1mの幅で分割し、鋼管杭1本が受け持つ荷重について整理した。なお、鋼管杭が受け持つ荷重については、右図のように2パターンの取り方を考え、それぞれ確認した。
- ✓ 衝突荷重は、パターンAとパターンBともに、船体側面が衝突する0.03秒前後で瞬間的に650~1100(kN)の衝突荷重が作用しているが、この荷重は他の衝突形態で生じる荷重に比べて極めて作用時間が短い現象である。また、荷重作用継続時間も0.2秒程度であり、他の衝突形態に比べて半分以下である。
- ✓ また、力積については、パターンAでは約76(kN・s)が最大で、パターンBでは約82(kN・s)が最大であるが、ケース①(船首)又はケース②の力積に比べて小さく、半分以下となっていることが分かった。なお、パターンAとパターンBともに、最大荷重となる範囲と力積が最大となる範囲は異なり、力積が最大となる約82kN・sの最大荷重は約900kNである。



1本の鋼管杭が受け持つ範囲の取り方(パターンA)

1本の鋼管杭が受け持つ範囲の取り方(パターンB)

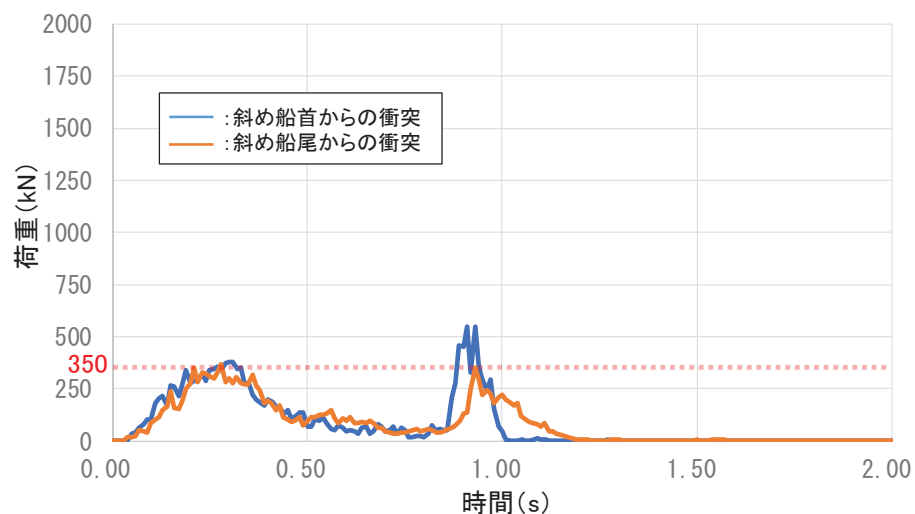


5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認

5.2.4 各衝突形態の比較(3/5)

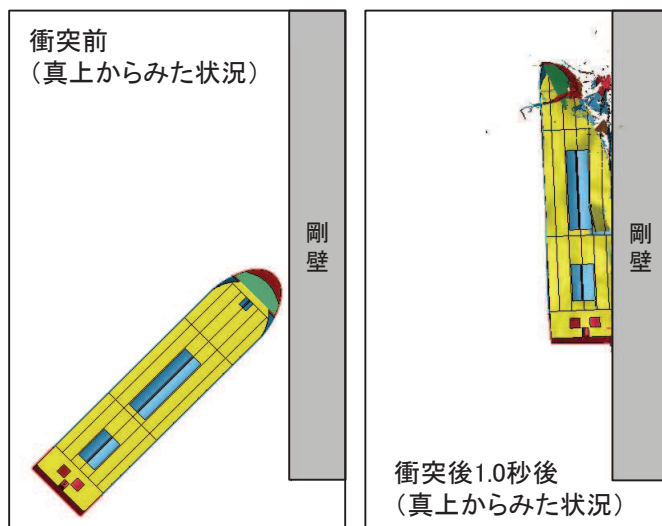
ケース④(斜め船首)及びケース⑤(斜め船尾)の解析結果

- ✓ ケース④(斜め船首)及びケース⑤(斜め船尾)の結果, どちらの衝突形態も初期段階では350kN程度(瞬間最大で約380kN)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7に示す)。
- ✓ 斜め船首及び斜め船尾のどちらも衝突後0.9秒付近で衝突荷重が大きくなる特徴があり, 最大で約550kN(斜め船首衝突)となっている。これは, どちらの衝突形態においても斜めから衝突した後に船体が剛壁に平行となる方向に回転し, 船体側面が衝突することにより瞬間的に生じるためである。
- ✓ また, 力積については, ケース④(斜め船首)が約166(kN・s), ケース②(斜め船尾)が約164(kN・s)であり, 力積からも同等であることが分かった。これらの力積は, ケース③(真横)のほぼ倍の値であるが, ケース①(船首)又はケース②(船尾)よりも小さい値となっている(船舶が剛壁に衝突した後, 剛壁から離れる方向に速度をもって移動していくため, 船舶の持つエネルギーがすべて荷重に変換されなかったことによるものである)。

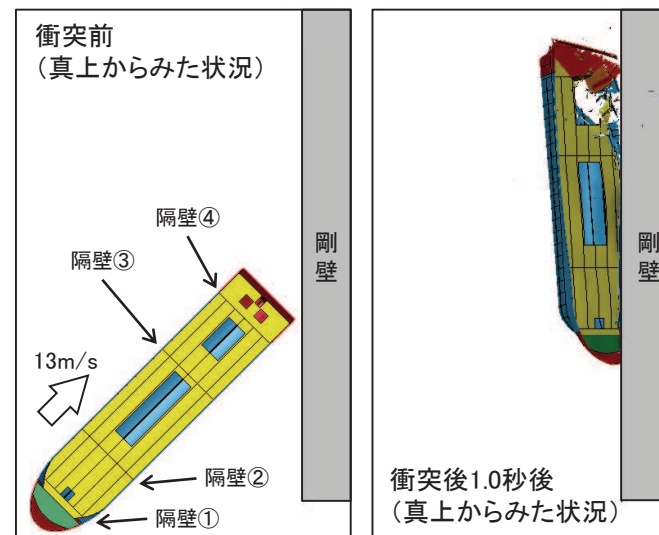


衝突荷重の時刻歴(斜め船首, 斜め船尾)

斜め船首方向からの衝突解析



斜め船尾方向からの衝突解析



5. 漂流物による衝突荷重の算定 5.2 FRP製船舶の衝突形態による影響の確認

5.2.4 各衝突形態の比較(4/5)

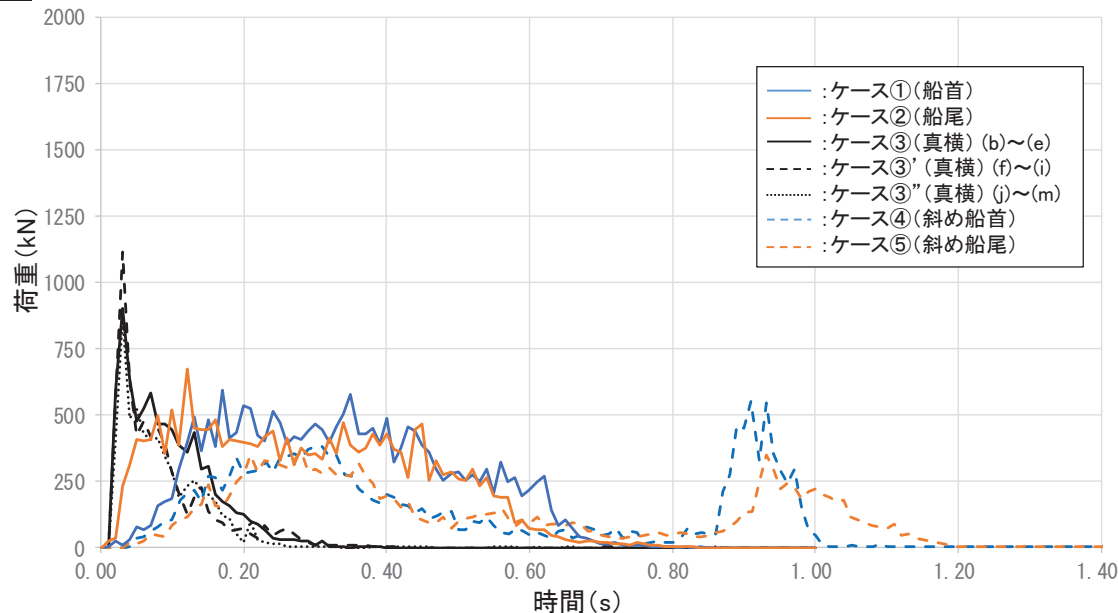
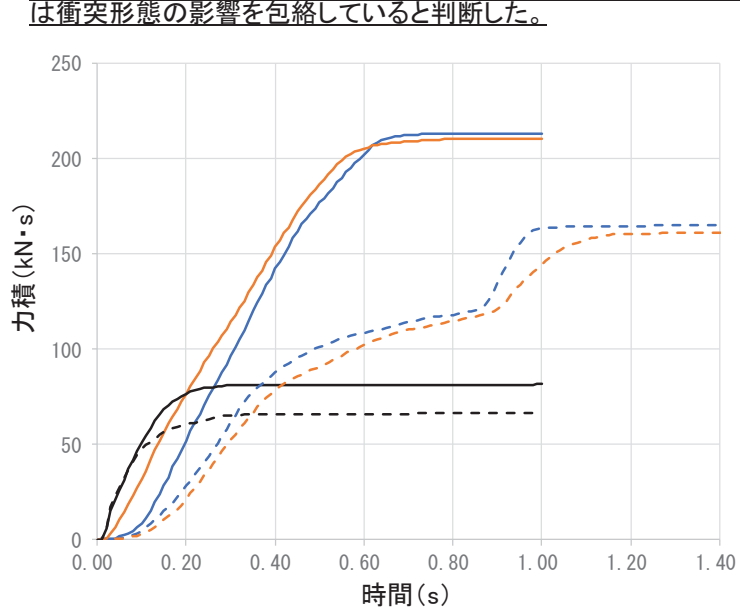
FRP製小型船舶の衝突形態による影響確認(まとめ)

- 衝突解析の結果から、各ケースの力積、瞬間最大荷重及び衝突荷重の作用継続時間については表のとおりである。また、力積と衝突荷重の時刻歴を下に示す。衝突荷重を考慮する浸水防護施設は、衝突荷重を静荷重として設計する方針であることから、これらの項目のうち、力積が最大となるケースが重要である。
- 左下の力積の時刻歴からケース①(船首)とケース②(船尾)が大きく、わずかにケース①(船首)が最大であることを確認した。一方、瞬間最大荷重が作用するケース③(真横)については、他のケースに比べて小さいことが分かる。
- 力積が大きいケース①(船首)及びケース②(船尾)の瞬間最大荷重は、「5.1 FRP製船舶の有効軸剛性の設定」で示した「土木学会(1994)」の方法で軸剛性を設定し、FEMA(2012)により算出した衝突荷重のうち、妥当性を確認したケース(635(kN))とほぼ同等であり、瞬間的に作用する荷重と同等の荷重を静荷重として考慮することになるため、保守性を有していると判断できる。さらに、「5.1」の保守性を考慮したケースでは1221(kN)であり、ほぼ倍の荷重となっていることから、十分な保守性を有していると判断した。
- また、衝突荷重は分布荷重として作用しており、特に顕著なのはケース③(真横)であった。設計においては、衝突荷重を集中荷重として考慮する方針であることから、この点からも保守性を有していると判断した。
- なお、ケース③の瞬間最大荷重(約1100(kN))も上述の1221(kN)に包絡されることを確認した。

ケース	衝突形態	力積 (kN・s)	瞬間最大荷重 (kN)	衝突荷重の作用継続時間 (s)
①	船首方向	約214	約600	約0.7
②	船尾方向	約211	約670	約0.6
③	真横	約82	約900*	約0.3
④	斜め船首	約166	約550	約1.0
⑤	斜め船尾	約164	約370	約1.2

注記* : 瞬間最大荷重約1100kNの際の力積は約67kN・s(ケース③')である。

以上のことから、「J」の保守性を考慮したケースの軸剛性(衝突荷重)は衝突形態の影響を包絡していると判断した。



5.2.4 各衝突形態の比較(5/5)

- 船舶の衝突形態の検討において実施した衝突解析のうち、力積が大きくなるケース①(船首)及びケース②(船尾)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。

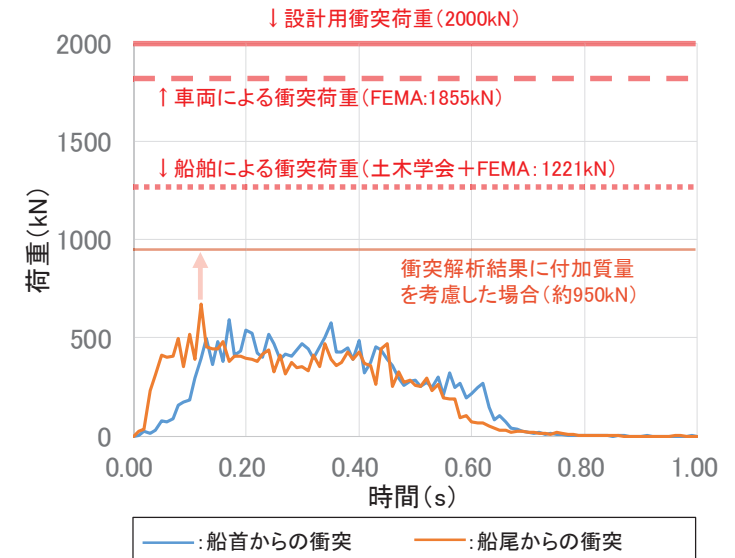
土木学会(1994)から軸剛性を設定してFEMA(2012)により算定した荷重との比較

- ✓ 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

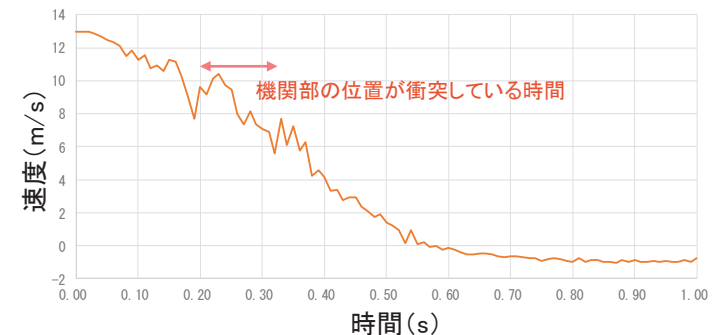
$$F = 1.3 \times v \times \sqrt{k \times m \times (1 + C)}$$

F : 衝突力(=1221kN) 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 × 10⁵N/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。



5.3 設計用衝突荷重の設定

- 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	有効軸剛性(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)	1.74 × 10 ⁵	1221 【1.63】	1221 【1.63】	1221 【1.63】	1221 【1.63】
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3)。

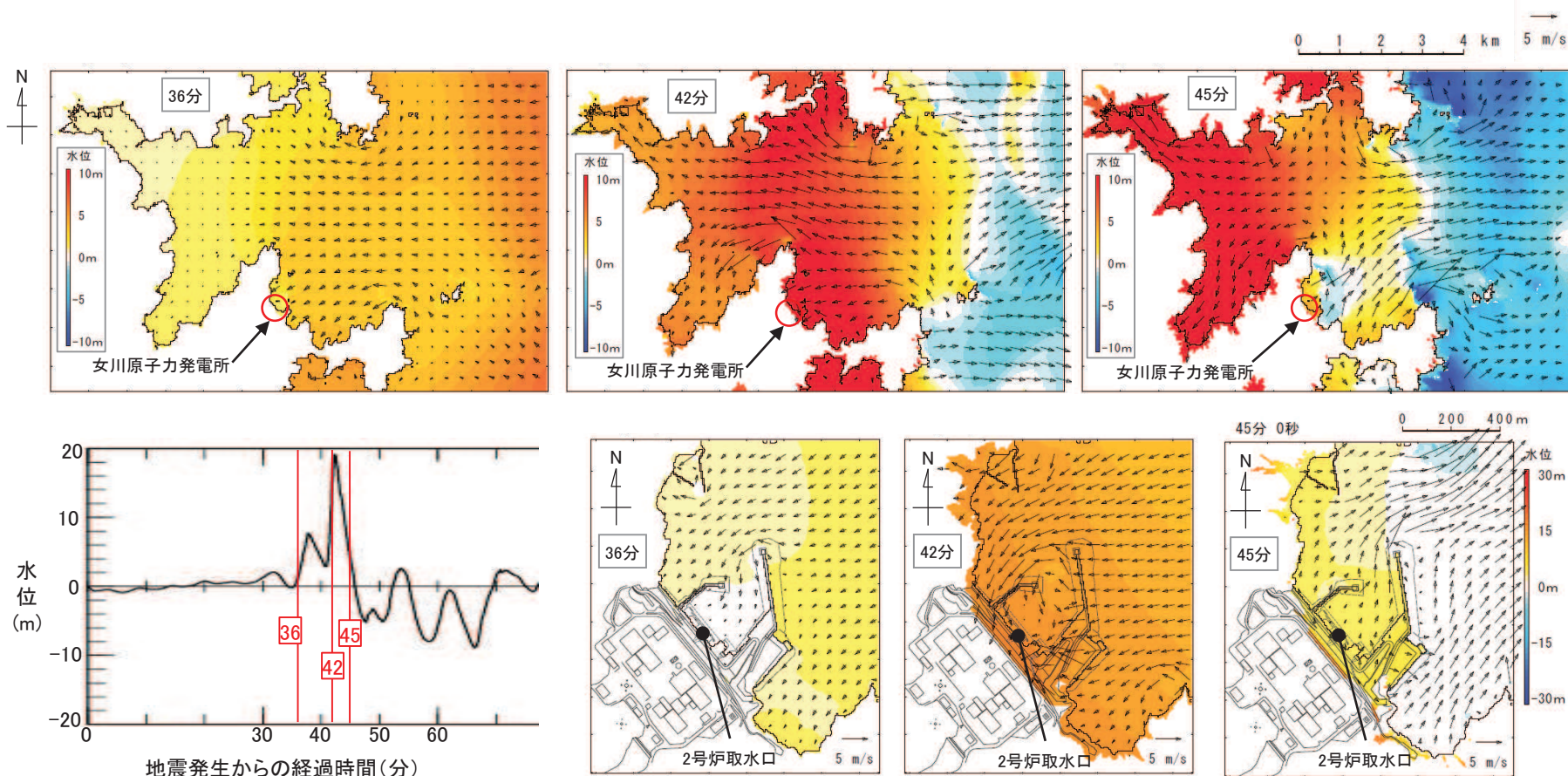
*3: 仮に発電所周辺の最大流速13m/sとしたとしても727kNであり、他の衝突荷重よりも小さく、設計用衝突荷重に包絡されることを確認。

【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 滑動により衝突する漂流物の衝突荷重算定方法
- 参考4 FEMA(2012)に用いる車両の有効軸剛性の妥当性について
- 参考5 船の深さ, 船首傾斜部の長さ及び船首角度について
- 参考6 総トン数5tの漁船の長さに関する保守性について
- 参考7 衝突解析を用いた衝突形態の検討

【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。

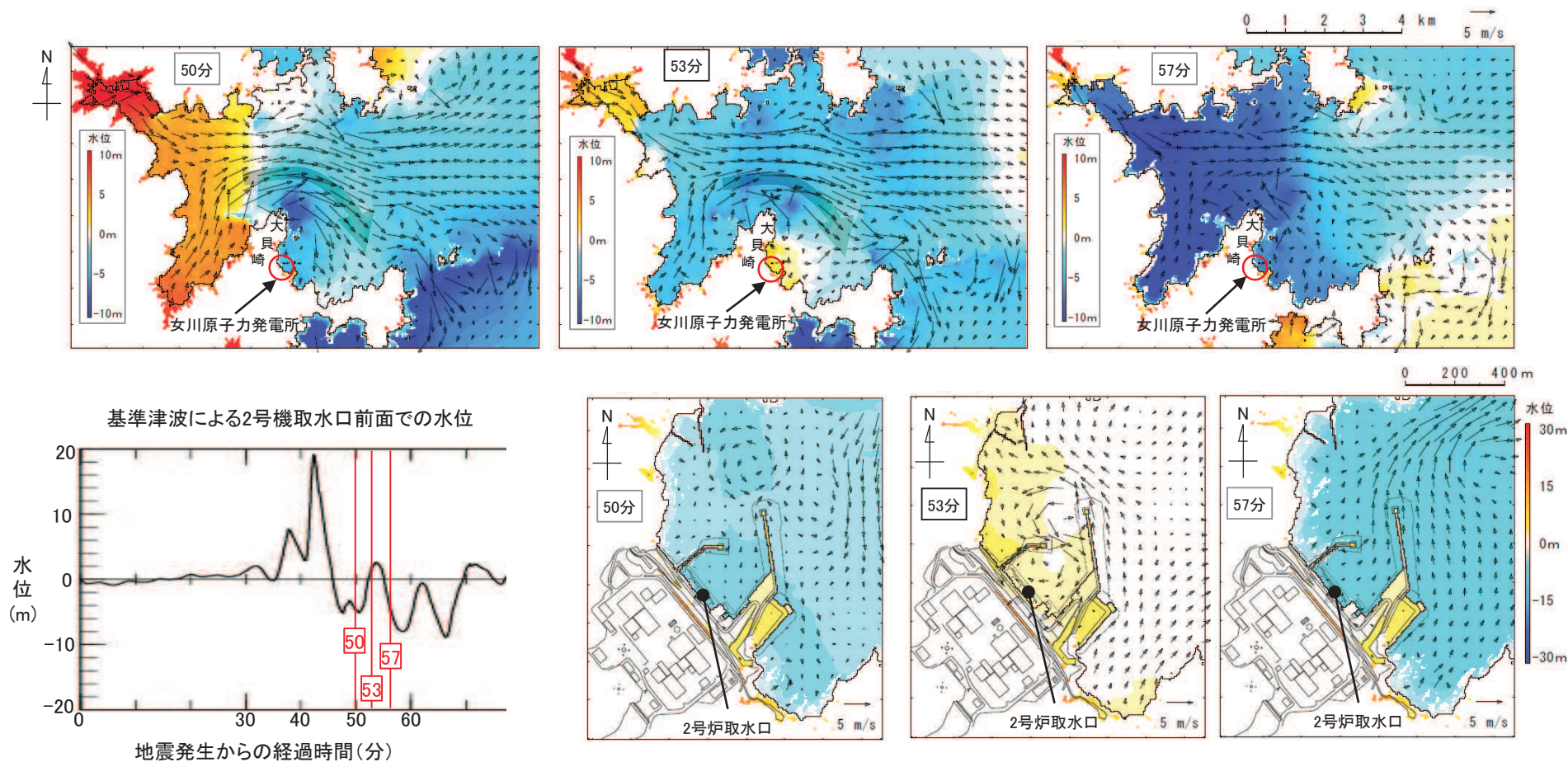
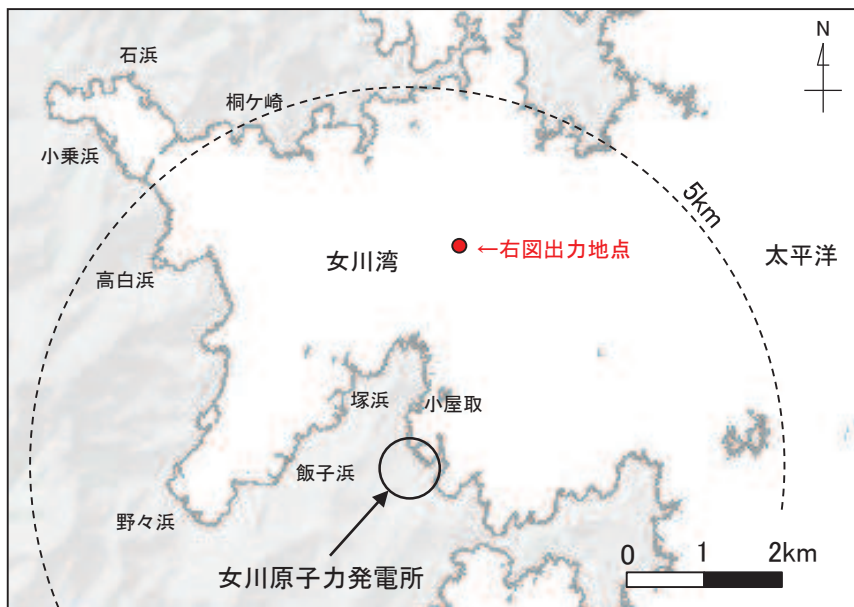


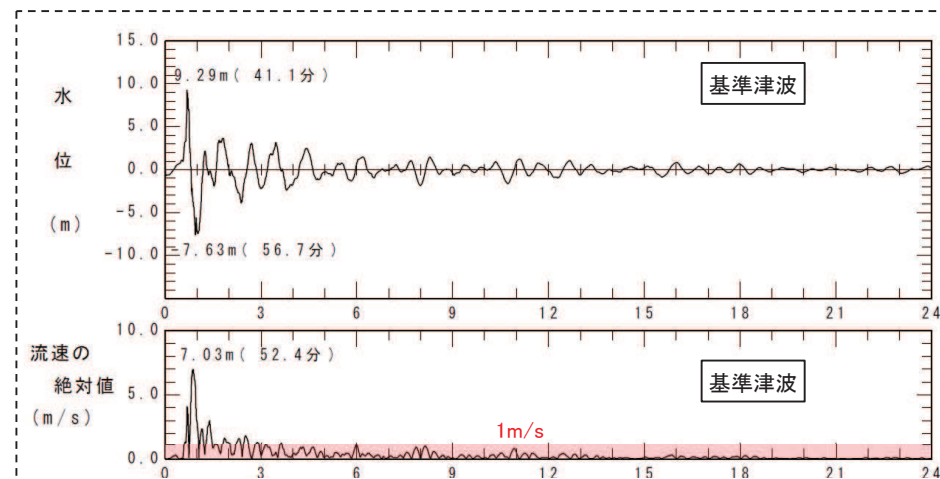
図 発電所周辺海域の水位・流向ベクトル(基準津波)

【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。

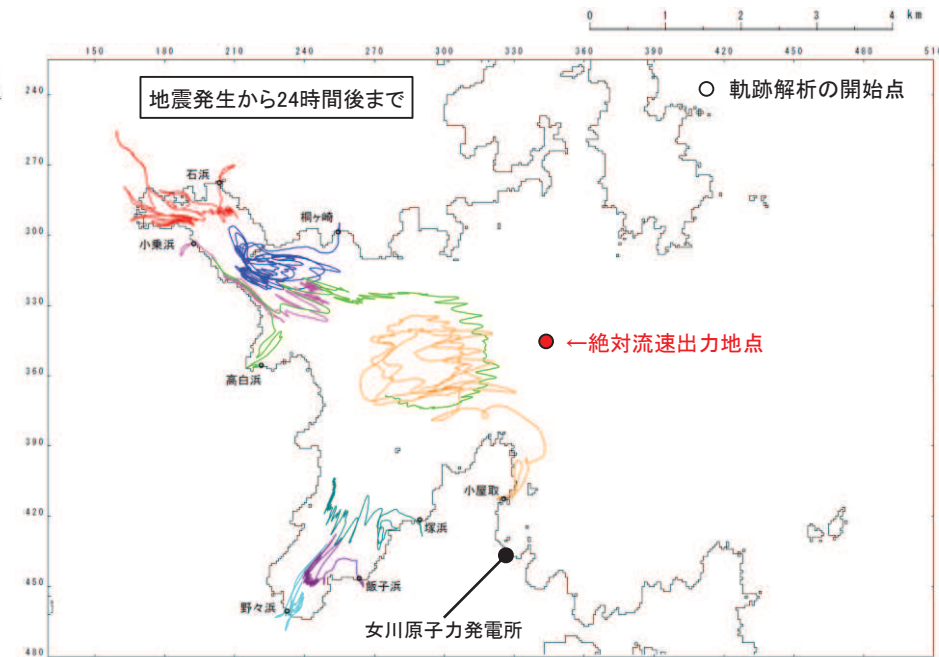
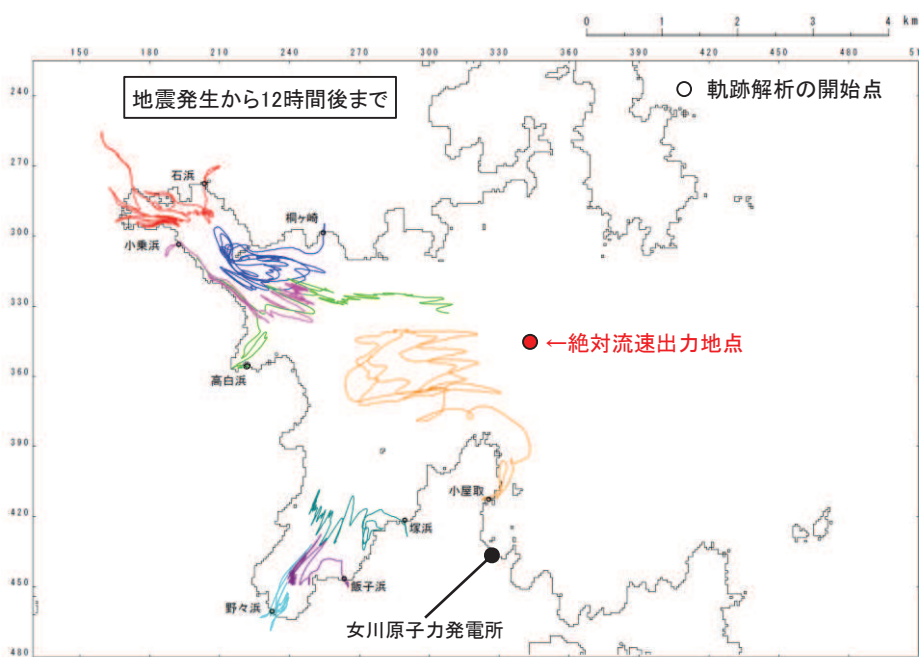
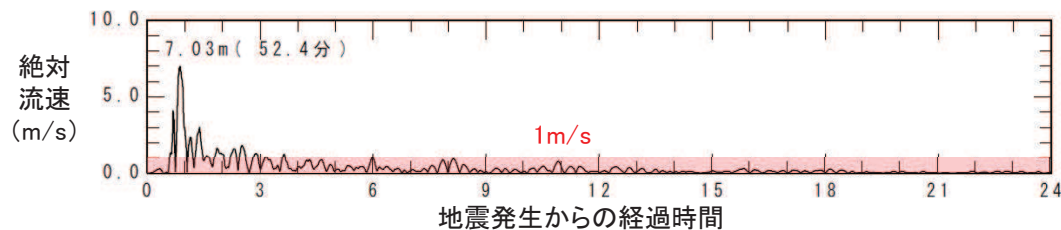


【水位及び流速の絶対値の出力点位置】



【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。

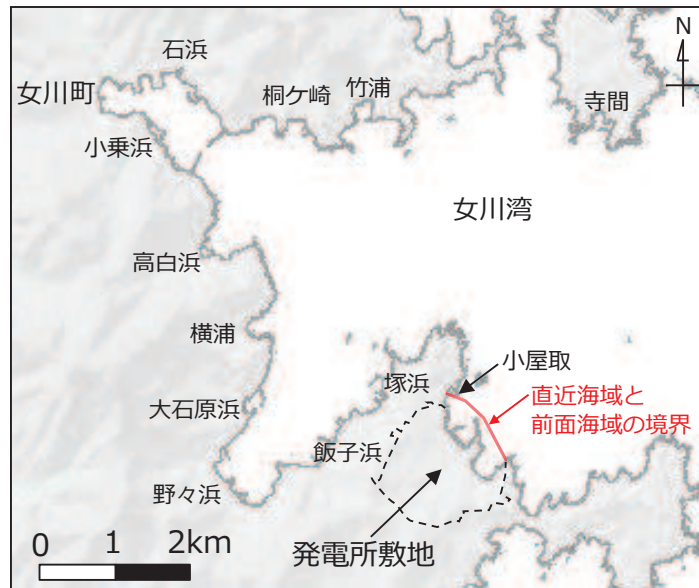


軌跡解析結果(基準津波)

【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)。

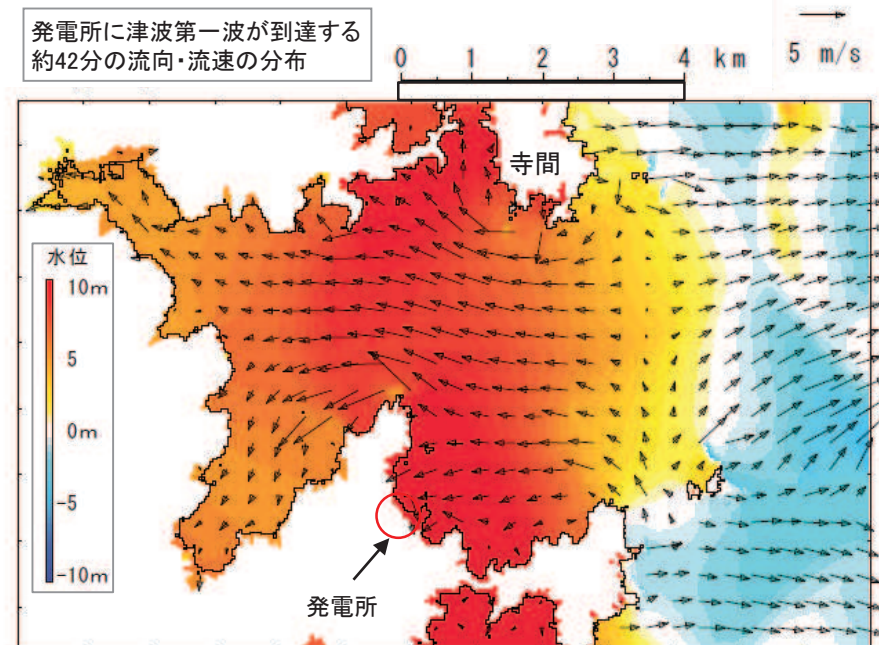


女川原子力発電所周辺

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) 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)

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。

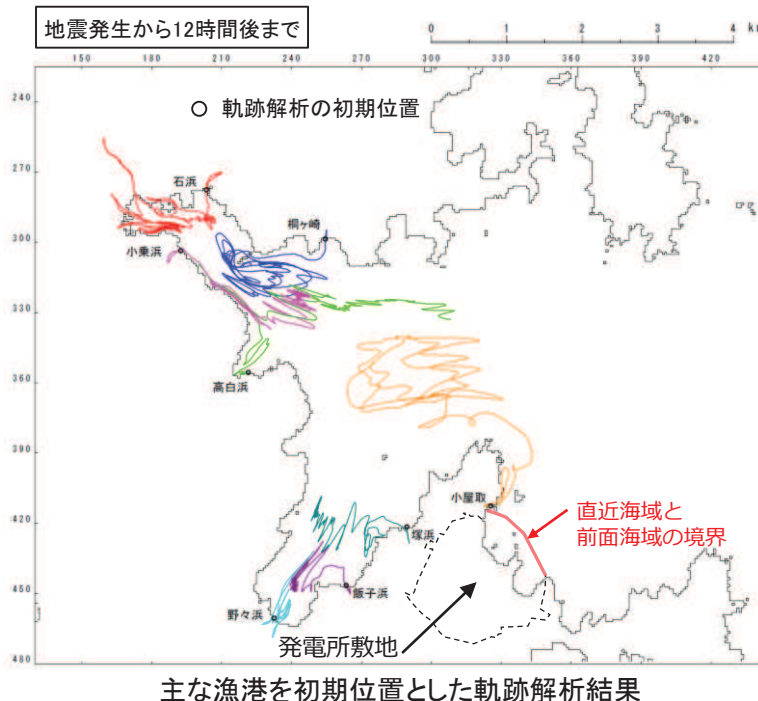
「前面海域」の漂流物に選定

【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

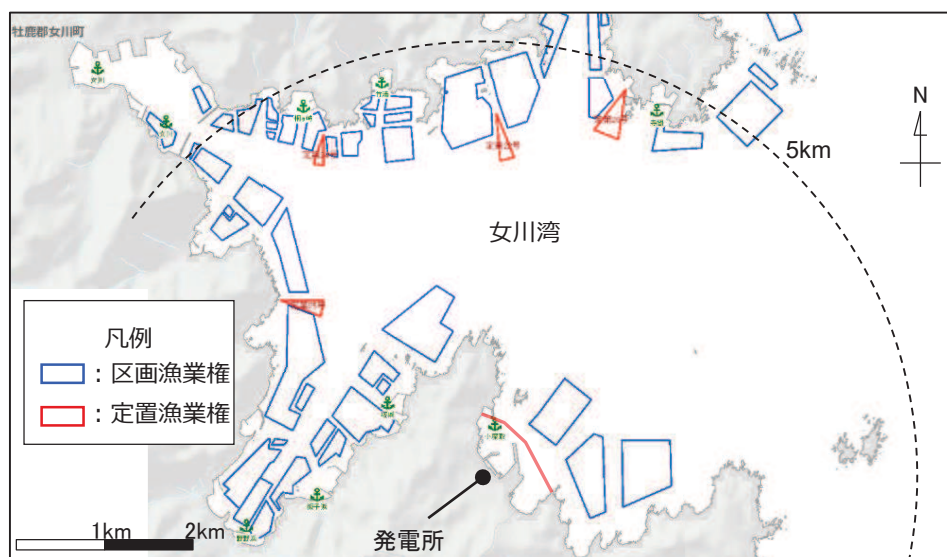
係留状態では、第二波以降の津波によって時間をかけて敷地到達する。

「前面海域」の漂流物に選定

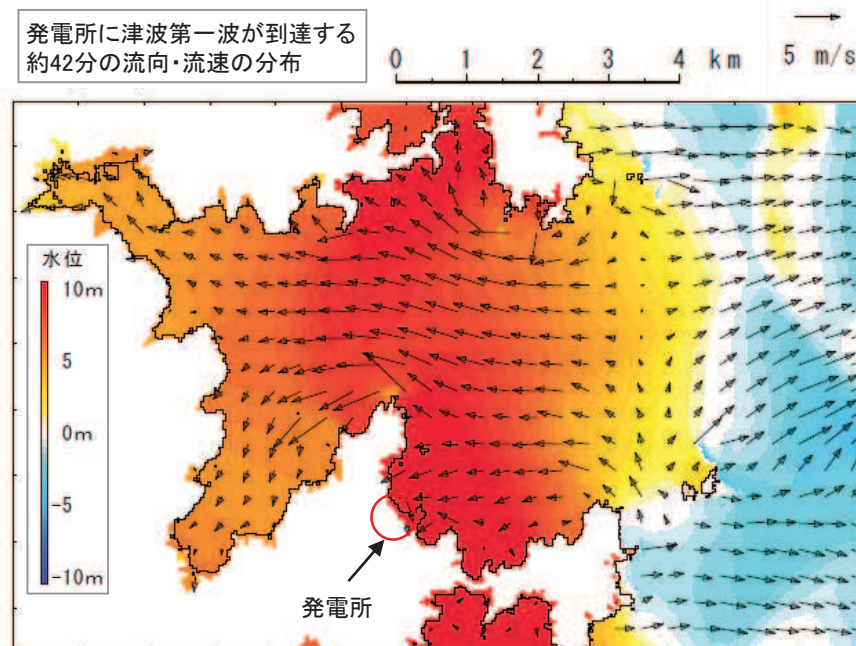
前頁までの検討では、各地区(漁港含む)の陸域及び漁港に係留されている漁船を対象としたものであった。一方、漁船については海域で漁をしている又は航行・退避中であることが考えられるため、これらの状態(前面海域)について整理した。

【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。

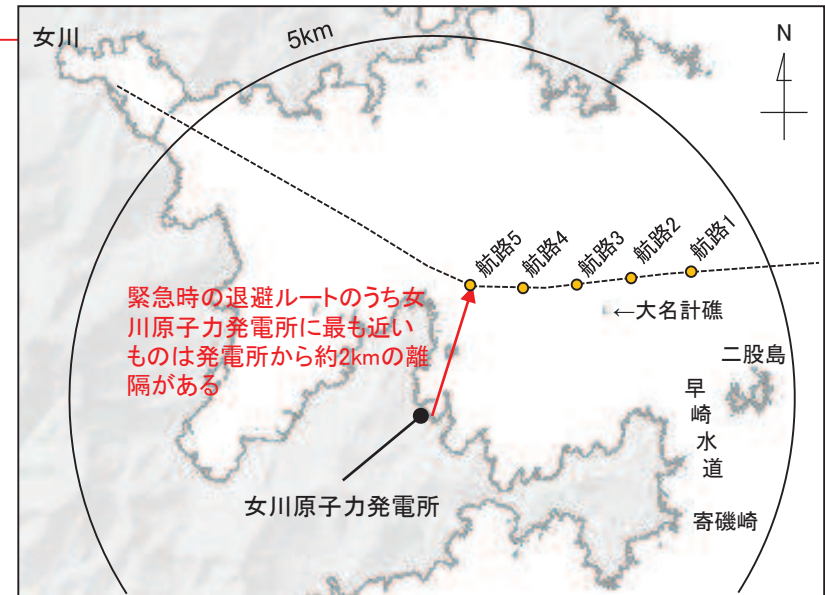


発電所周辺の区画・定置漁業権範囲

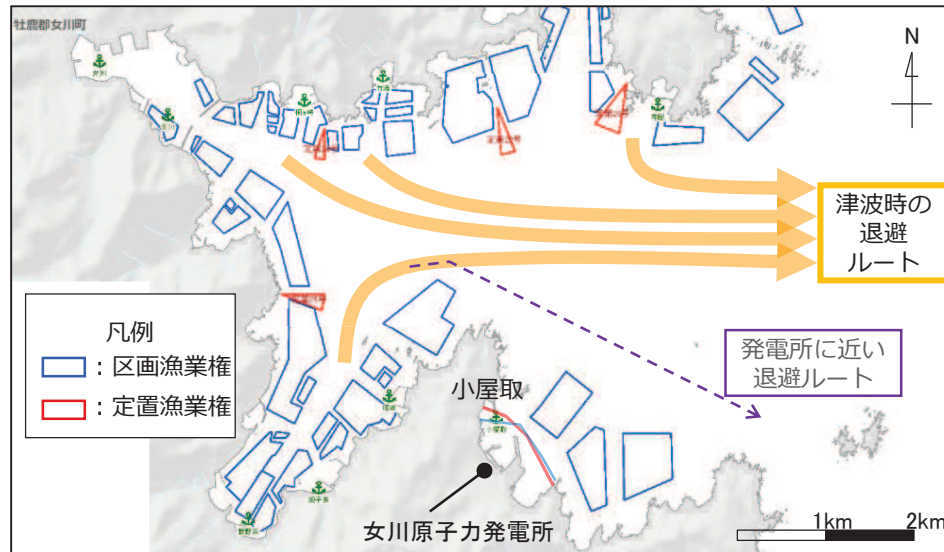


【参考2】漂流物の初期配置(5/11)

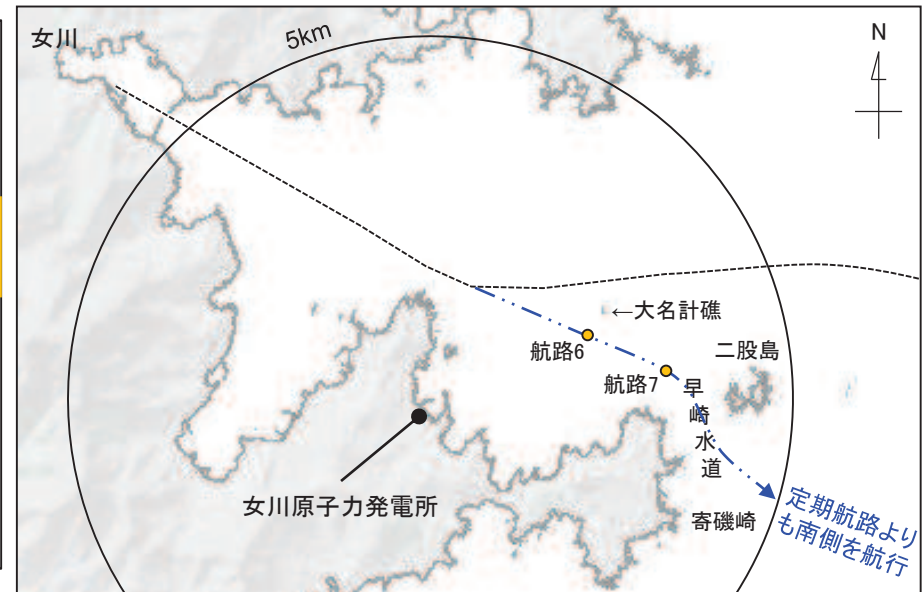
- なお、流向・流速の観点から確認するため、次頁以降で水粒子の動きを把握する方法である軌跡解析を実施した。軌跡解析を行うための初期位置については以下の内容を踏まえ、右上及び右下の図の位置とした。
- ✓ 発電所の前面は小屋取漁港及び発電所の航路となっていること及び区画漁業権があり、発電所が立地する小規模な湾内には小屋取漁港の小型漁船(FRP)よりも大きな漂流物はない。
- ✓ 発電所よりも西側の漂流物は発電所に到達する可能性は低いが、西側の漁船が津波警報時に退避する場合、下図のような区画・定置漁業権範囲の漁具を避けたルートを通ると考えられることから、敷地前面付近を退避中に故障により航行不能となることを想定し、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



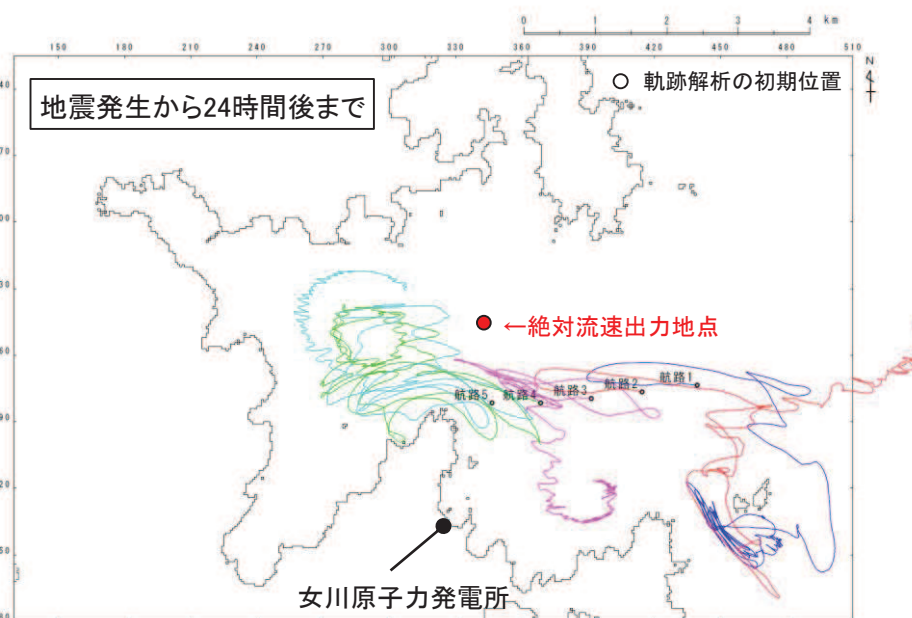
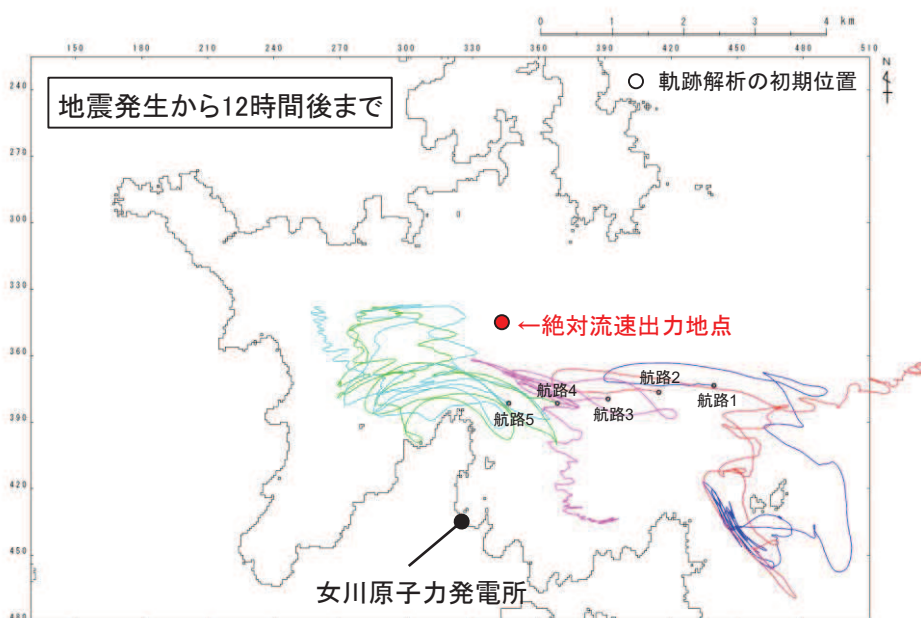
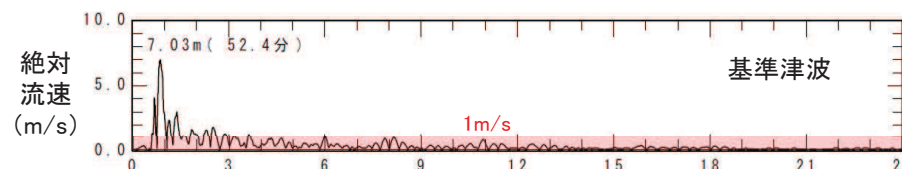
軌跡解析の水粒子の初期位置(2/2)

【参考2】漂流物の初期配置(6/11)

59

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。

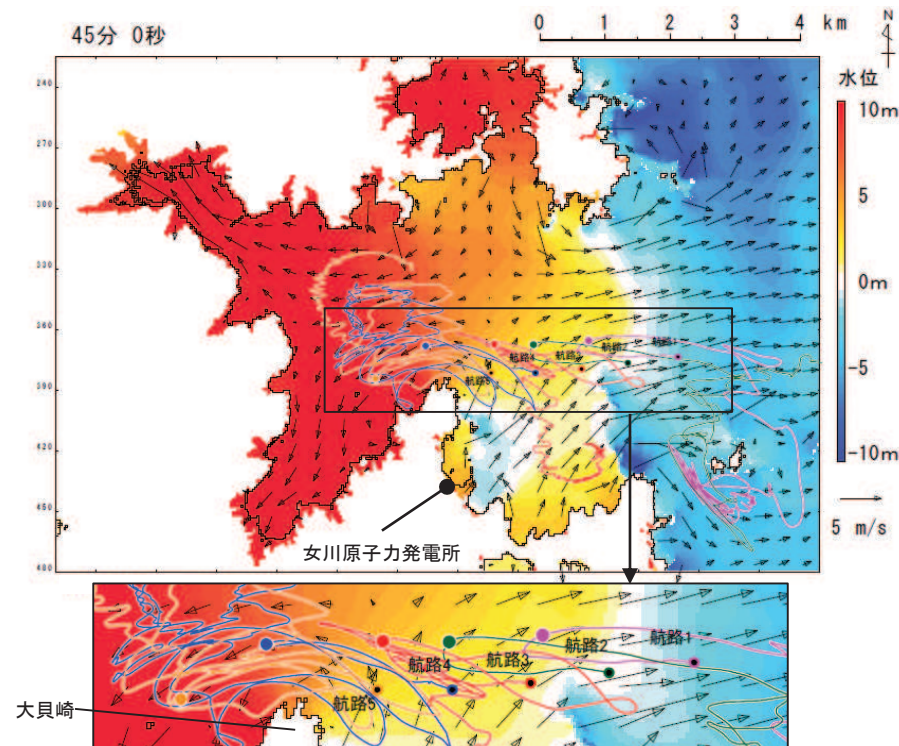
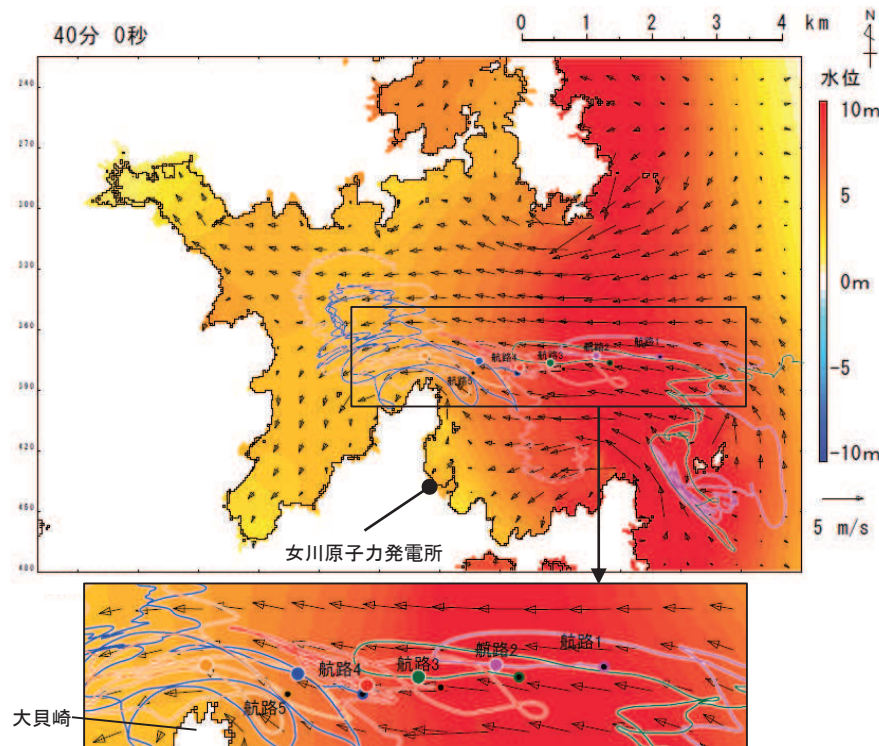


軌跡解析結果

【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。

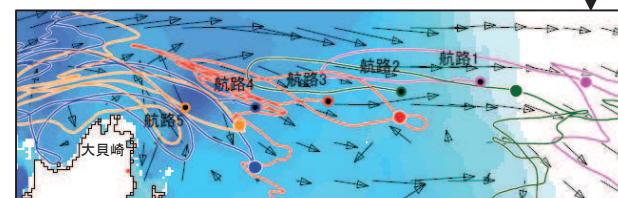
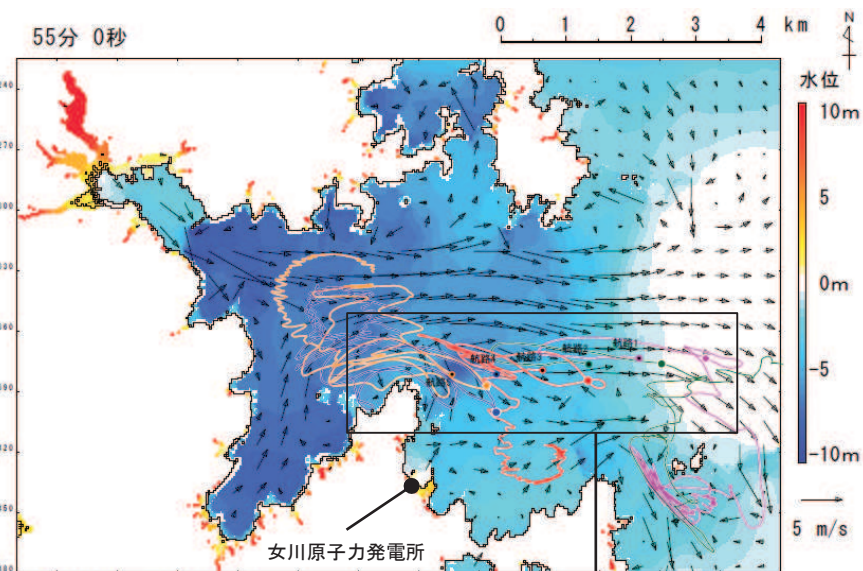
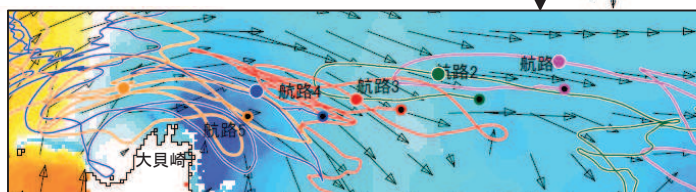
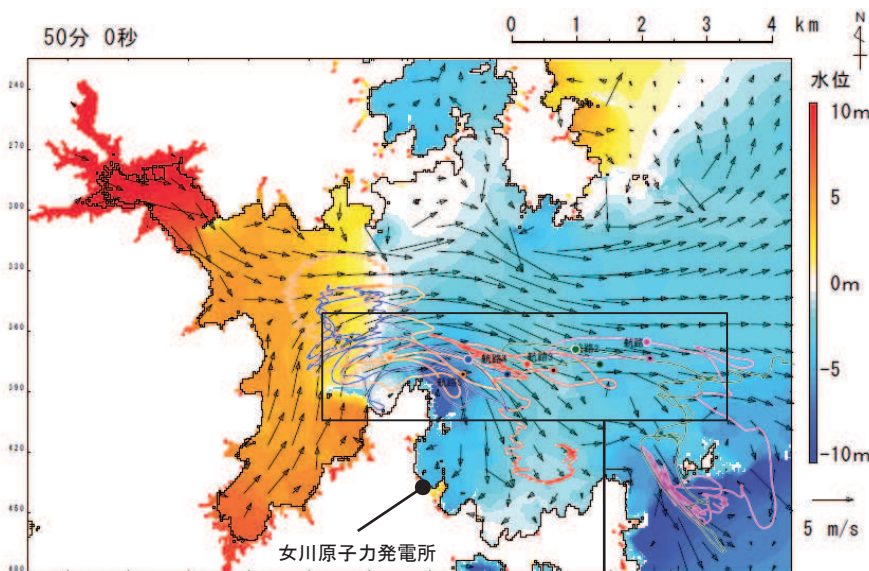
	航路1	航路2	航路3	航路4	航路5
40分後	津波の第一波の影響を受けて、解析開始位置から西側へ移動する。	津波の第一波の影響を受けて、解析開始位置から西側へ移動する。	津波の第一波の影響を受けて、解析開始位置から西側へ移動する。	津波の第一波及び大貝崎の地形の影響を受けて、解析開始位置から西北西側へ移動する。	津波の第一波及び大貝崎の地形の影響を受けて、解析開始位置から西北西側へ移動する。
45分後	女川湾の湾口では寄せ波から引き波に転じており、さらに発電所が立地する地形からの反射波の影響を受けてやや北東側へ移動する。	女川湾の湾口では寄せ波から引き波に転じており、さらに発電所が立地する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。

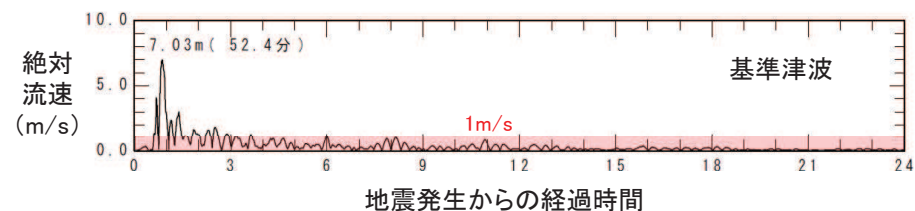
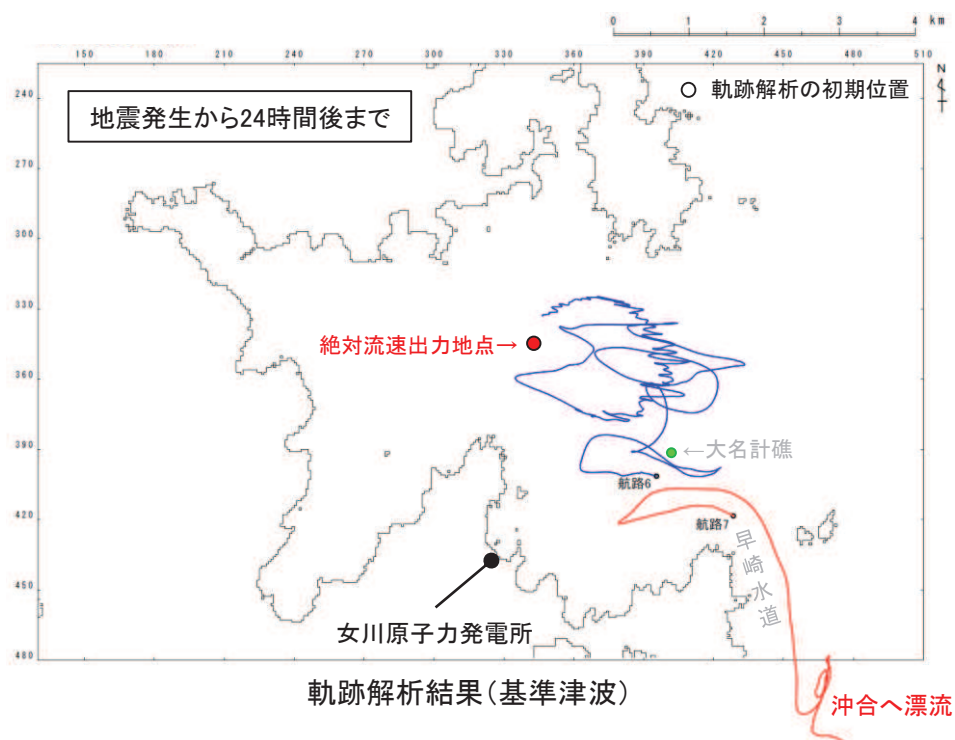


【参考2】漂流物の初期配置(9/11)

62

第692回審査会合 (H31.3.12)
資料1-4 p91 抜粋

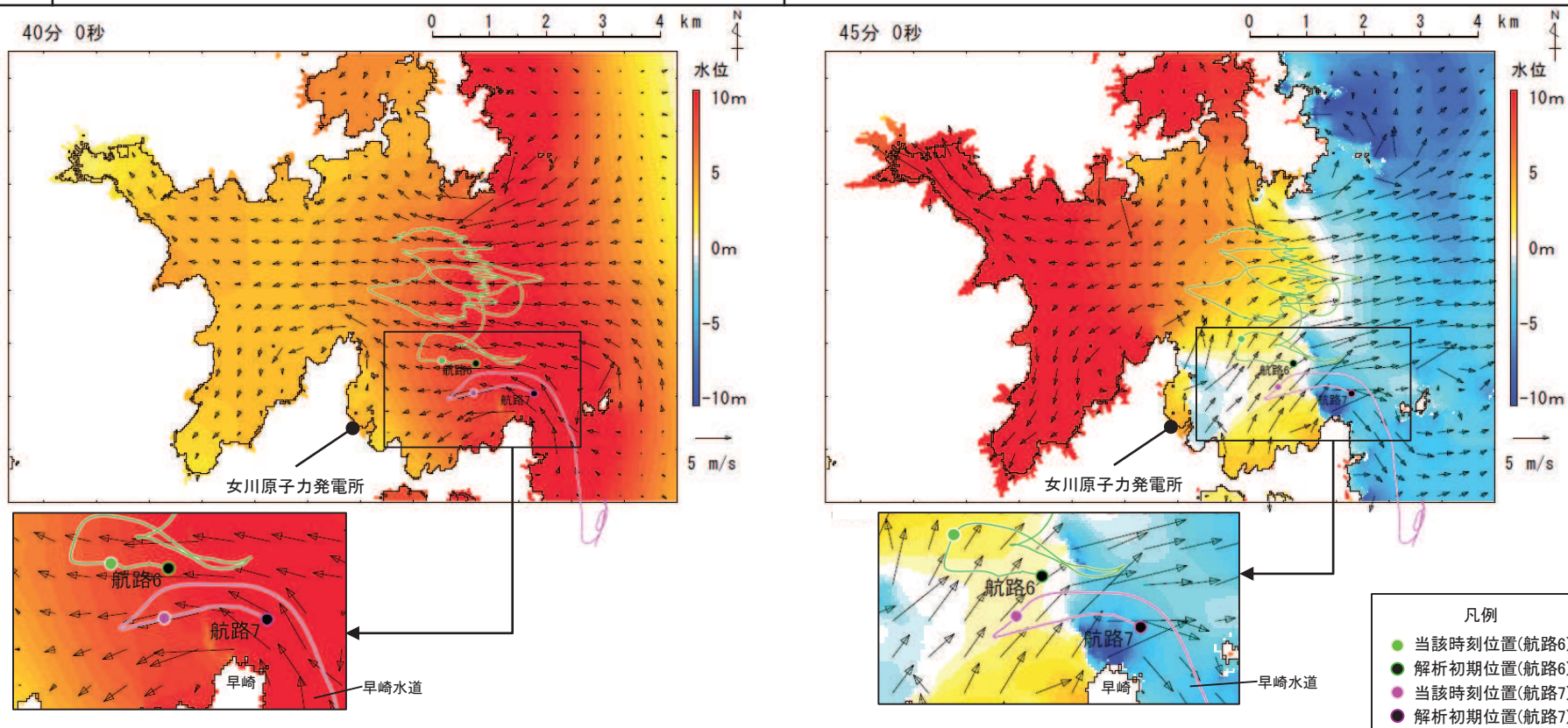
- ✓ 通常退避ルートよりも南側(発電所に近い側)のルートを退避することも想定されるため、そのルート上に2点(航路6,7)を設定して、軌跡解析を行った。
- ✓ その結果、両者ともに前頁の航路1~5と同様に津波の第一波で東西方向に移動する。その後、航路6は周辺地形の影響をあまり受けずに女川湾内を漂い、航路7は早崎水道に近いことからその影響を強く受けて沖合へ移動する特徴を確認した。
- ✓ ただし、発電所に漂流するような流れの特徴は確認されなかった。
- ✓ 詳細を次頁に示す。



【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。

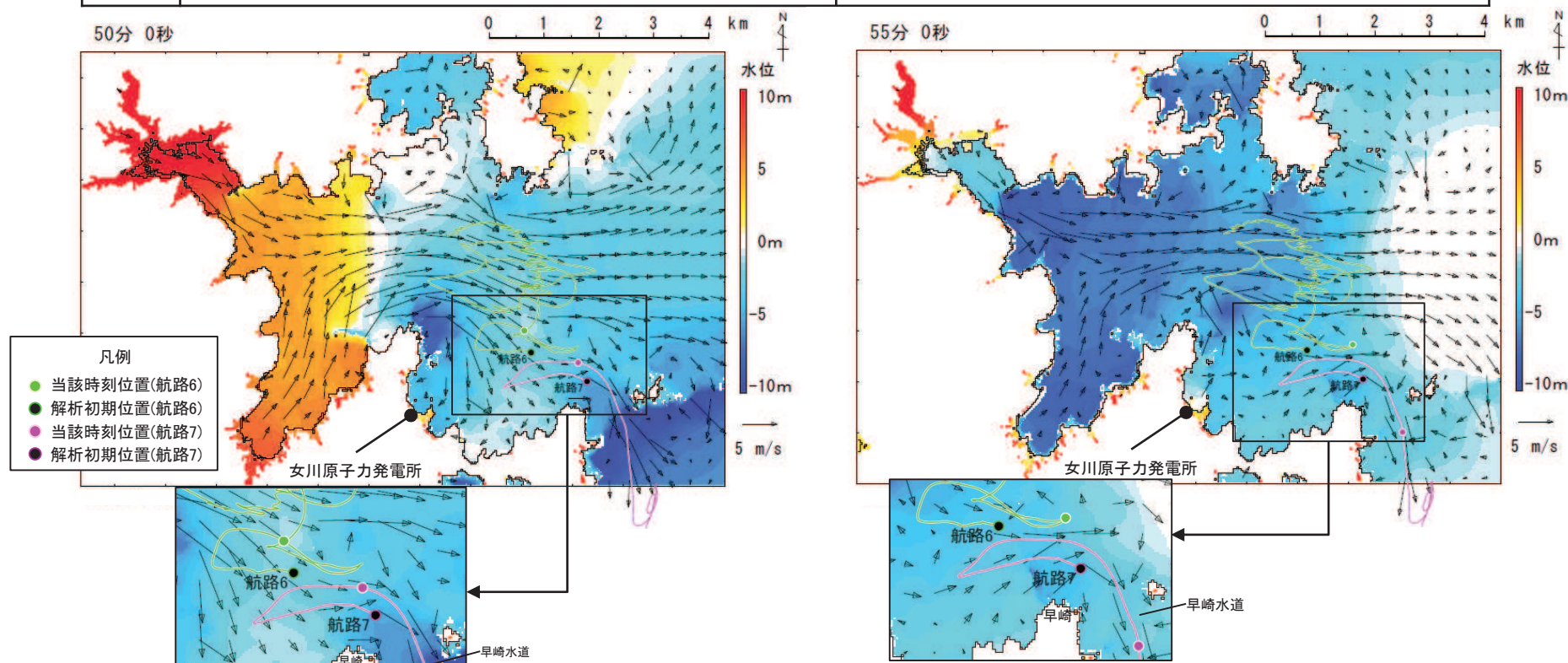
	航路6	航路7
40分後	津波の第一波の影響を受けて、解析開始位置から西側へ移動する。	早崎水道から襲来する津波の第一波の影響を受けて真西よりはやや北側に移動する。また、早崎水道を通る流速が速いため、航路6よりも移動距離が長い。
45分後	女川湾の湾口では寄せ波から引き波に転じており、さらに発電所が立地する地形からの反射波の影響を受けて真北よりもやや東側へ移動する。	女川湾の湾口では寄せ波から引き波に転じており、さらに発電所が立地する地形からの反射波の影響を受けて北東側へ移動する。



【参考2】漂流物の初期配置(11/11)

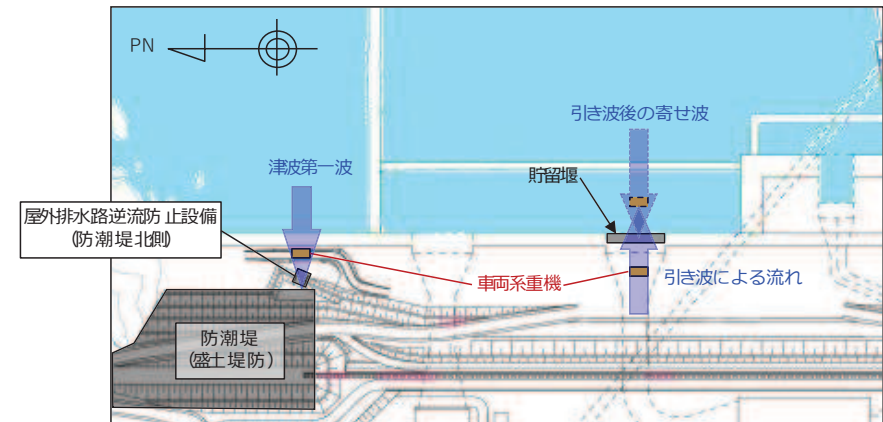
- 地震発生から40分後から55分後までの5分おきの軌跡位置とその時刻の流速ベクトル図から解析結果の考察を行った。
- 以下に50分後と55分後の考察を示す。

	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】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。

【参考4】FEMA(2012)に用いる車両の有効軸剛性の妥当性について

- 車両の軸剛性は、軽自動車(2.04×10^6 N/m)、セダン型乗用車(2.4×10^6 N/m)及び大型乗用車(2.8×10^6 N/m)から最大となる大型乗用車の軸剛性(2.8×10^6 N/m)を用いるものとする。
- なお、軽自動車の 2.04×10^6 N/mは「高畠ら(2015)」の実験により求められた3段階の軸剛性のうち、最も軸剛性が大きい3次剛性であり、セダン型乗用車の 2.4×10^6 N/m及び大型乗用車の 2.8×10^6 N/mは、「高畠ら(2015)」の衝突実験を「甲斐田・木原(2017)」が再整理した $9.0 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^6$ N/m及び $1.3 \times 10^6 \sim 2.8 \times 10^6$ N/mのそれぞれ最大値で、軽自動車の3次剛性 2.04×10^6 N/mよりも大きい値である。
- また、採用する軸剛性 2.8×10^6 N/mは適用可能な衝突速度の上限が $5.1 \sim 8.4$ m/sとされており、評価に用いる衝突速度 13 m/sはこの適用可能な範囲を超えているが、右下の図にしめすように、適用範囲を超えた衝突速度では同じ軸剛性を用いた方が実際よりも被衝突物に与えるエネルギーが大きくなるため、エネルギーとしては保守的な評価となる。
- そのため、本衝突評価においては、保守性の観点から適用範囲を超えた速度にも適用し、軸剛性 2.8×10^6 N/mを採用することとする。

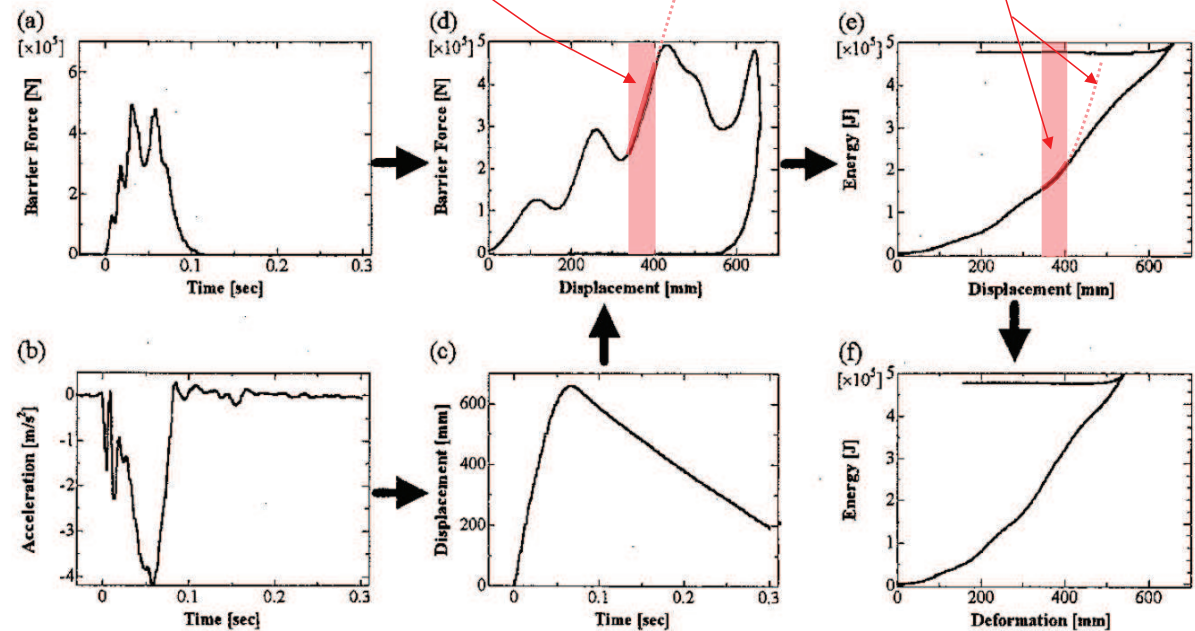


Fig.2 Calculation Process for Energy Absorption Characteristic

衝突速度の適用範囲を超えた場合のエネルギーへの影響
 (「自動車アセスメントの試験データを用いた変形エネルギー吸収分布図の作製(大賀ほか, 2007)」に一部加筆)

【参考5】船の深さ, 船首傾斜部の長さ及び船首角度について

- 船の深さ及び船首傾斜部の長さについて, 「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))」に示されている総トン数14tのFRP漁船(全長:21.66m)から, 下図のとおり総トン数5tの漁船の長さ(11m)で案分して算出することとする。
- また, 船首角度については下図のとおり70° とする。

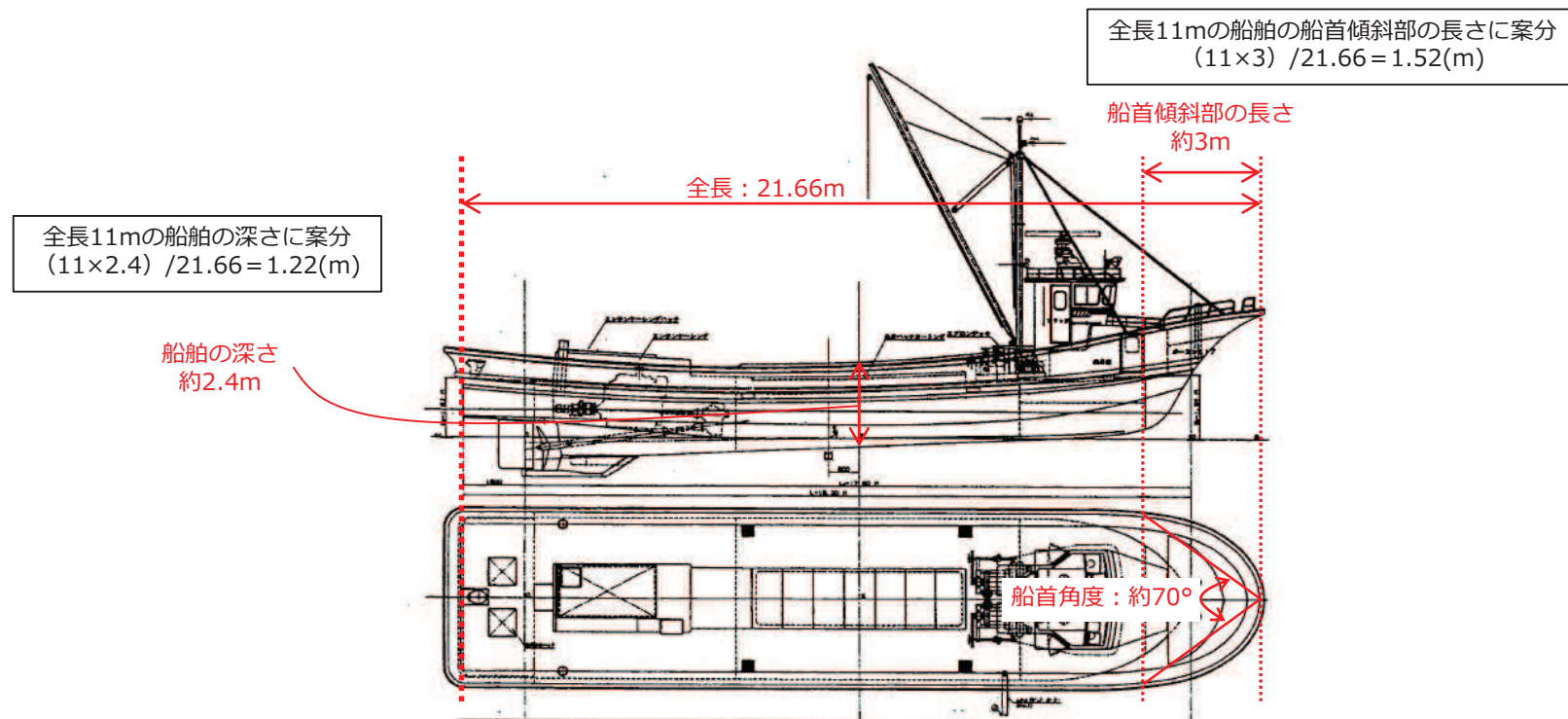


図-1 一般配置図(FRP漁船)

FRP漁船の構造

(「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))」)

【参考6】総トン数5tの漁船の長さに関する保守性について

- 「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」では, 総トン数5tの漁船の長さは11.0mとの記載がある(右図の赤実線)。
- 総トン数5tの漁船の長さを示す他の文献が確認できなかったため, 「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会会誌, 1978年)」の供試船一覧表で記載されている船舶の中から11.0mに最も近い12.8mの長さを, 保守性を考慮する際に用いることとする。
- 船舶の長さ12.8mは「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」では, 総トン数10tの漁船の長さ(13.0m)にほぼ等しい長さであり, 総トン数5tの船舶に対して12.8mの長さをを用いることは保守的になっている。

表 2-14-1 漁船の諸元

船型 (G.T.)	船の長さ (L)	船の幅 (B)	喫水	
			最大 (dmax)	最小 (dmin)
1	7.0m	1.8m	1.0m	—m
2	8.0	2.2	1.2	—
3	9.0	2.4	1.4	—
4	10.0	2.6	1.6	—
5	11.0	2.8	1.8	—
10	13.0	3.5	2.0	1.9

「漁港・漁場の施設の設計参考図書(水産庁, 2015年)」に一部加筆

表 1 供試船一覧表

船名	L (m)	B (m)	D (m)	d (m)	C _b	V (kt)
A	23.8	4.35	2.20	1.87	0.70	10.5
B	26.0	5.60	2.30	1.96	0.71	10.5
C	16.3	3.60	1.40	1.30	0.61	10.0
D	21.5	5.10	2.10	2.05	0.66	11.0
E	26.4	5.46	2.48	2.40	0.67	11.0
F	24.4	5.43	2.34	2.02	0.69	11.0
G	26.5	5.53	2.50	2.17	0.77	11.0
H	22.2	5.23	2.14	1.87	0.64	11.0
I	17.0	3.70	1.40	1.01	0.65	11.5
J	12.8	3.30	1.01	0.52	0.55	17.5
K	24.0	5.35	2.30	2.00	0.66	10.0
L	15.4	3.90	1.55	0.74	0.63	27.0
M	20.1	5.30	2.30	1.08	0.40	24.0
N	14.5	4.03	1.45	1.08	0.53	13.5
O	13.5	3.00	1.08	0.81	0.69	11.0
P	16.0	3.95	1.57	1.30	0.70	11.0

「強化プラスチック船規則解説(日本海事協会会誌, 1978年)」に一部加筆

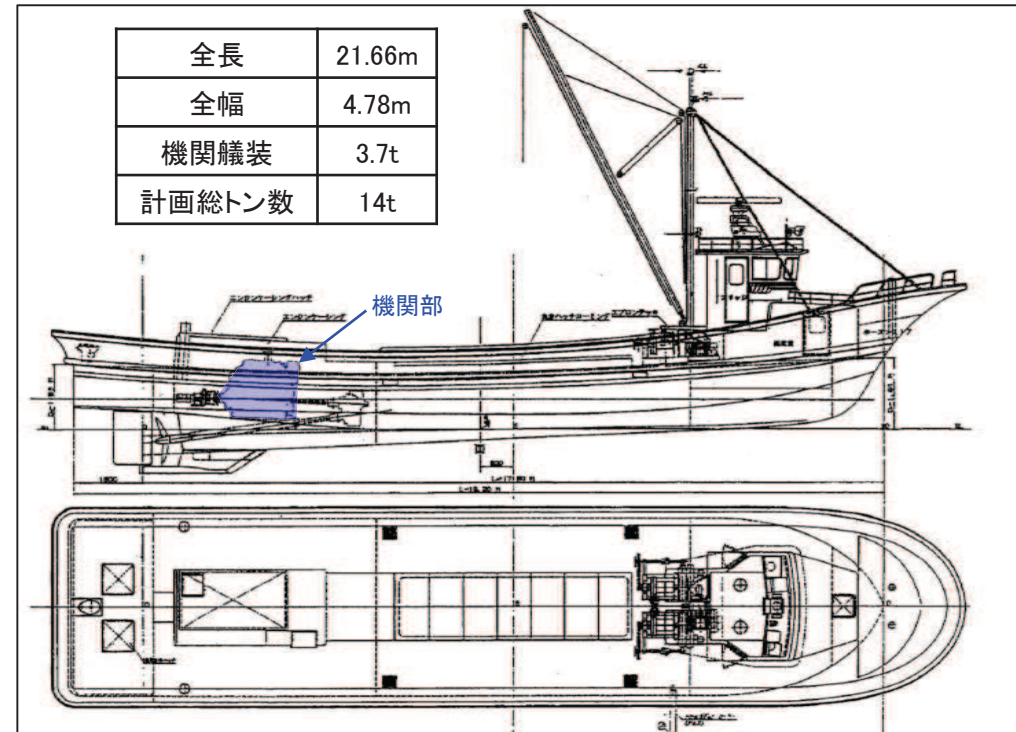
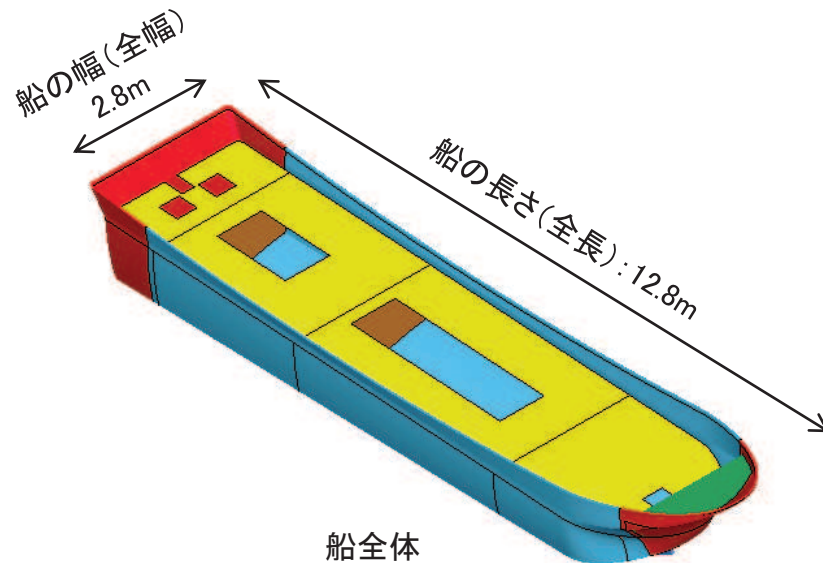
【参考7】衝突解析を用いた衝突形態の検討(1/9)

検討方法

FRP製船舶を対象に、船首からの衝突、船尾からの衝突、船舶真横からの衝突、斜め船首からの衝突及び斜め船尾からの衝突について、衝突解析を実施し、衝突形態の影響について確認する。

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。

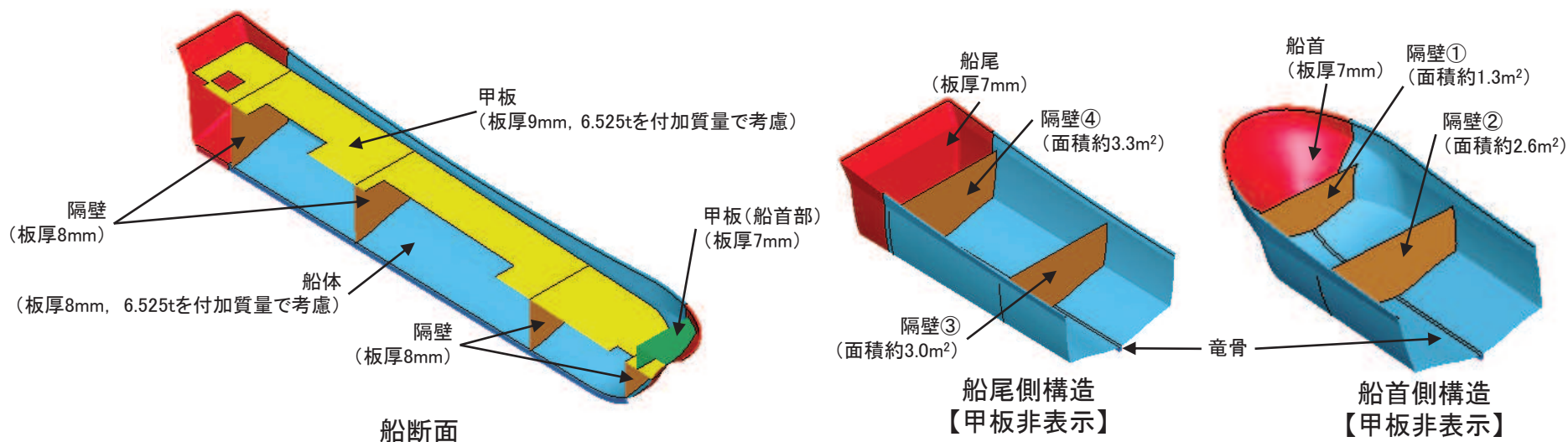


「小型漁船のインベントリ分析に関する研究－A：モデル船の建造・運航状況調査－（海上技術安全研究所報告 第3巻 第5号(平成15年)）」に一部加筆

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ρ35,39の条件(5.89mm, 5.22mm, 5.434mm)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, 甲板は各種艀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。



【参考7】衝突解析を用いた衝突形態の検討(3/9)

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

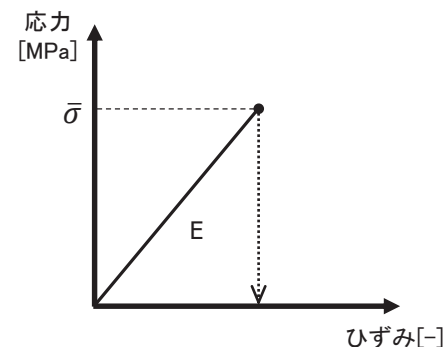
FRP製の船舶に使用する材料定数は、下表のとおり設定する。

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:p39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
 *3:p39から保守的に設定

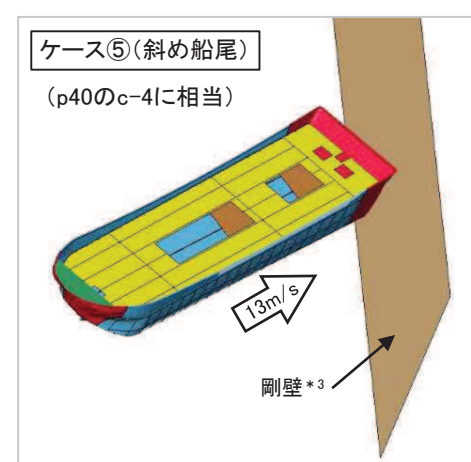
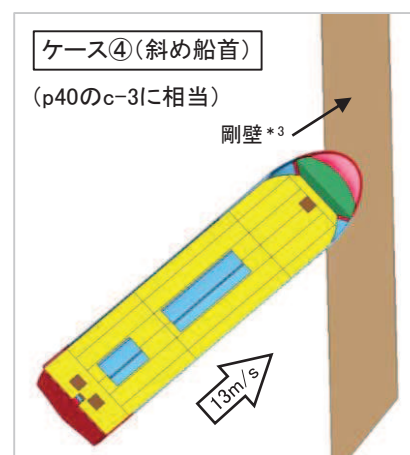
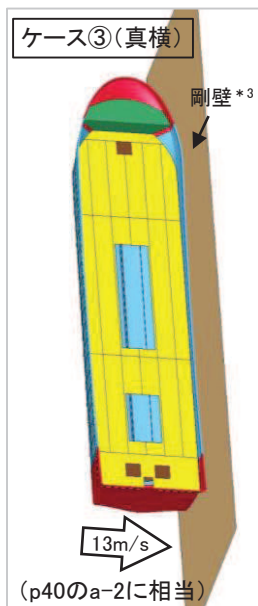
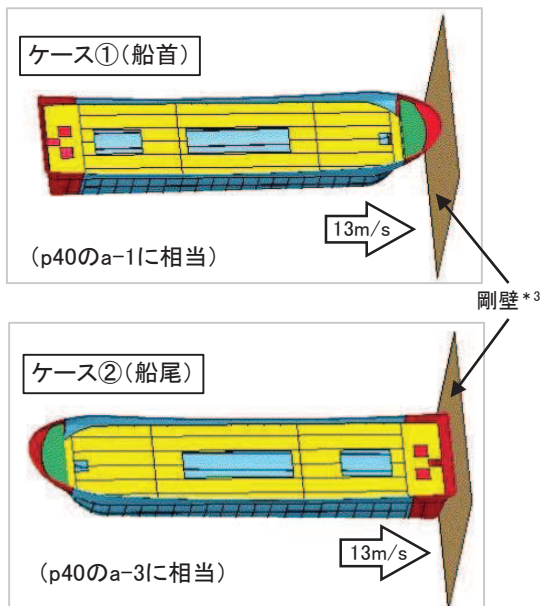
材料特性(FRPの応力—ひずみ関係)

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

解析ケースは下図のとおりで、いずれのケースも衝突速度(絶対値)は13m/sとする。

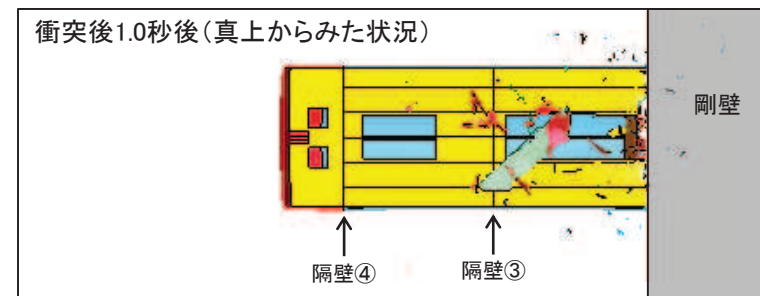
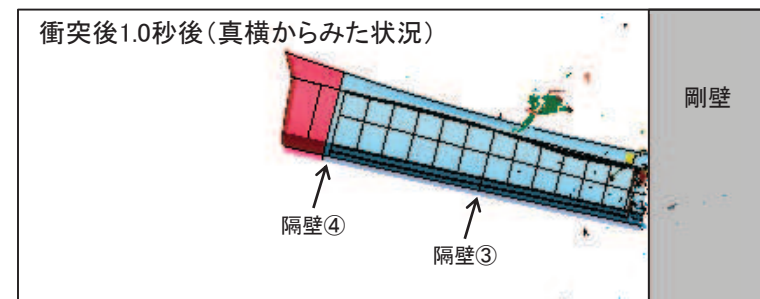
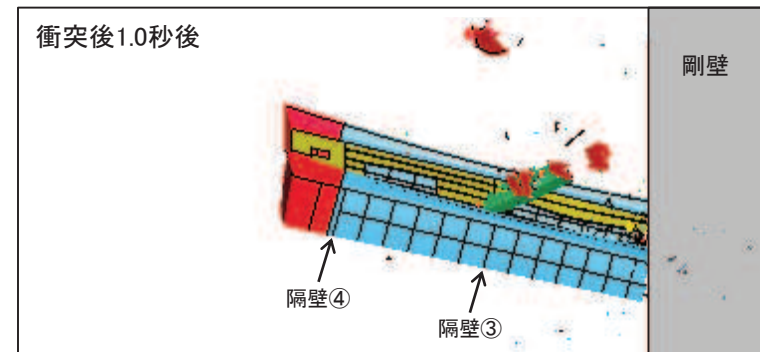
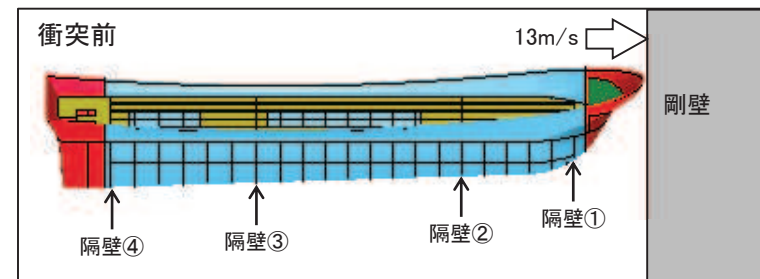
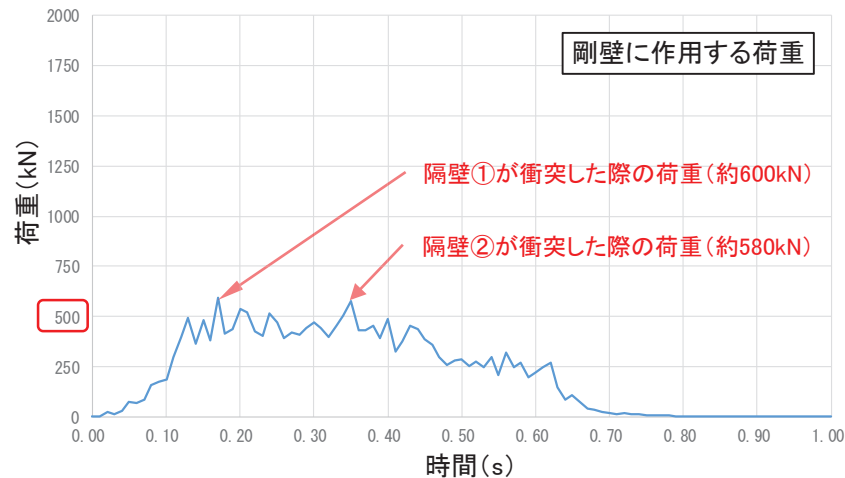
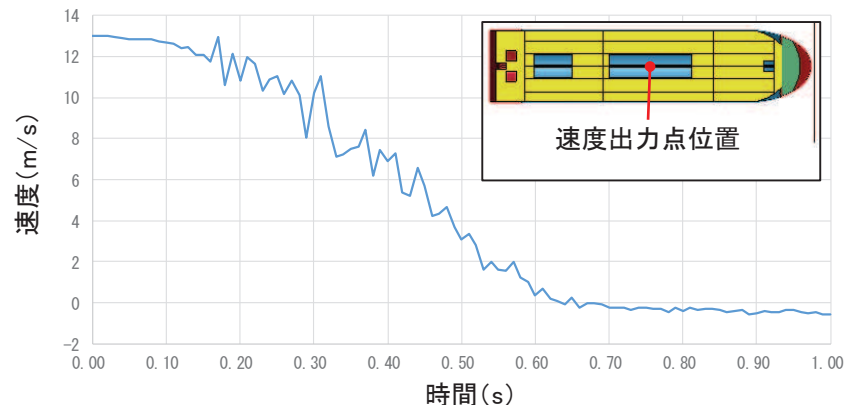


注記 *3:剛壁は変形・移動しない条件とし、ヤング率200GPa, ポアソン比0.3の鋼製の塊としている。

【参考7】衝突解析を用いた衝突形態の検討(4/9)

ケース①(船首)の解析結果

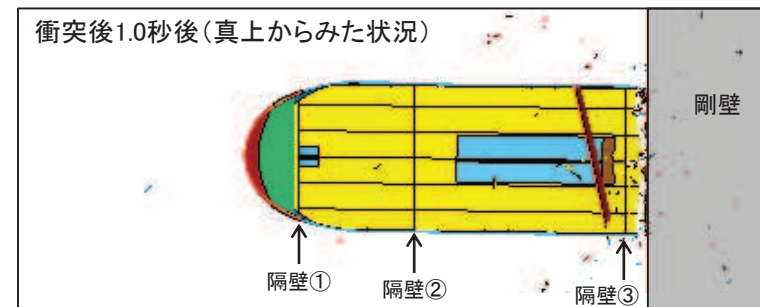
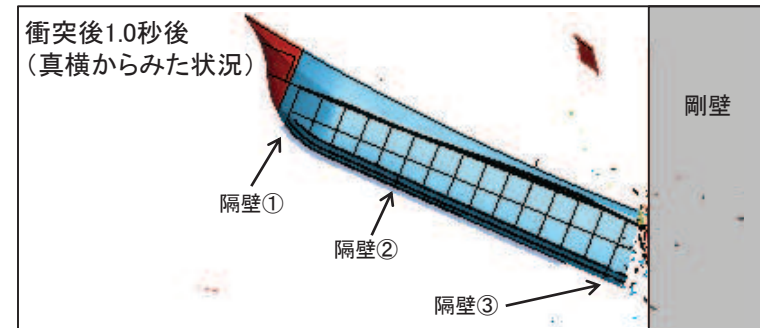
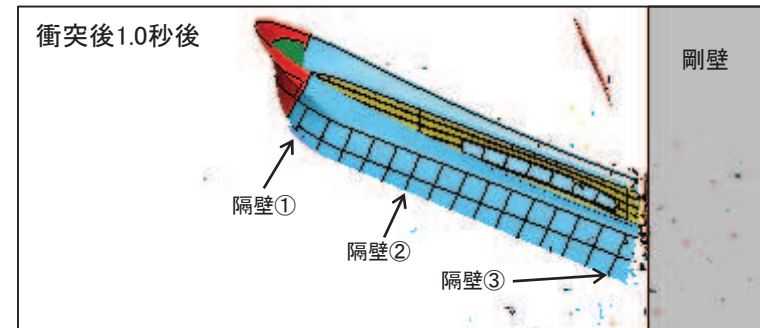
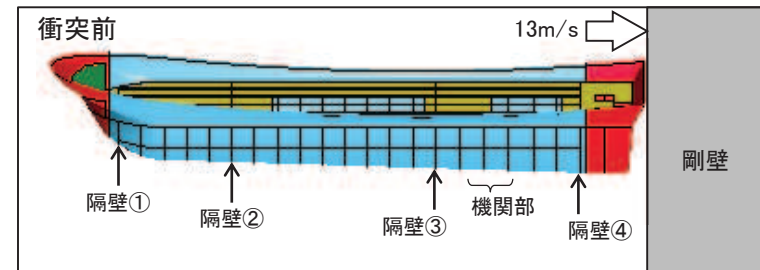
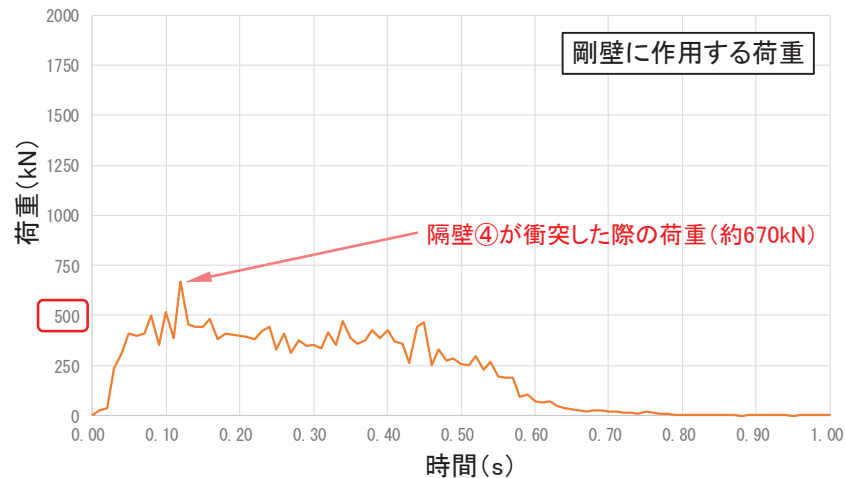
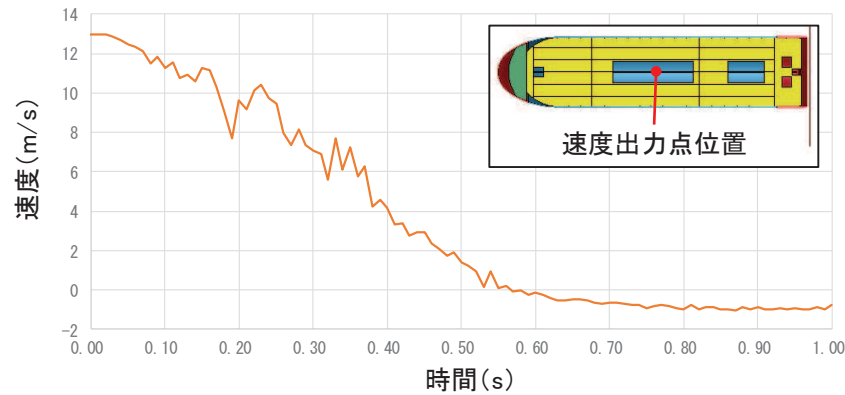
- ✓ 船首から衝突する際は、衝突直後から衝突速度が下がり、約0.7秒後には衝突速度がゼロとなる。
- ✓ また、衝突荷重としては、船首から破壊が生じて荷重が大きくなり、約500kNの衝突荷重が作用している。最大荷重としては瞬間的に約600kN(約0.17s)が作用しているが、これは隔壁が衝突した瞬間の荷重であり、約460kN/m²(隔壁の面積約1.3m²)の分布荷重が作用している状況である。



【参考7】衝突解析を用いた衝突形態の検討(5/9)

ケース②(船尾)の解析結果

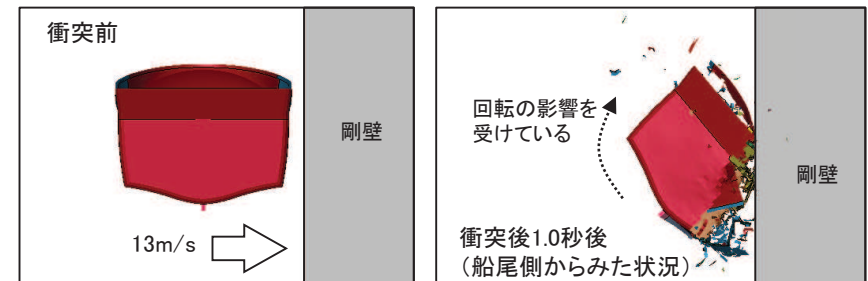
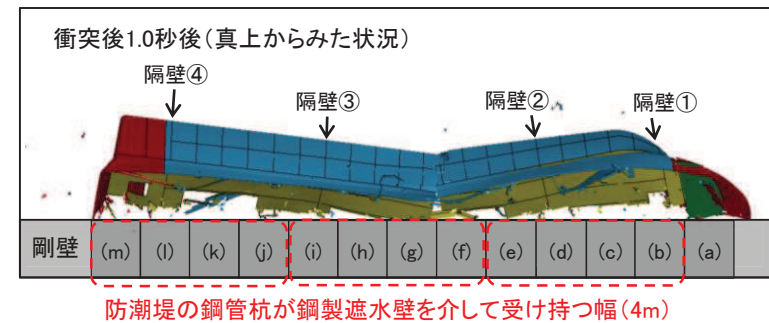
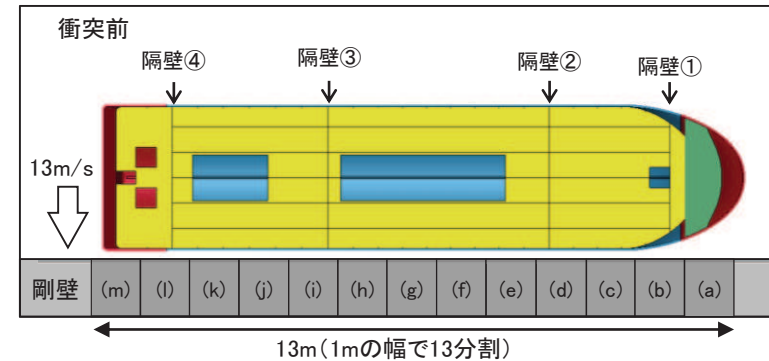
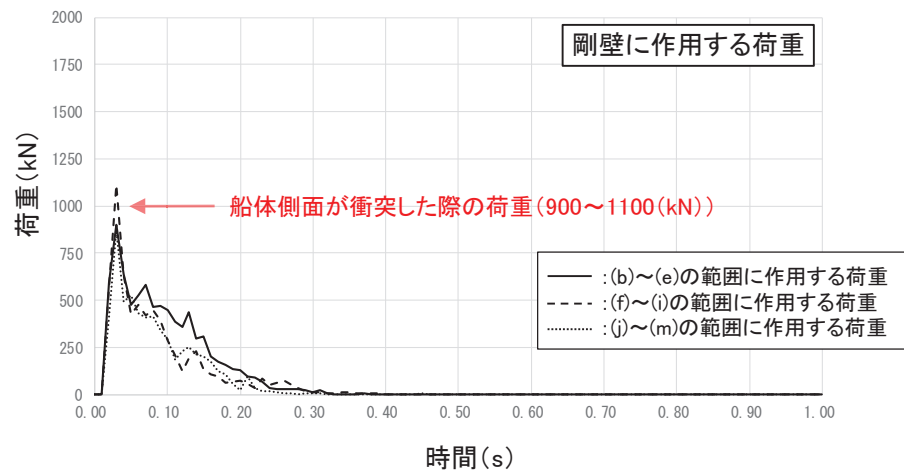
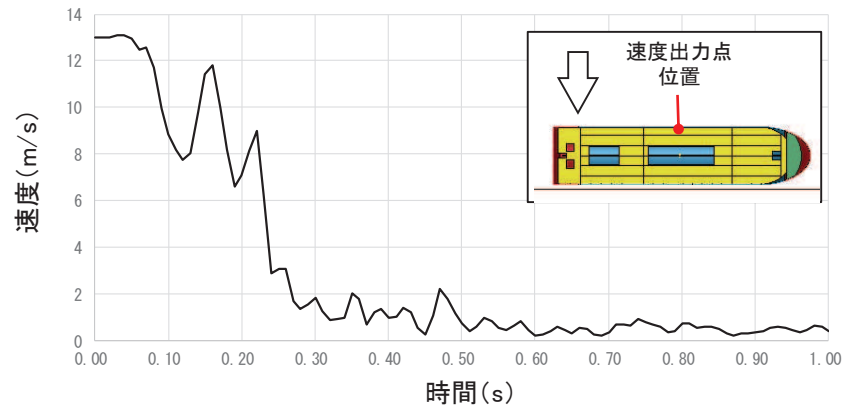
- ✓ 船尾から衝突する際は、衝突直後から衝突速度が下がり、約0.6秒後には衝突速度がゼロとなる。
- ✓ また、衝突荷重としては、衝突直後から荷重が大きくなり、約500kNの衝突荷重が作用している。最大荷重としては瞬間的に約670kN(約0.12s)が作用しているが、これは隔壁が衝突した瞬間の荷重であり、約210kN/m²(隔壁の面積約3.3m²)の分布荷重が作用している状況である。



【参考7】衝突解析を用いた衝突形態の検討(6/9)

ケース③(真横)の解析結果

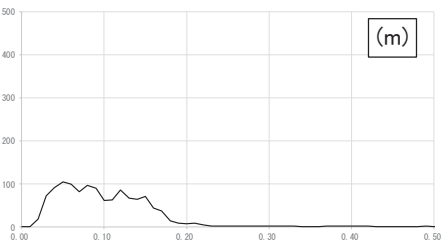
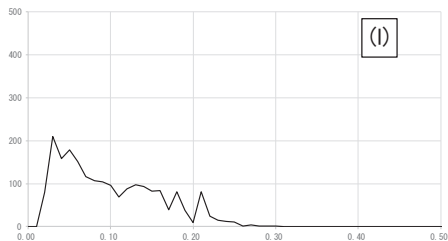
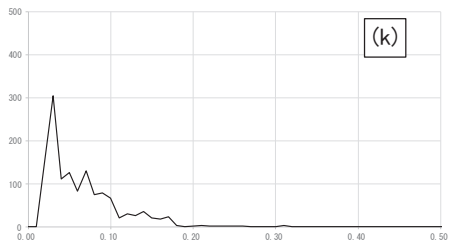
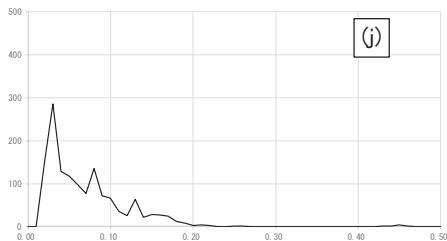
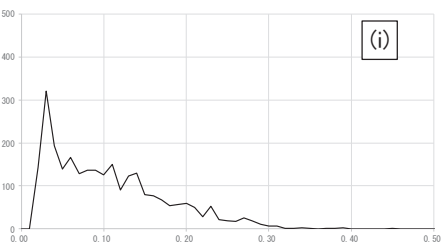
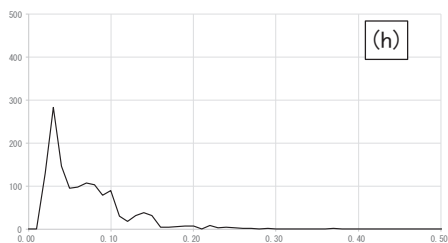
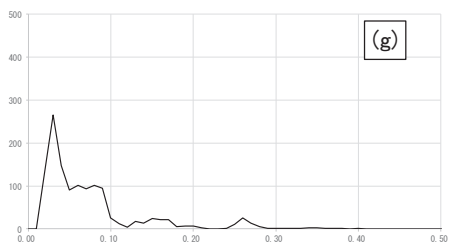
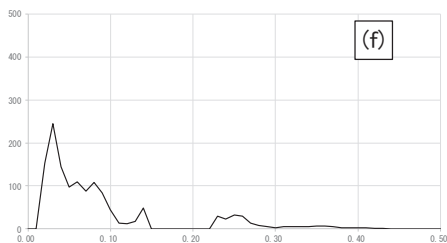
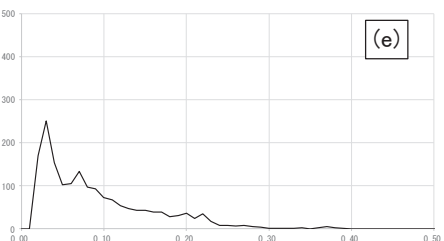
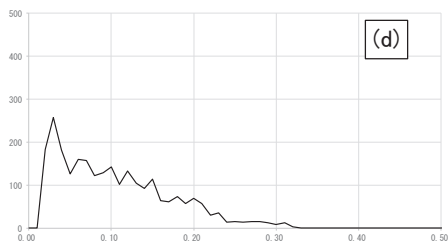
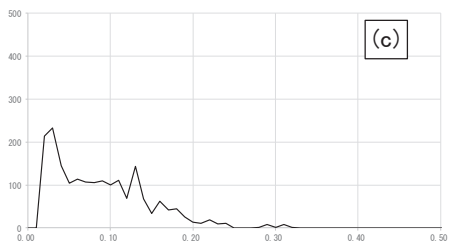
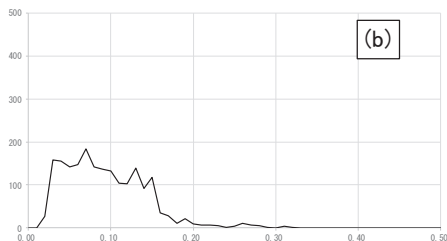
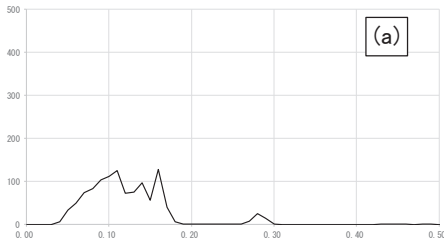
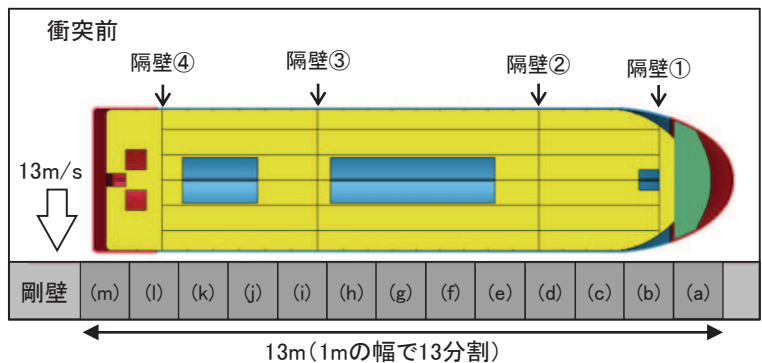
- ✓ 真横から衝突する際は、衝突直後から衝突速度が下がり、約0.3秒後以降では衝突速度はゼロに近づくが、回転(剛壁の水平方向を軸とする回転)の影響により衝突速度はゼロにならない。
- ✓ また、真横からの衝突では、船舶の長さ(12.8m)全体で剛壁へ作用する状況(参考)であり、防潮堤(鋼管式鉛直壁)の鋼管杭1本が受け持つ幅は4mであることから、右下の図のように剛壁を分割して、4mの幅に作用する荷重として整理した。
- ✓ 衝突荷重は、船体側面が衝突する0.03秒前後で900~1100(kN)の衝突荷重が作用しているが、この荷重は他の衝突形態で生じる荷重に比べて極めて作用時間が短い現象である。また、荷重作用継続時間も0.2秒程度であり、他の衝突形態に比べて半分以下である。



【参考7】衝突解析を用いた衝突形態の検討(7/9)

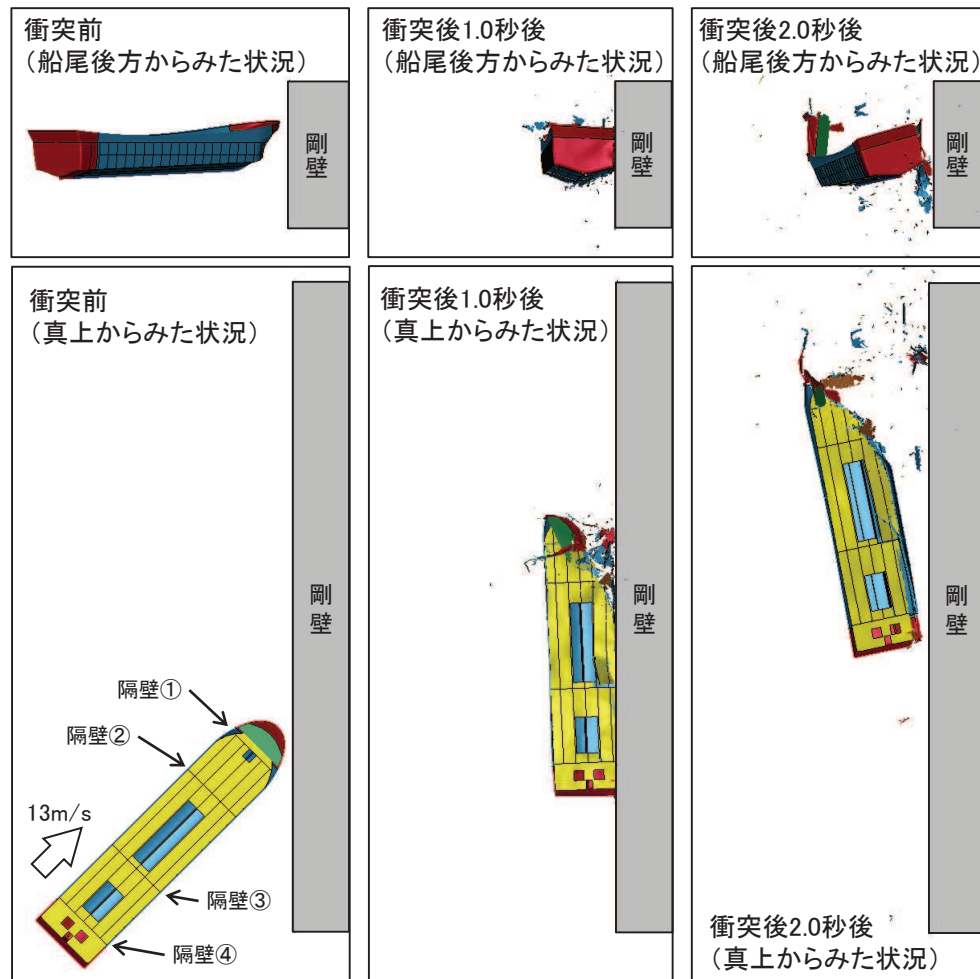
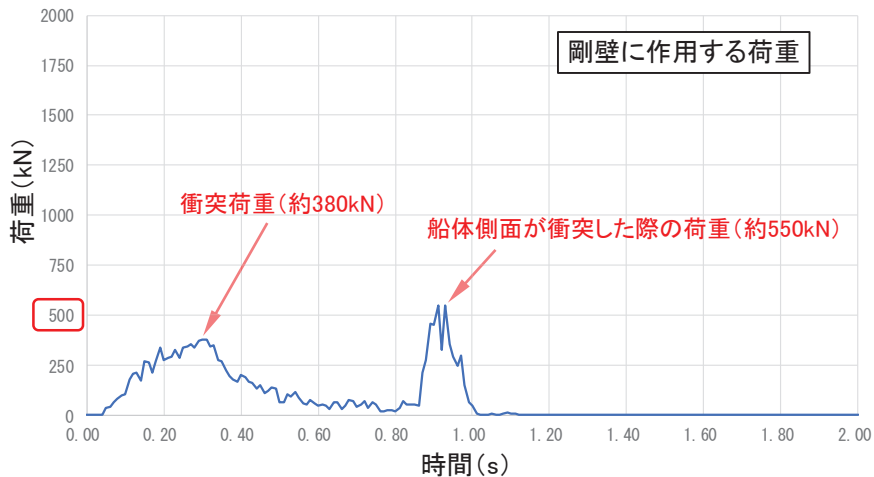
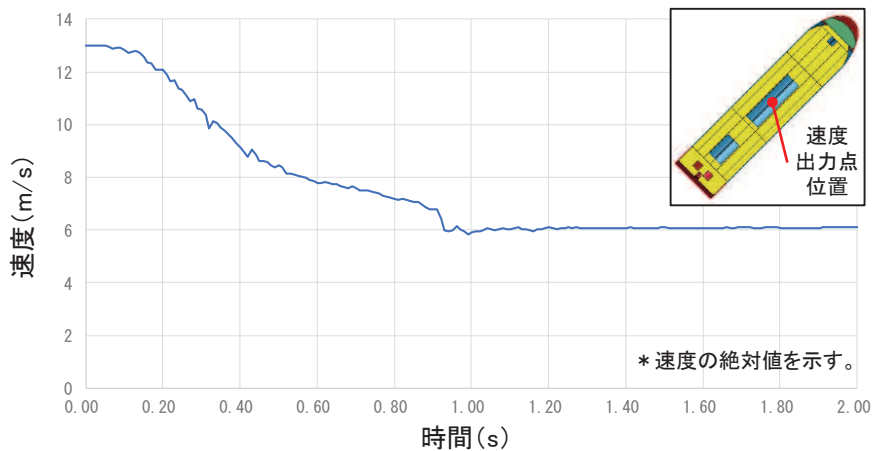
ケース③(真横)の解析結果

- ✓ 船舶が衝突する範囲(剛壁の13m)を1mの幅で分割し、それぞれの範囲(幅1m)に作用する荷重を示す(横軸は時間(s), 縦軸は荷重(kN))。
- ✓ (c)~(l)の範囲で約250(kN)程度の荷重が作用しており、船舶の側面が衝突した際に、10mの幅の剛壁に均等に荷重が作用していることを確認した。



ケース④(斜め船首)の解析結果

- ✓ 斜め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0.9秒後には衝突速度が約6m/sで一定となる。これは、船舶が剛壁に衝突した後の約0.9秒後以降では剛壁から離れる方向に移動していることを示している。
- ✓ 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350kN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380kN(約0.31秒)が作用しており、約0.91秒後にも瞬間的に約550kNの荷重が作用しているが、これは瞬間的に船体側面が衝突したことによるものである。



ケース⑤(斜め船尾)の解析結果

- ✓ 斜め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1.0秒後には衝突速度が約6m/sで一定となる。これは、船舶が剛壁に衝突した後の約1.0秒後以降では剛壁から離れる方向に移動していることを示している。
- ✓ 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350kN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370kN(約0.28秒後)が作用しており、約0.93秒後にも瞬間的に約350kNの荷重が作用しているが、これは瞬間的に船体側面が衝突したことによるものである。

