

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-01-0140-1_改8
提出年月日	2021年3月31日

補足-140-1 【津波への配慮に関する説明書の補足説明資料】

## 目次

1. 入力津波の評価
  - 1.1 潮位観測記録の考え方について
  - 1.2 遡上・浸水域の考え方について
  - 1.3 港湾内の局所的な海面の励起について
  - 1.4 管路解析モデルについて
  - 1.5 入力津波の不確かさの考慮について
  - 1.6 津波シミュレーションにおける解析モデルについて
  - 1.7 非常用取水設備内に貯留される水量の算定について
2. 津波防護対象設備
  - 2.1 津波防護対象設備の選定及び配置について
3. 取水性に関する考慮事項
  - 3.1 砂移動による影響確認について
  - 3.2 除塵装置の取水性への影響について
  - 3.3 非常用海水ポンプの波力に対する強度評価について
4. 漂流物に関する考慮事項
  - 4.1 設計に用いる遡上波の流速について
  - 4.2 取水口付近の漂流物に対する取水性
  - 4.3 漂流物による衝突荷重について
5. 設計における考慮事項
  - 5.1 地震と津波の組合せで考慮する荷重について
  - 5.2 耐津波設計における現場確認プロセスについて
  - 5.3 津波防護に関する施設の機能設計・構造設計に係る許容限界について
  - 5.4 津波波圧の算定に用いた規格・基準類の適用性について
  - 5.5 スロッシングによる貯水量に対する影響評価
  - 5.6 津波防護施設の強度計算における津波荷重，余震荷重及び衝突荷重の組合せについて
  - 5.7 浸水防護施設の評価における衝突荷重，風荷重及び積雪荷重について
  - 5.8 強度計算における津波時及び重畳時の荷重作用状況について
  - 5.9 耐震及び耐津波設計における許容限界について
  - 5.10 津波防護施設の設計における評価対象断面の選定について
  - 5.11 地殻変動後の津波襲来時における海水ポンプの取水性への影響について
  - 5.12 浸水防護施設のアンカーボルトの設計について

- 5.13 強度計算に用いた規格・基準類の適用性について
- 5.14 自然現象を考慮する浸水防護施設の選定について
- 5.15 浸水量評価について
- 5.16 強度評価における津波荷重等の鉛直方向荷重の考え方について
- 6. 浸水防護施設に関する補足資料
  - 6.1 防潮堤に関する補足説明
  - 6.3 防潮壁に関する補足説明
  - 6.5.4 浸水防止壁に関する補足説明

: 本日の説明範囲

### 4.3 漂流物による衝突荷重について

#### 4.3.1 衝突荷重を考慮する施設・設備の選定

津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備のうち、漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備については、各施設・設備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。

津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備の平面位置図を図4.3-1に、漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の選定フローを図4.3-2に、選定結果を表4.3-1に、選定された施設・設備の設置概念図を図4.3-3に示す。

なお、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）は、防潮堤よりも海側に設置しているものの、地中に設置しているため、漂流物による衝突荷重を考慮しないこととしており、設置概念図を参考1に示す。

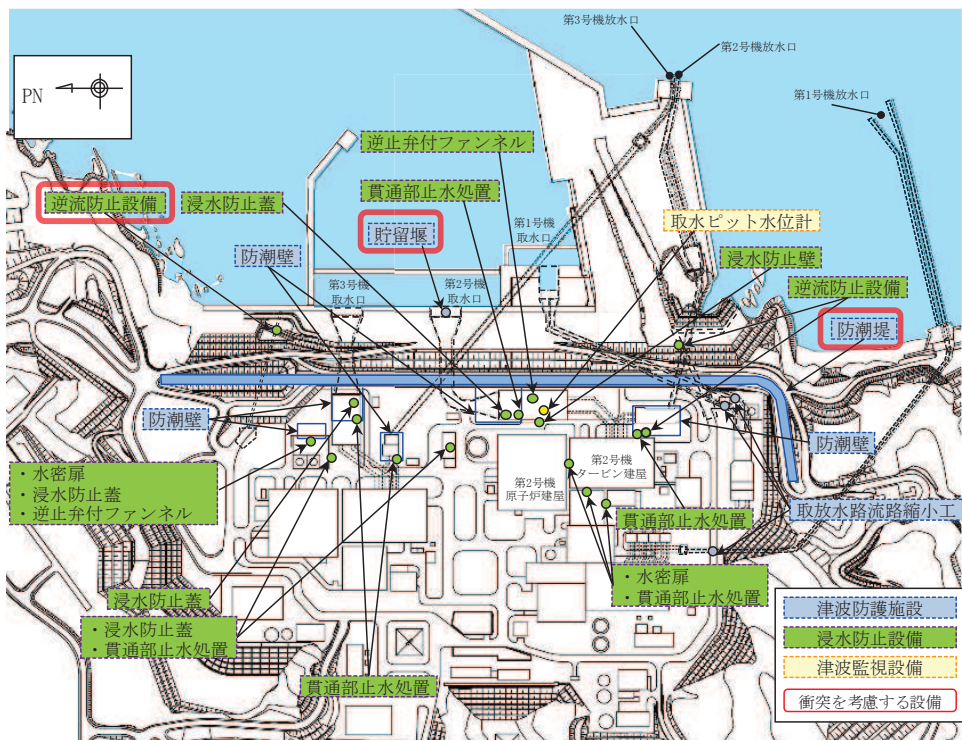


図 4.3-1 漂流物による衝突荷重を考慮する津波防護施設

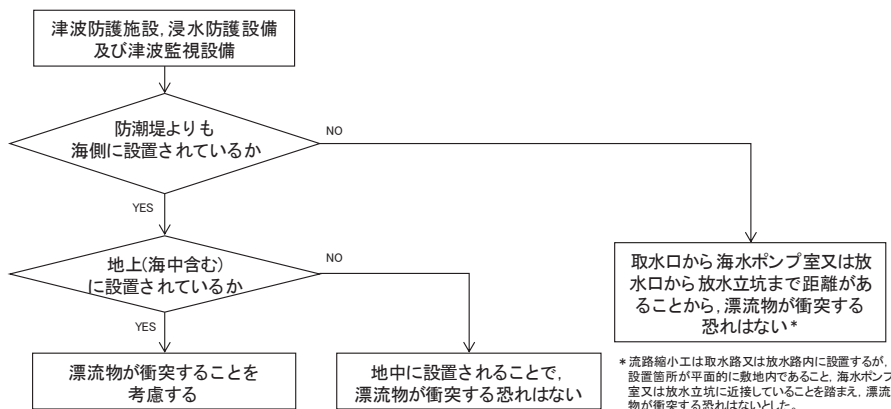


図 4.3-2 漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の選定フロー

表 4.3-1 漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の選定結果

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
	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。

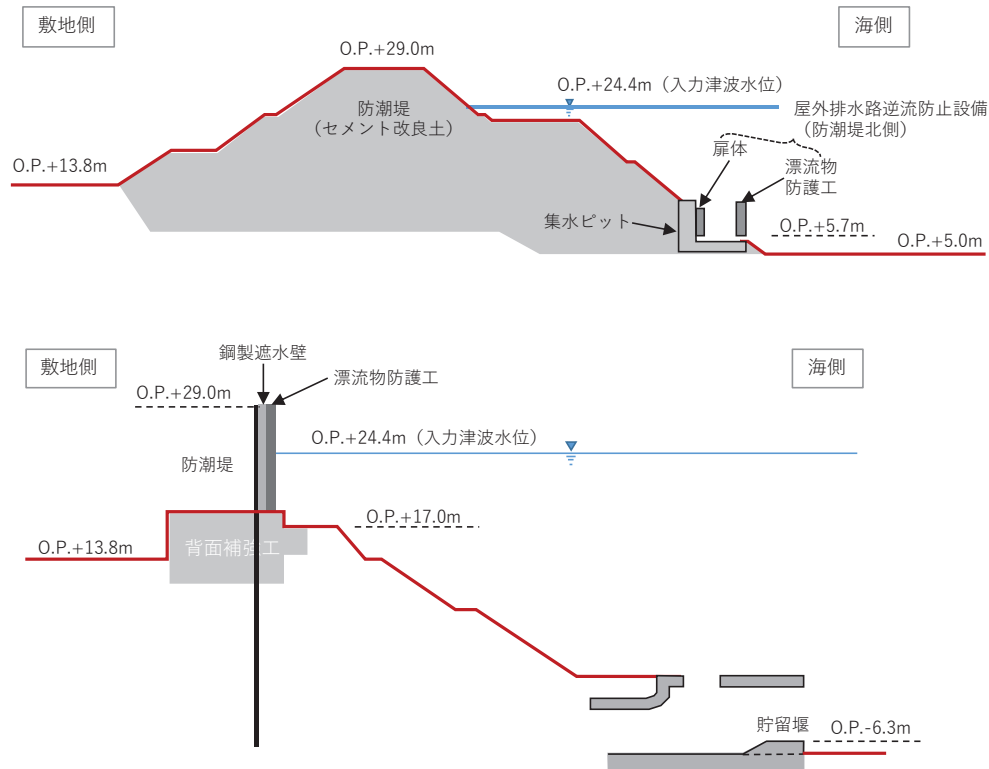


図 4.3-3 漂流物による衝突荷重を考慮する施設・設備の設置概念図

#### 4.3.2 基準津波の特徴（水位、流向及び流速）の把握

敷地前面域における基準津波の最大水位上昇量分布（全時刻：地震発生から240分後まで）及び基準津波第一波（地震発生から約46分後まで）の最大水位上昇量分布を図4.3-4及び図4.3-5に示す。両者を比較すると、大きな違いは見られないことから、敷地前面域は第一波で最大水位になる。

防潮堤前面、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）前面及び貯留堰（取水口）前面における水位時刻歴波形を図4.3-6、図4.3-7及び図4.3-8に示す。これらの図から、防潮堤前面、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）前面及び貯留堰前面において水位が最大となる時間は、それぞれ地震発生から42.4分後、42.2分後及び42.4分後で、ほぼ同時刻であることから、いずれも基準津波の第一波により最大水位となる。

なお、防潮堤前面及び屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）前面に第二波以降の津波は到達しておらず、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ことが確認される（図4.3-8）。

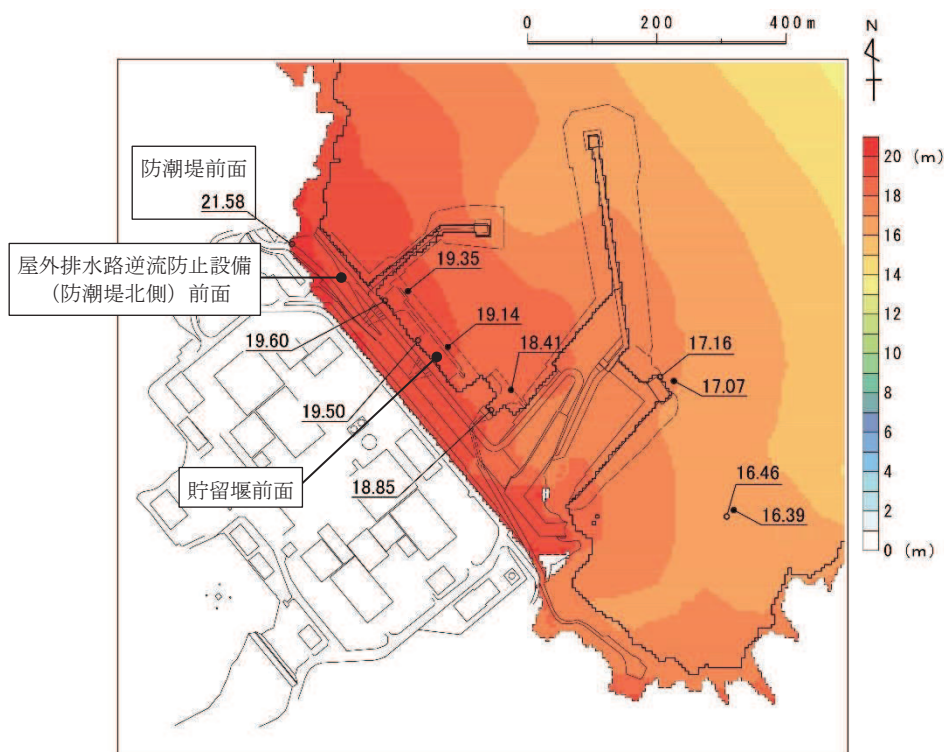


図 4.3-4 基準津波による最大水位上昇量分布  
(防波堤あり，基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし，全時刻)

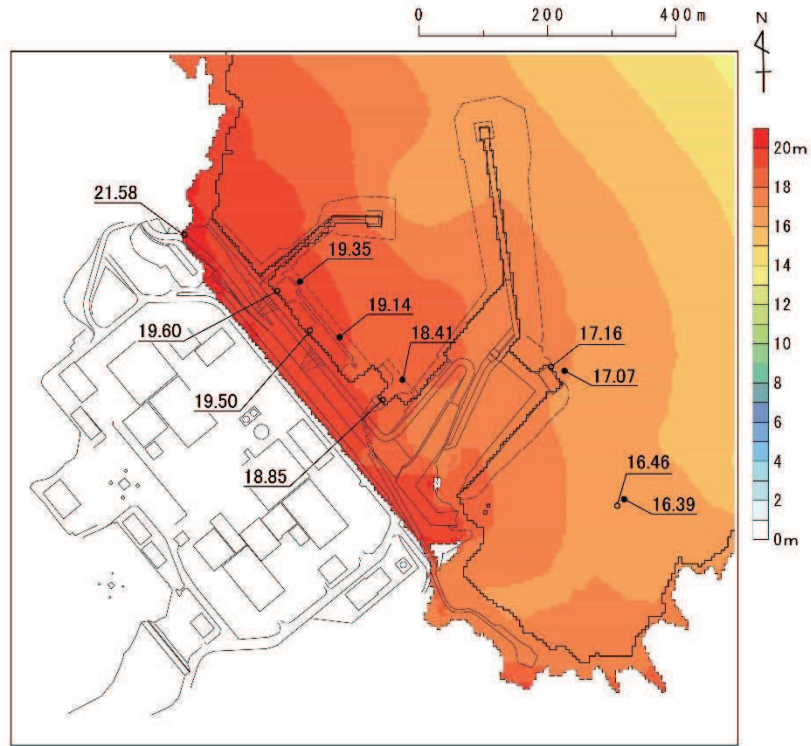


図 4.3-5 基準津波による最大水位上昇量分布  
(防波堤あり, 基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし, 第一波 (地震発生から約 46 分後))

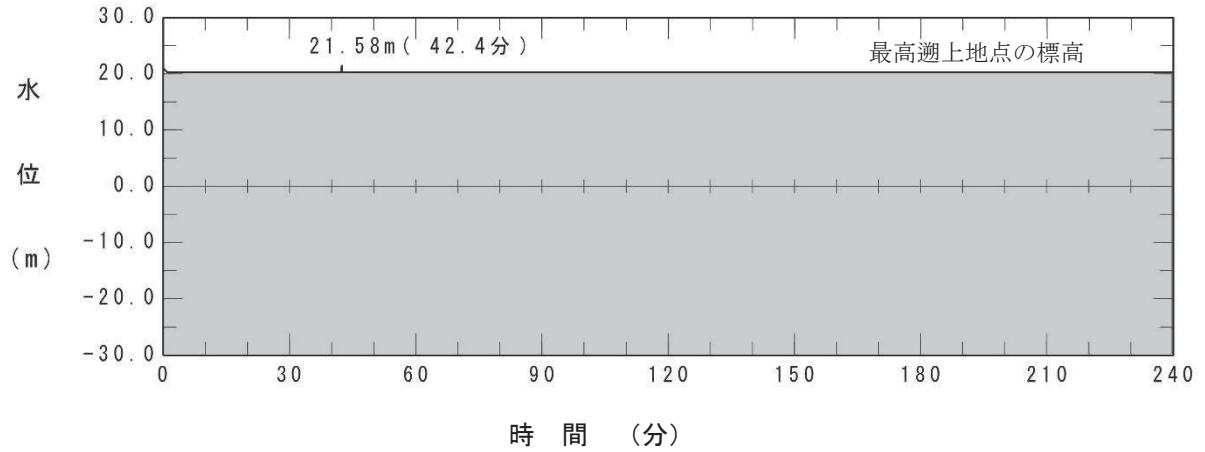


図 4.3-6 防潮堤前面の水位時刻歴  
(防波堤あり, 基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし)

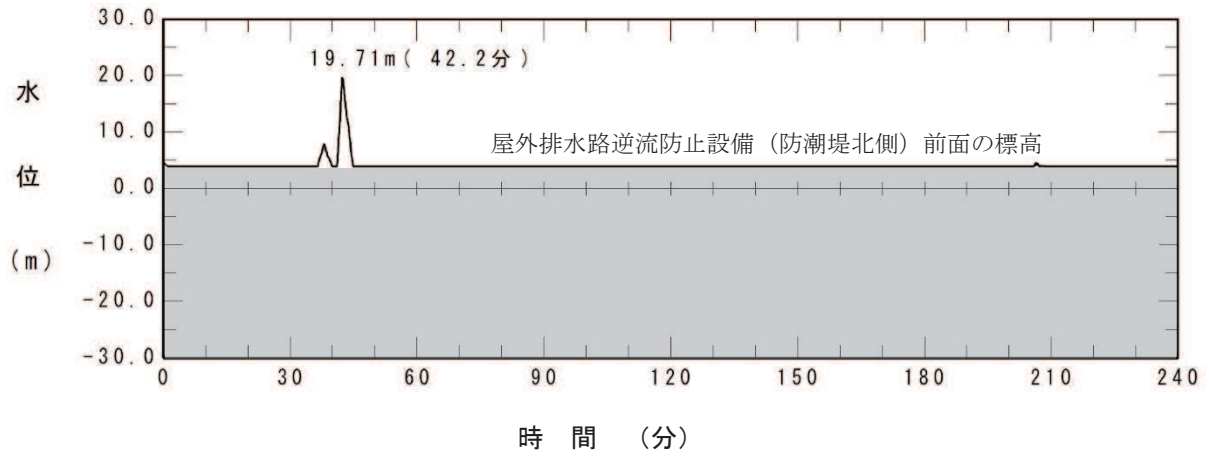


図 4.3-7 屋外排水路逆流防止設備 (防潮堤北側) 前面の水位時刻歴  
(防波堤あり, 基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし)

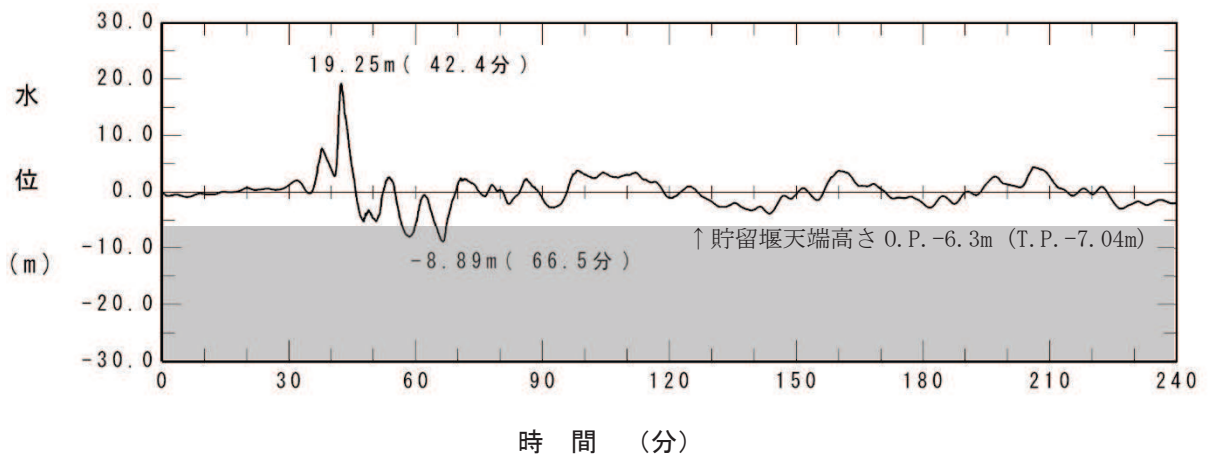


図 4.3-8 貯留堰 (取水口) 前面の水位時刻歴  
(防波堤あり, 基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし)



次に、敷地前面域での流速の特徴について把握する。

図 4.3-9 に、敷地前面域での最大流速ベクトル分布（全時刻）、第一波（地震発生から約 46 分後まで）の最大流速ベクトル分布及び第二波以降（地震発生から約 46 分以降）の最大流速ベクトル分布を示す。

敷地前面域での最大流速は、第二波以降（地震発生から約 46 分以降）の東防波堤堤頭部付近で生じており、12.95m/s となっている。その方向は敷地に対して約 356°（敷地汀線方向を 0° とし、反時計回りの角度 図 4.3-10 参照）であり、発電所から離れる方向である。この最大流速位置における流速とベクトルの時刻歴データを図 4.3-11 に示す。この時刻歴データから、最大流速は、第一波襲来後の引き波で水位が最も低くなった際に生じている。

また、第一波（地震発生から約 46 分後まで）での最大流速は、第 1 号機取水口の東側で生じており、12.79m/s となっている。この方向は防潮堤に対して約 20°（図 4.3-10 参照）で、敷地に近づく方向である。この最大流速位置における流速とベクトルの時刻歴データを図 4.3-12 に示す。この時刻歴データから、第一波が第 1 号機放水口側から第 1 号機取水口の東側の敷地に遡上した際に発生したものと考えられる。

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ており、それぞれ 4.86m/s 及び 2.81m/s である。また、その方向は、防潮堤に対して約 176°、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）に対しては約 186° となっている（図 4.3-13 及び図 4.3-14）。

貯留堰については、海中に設置されていることを踏まえ、引き波により貯留堰が露出した後に襲来する津波の流速を対象とする。その際の最大流速は第二波の 1.81m/s であり、貯留堰に対して約 27°（貯留堰と平行方向を 0° とし、反時計回りの角度）となっている（図 4.3-15）。

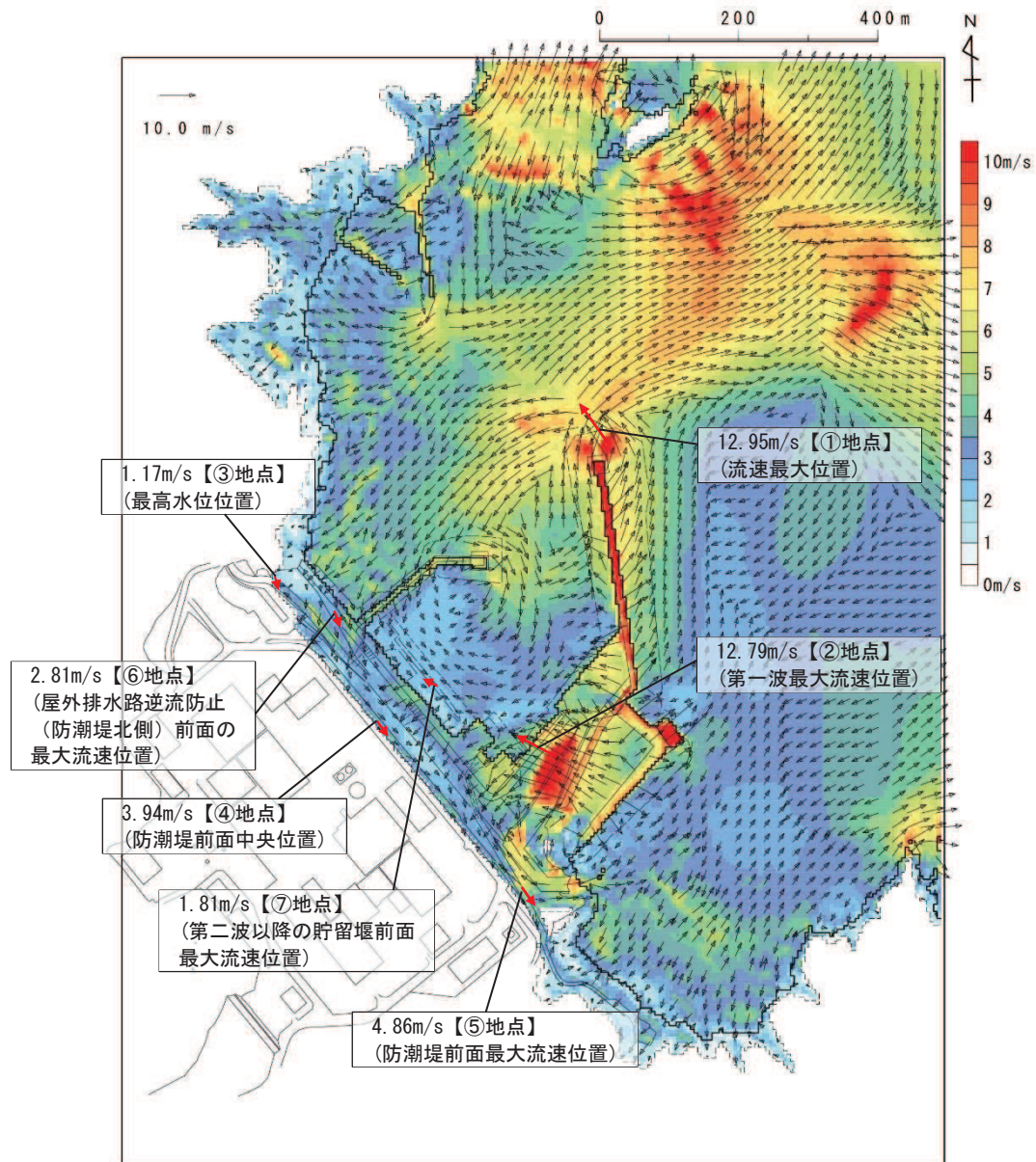


図 4.3-9(1) 基準津波における最大流速分布図

(防波堤あり，基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし，全時刻)

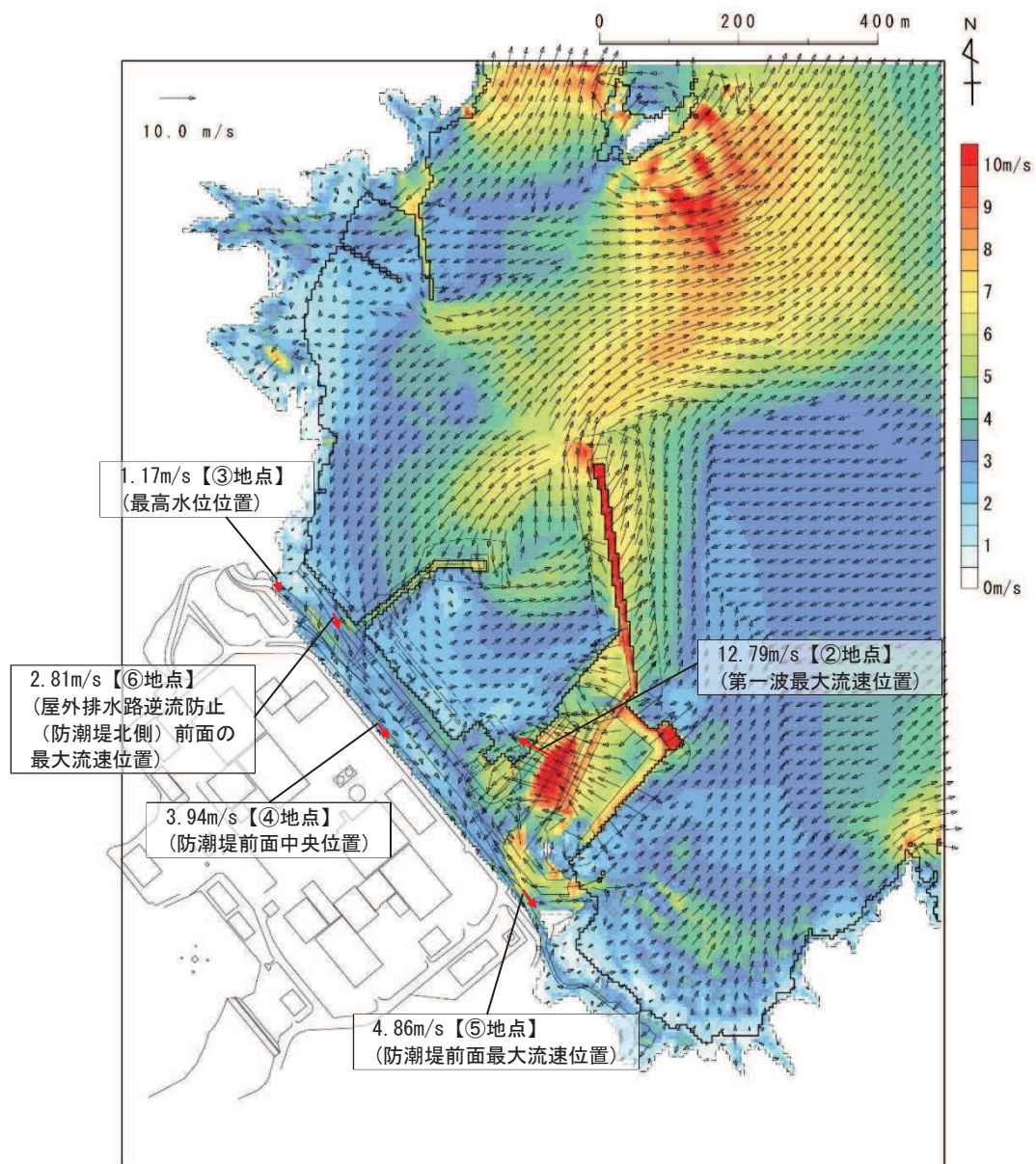


図 4.3-9(2) 基準津波における最大流速分布図

(防波堤あり，基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし，地震発生から約 46 分後まで)

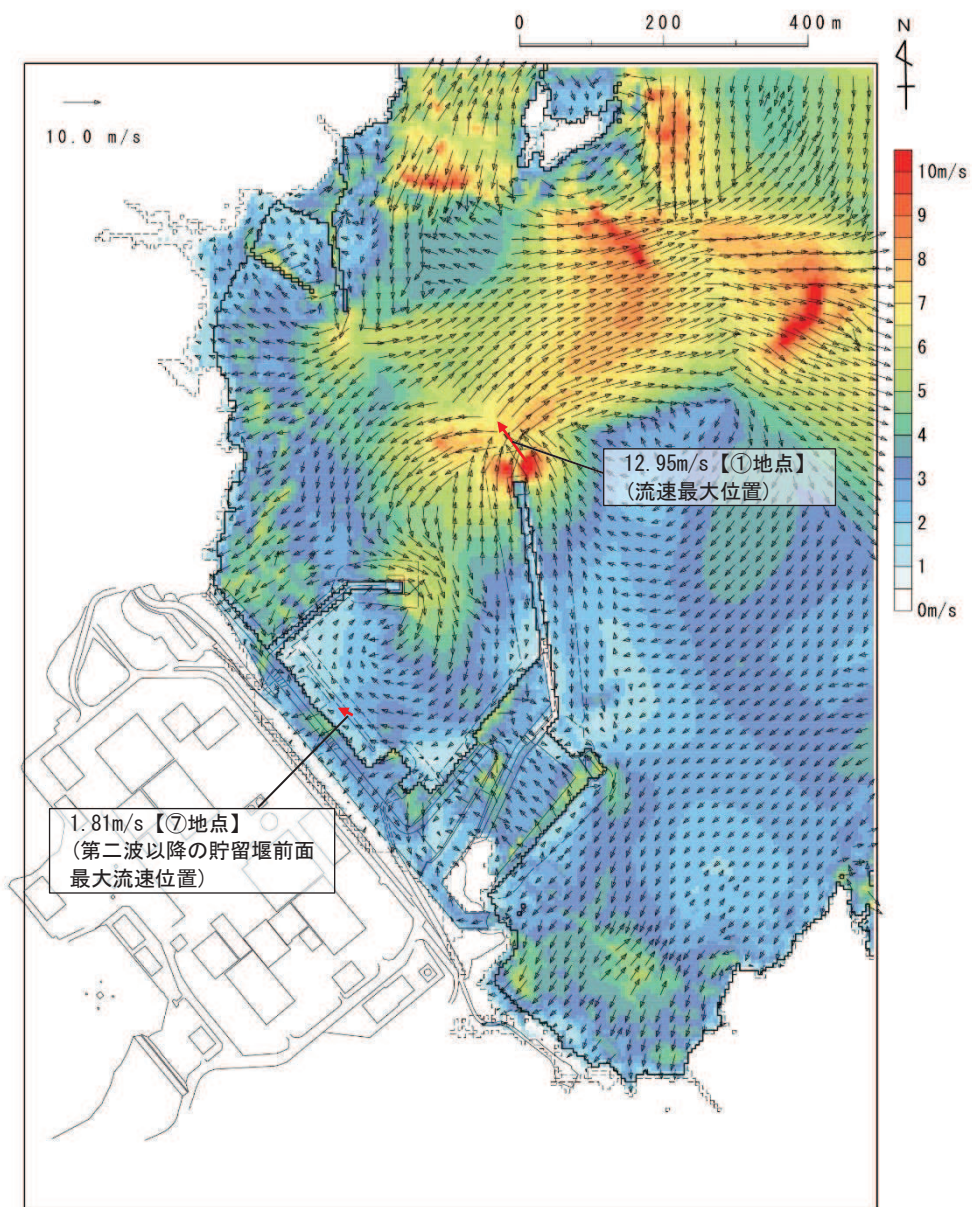


図 4.3-9(3) 基準津波における最大流速分布図  
(防波堤あり，基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし，約 46 分以降)

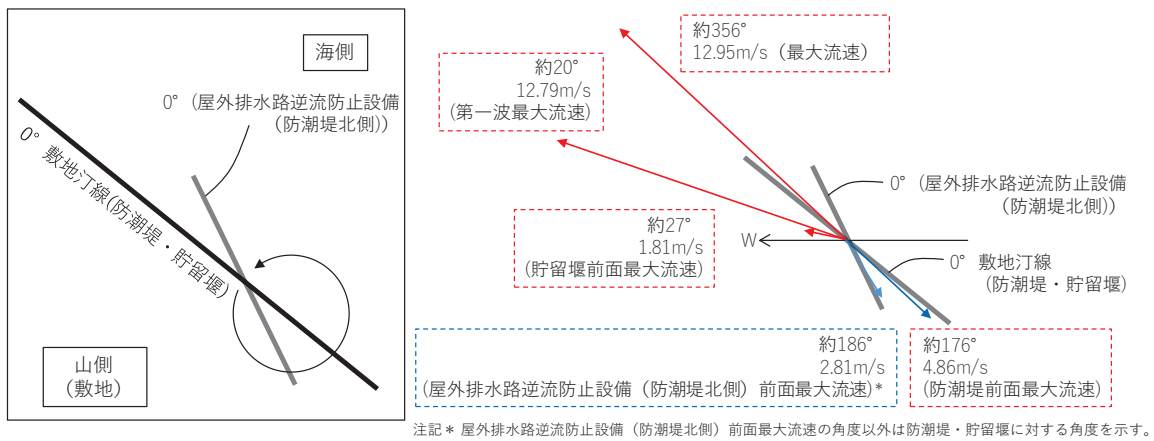


図 4.3-10 防潮堤・屋外排水路逆流防止設備 (防潮堤北側)・貯留堰に対する流向の角度

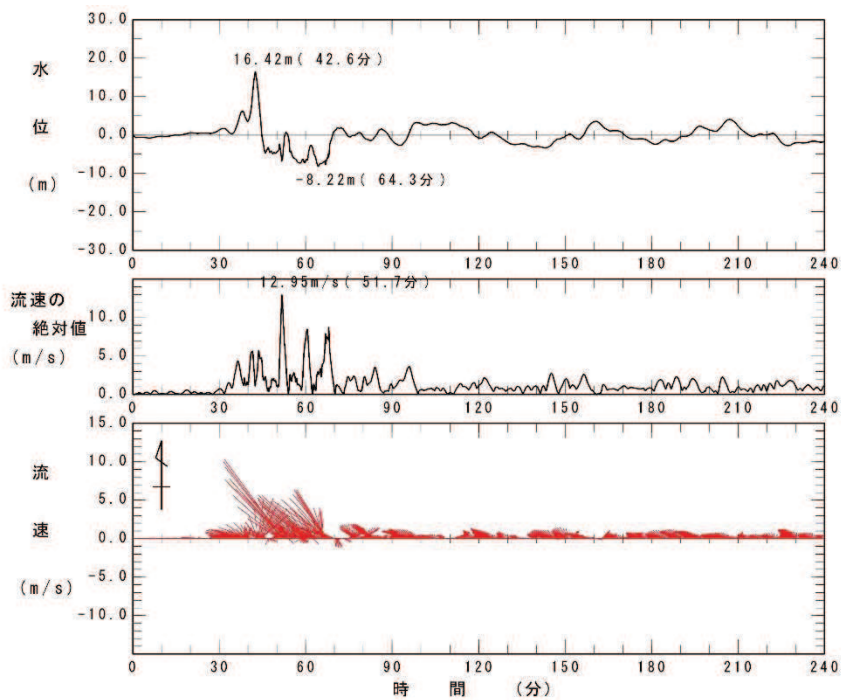


図 4.3-11 全時刻での最大流速位置の流速とベクトルの時刻歴データ (①地点, 防波堤あり, 基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし)

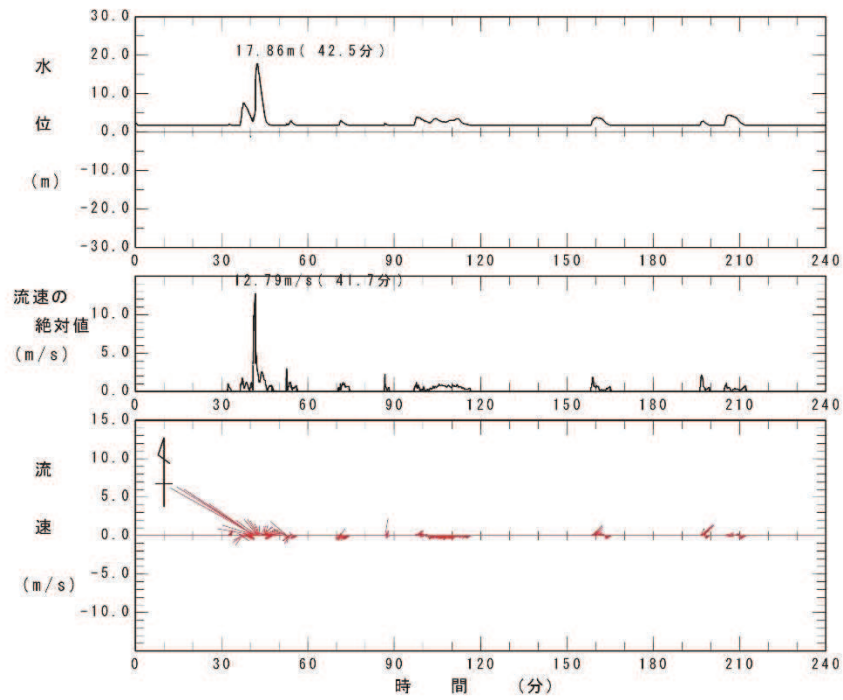


図 4.3-12 第一波での最大流速位置の流速とベクトルの時刻歴データ  
 (②地点, 防波堤あり, 基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし)

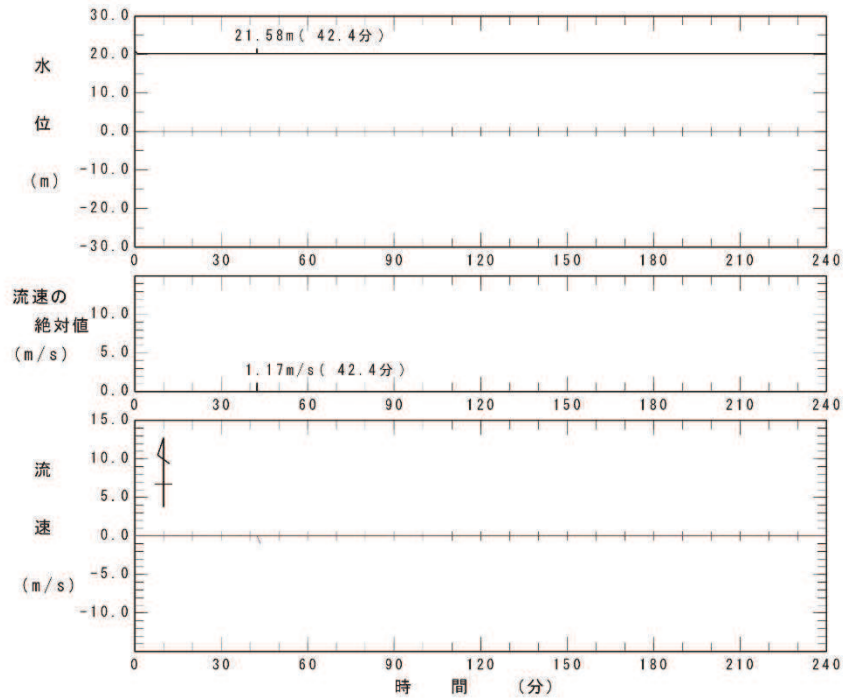


図 4.3-13(1) 防潮堤前面 (最高水位) 位置での流速とベクトルの時刻歴データ  
 (③地点, 防波堤あり, 基準地震動  $S_s$  による地盤沈下なし, 全時刻)

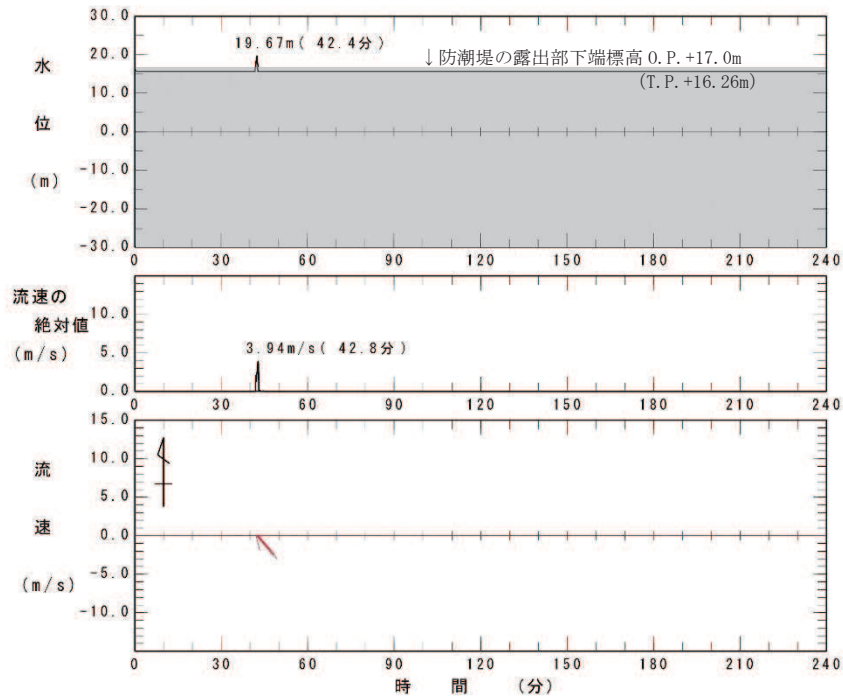


図 4.3-13(2) 防潮堤前面（中央位置）位置での流速とベクトルの時刻歴データ  
 (④地点, 防波堤あり, 基準地震動S<sub>s</sub>による地盤沈下なし, 全時刻)

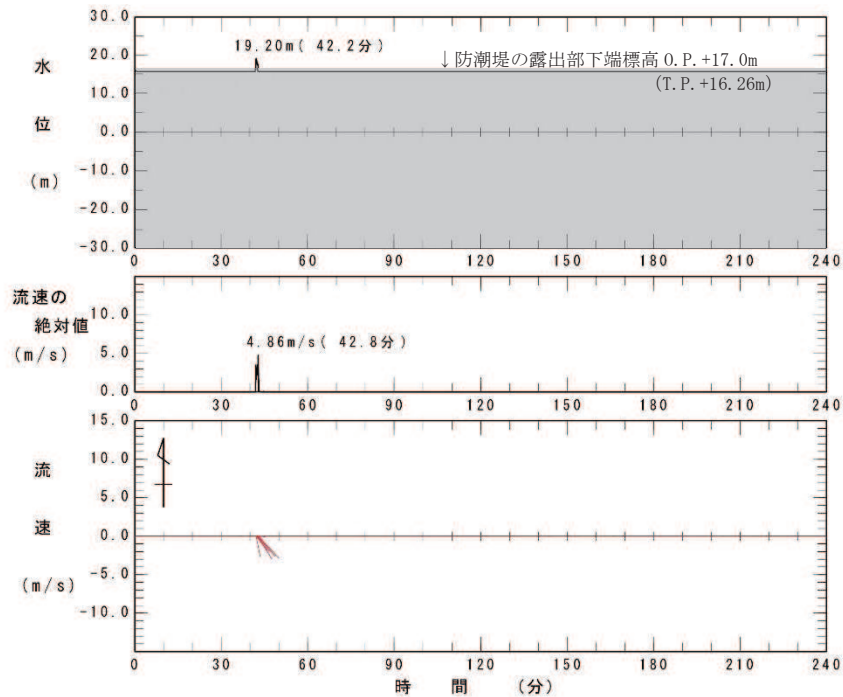


図 4.3-13(3) 防潮堤前面（最大流速）位置での流速とベクトルの時刻歴データ  
 (⑤地点, 防波堤あり, 基準地震動S<sub>s</sub>による地盤沈下なし, 全時刻)

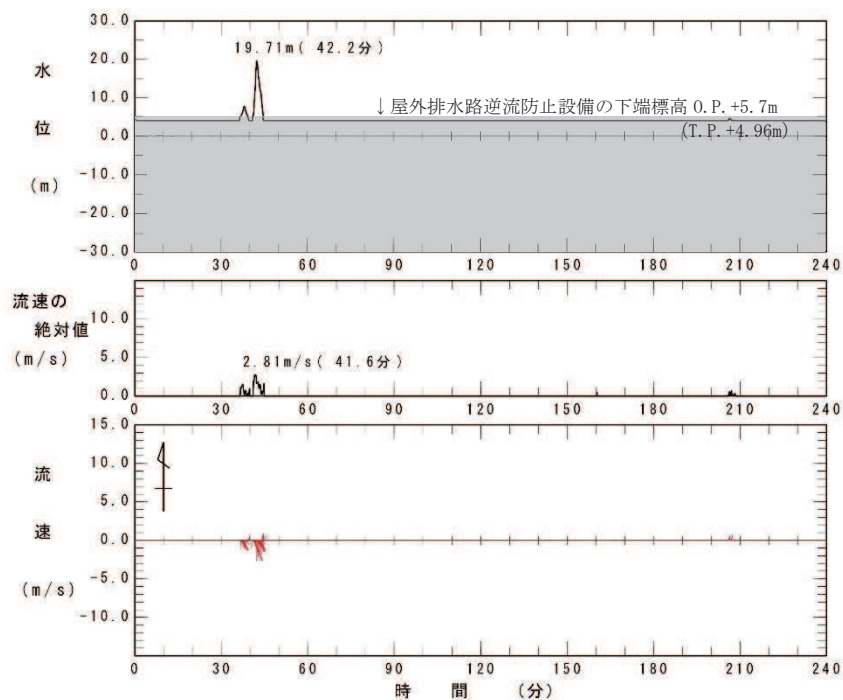


図 4.3-14 屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）前面位置\*での  
流速とベクトルの時刻歴データ

(⑥地点, 防波堤あり, 基準地震動S<sub>s</sub>による地盤沈下なし, 全時刻)

注記\*: 防潮堤（盛土堤防）の前面位置と同じ

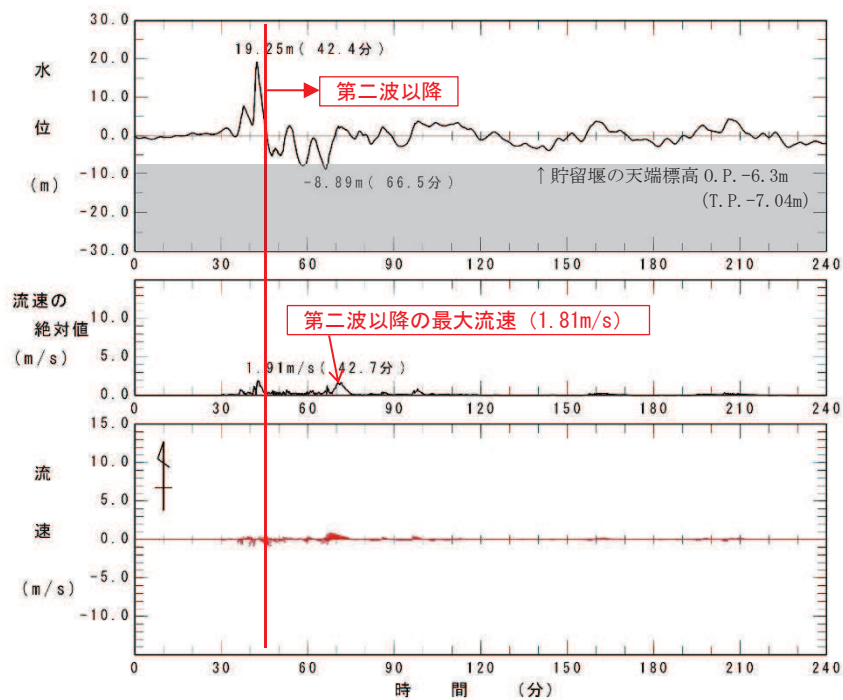


図 4.3-15 貯留堰前面位置での流速とベクトルの時刻歴データ

(⑦地点, 防波堤あり, 基準地震動S<sub>s</sub>による地盤沈下なし, 全時刻)



#### 4.3.3 衝突荷重として考慮する漂流物の選定

「4.2 取水口付近の漂流物に対する取水性」で取水口前面に到達する可能性があるとして評価した漂流物（表 4.3-2）の初期配置を整理した上で、衝突荷重として考慮する漂流物を選定した。

表4.3-2 取水口前面に到達する可能性があるとして評価した漂流物

調査範囲		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	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	総トン数：約5t (排水トン数：約15t)	浮遊
			がれき	—	浮遊
		陸域	がれき	—	浮遊
			車両	—	浮遊
	小屋取地区以外 (女川等)	海域	がれき	—	浮遊
			漁船	総トン数：約19t (排水トン数：約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	22t以下* (約200k1)	浮遊			

注記 \*：敷地外のタンクの重量は、発電所の軽油タンク（撤去済み：330k1）の重量が約22tであることを踏まえ、保守的にこれと同等として22tを考慮する。

### ① 漂流物の初期配置

漂流物による衝突荷重は、漂流物となるものが津波襲来時に配置されている場所（以下「初期配置」という。）が重要となるため、「4.2 取水口付近の漂流物に対する取水性」で取水口前面に到達する可能性があると評価した漂流物を対象に初期配置の区分を行った。

敷地内に初期配置されているものは、津波の第一波により漂流するため、衝突荷重への影響が大きいと判断し、「直近陸域」と設定した（図 4.3-16）。

「直近陸域」は図 4.3-16 に示すとおり防潮堤から約 500m の範囲内にあるため、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）及び貯留堰も含めた 500m の海域内の漂流物も津波の第一波により漂流して衝突荷重に大きな影響を及ぼすと考え、この範囲内の海域を「直近海域」として設定した。また、「直近海域」よりも沖側を「前面海域」として設定した（図 4.3-17）。

なお、発電所周辺の流向・流速の観点から「直近海域」の特徴を確認した。図 4.3-18 に基準津波の第一波襲来時（地震発生から 40～43 分後）の流向・流速を、図 4.3-19 に地震発生から 46 分後までの発電所周辺の最大流速分布と「直近海域」の関係を示す。これらの図から、基準津波の第一波が襲来する数分間は発電所に一様に向かってくる状況となっており、地震発生から 46 分後までの発電所周辺の最大流速は概ね「直近海域」で生じていることから、「直近海域」からの漂流物の影響が大きくなることが考えられる。

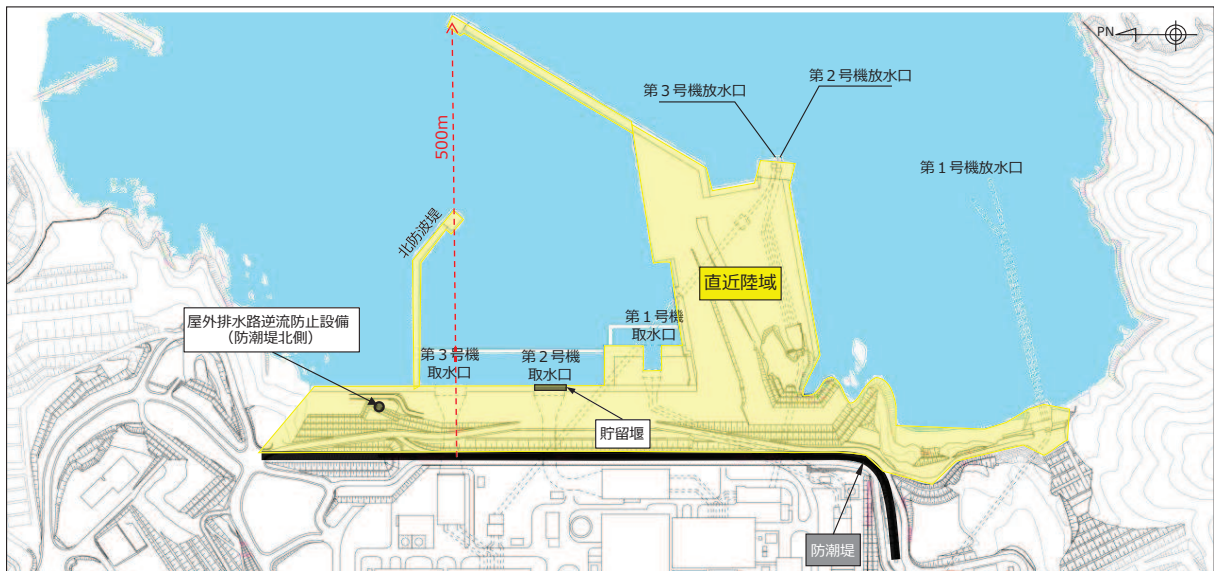


図 4.3-16 「直近陸域」の区分

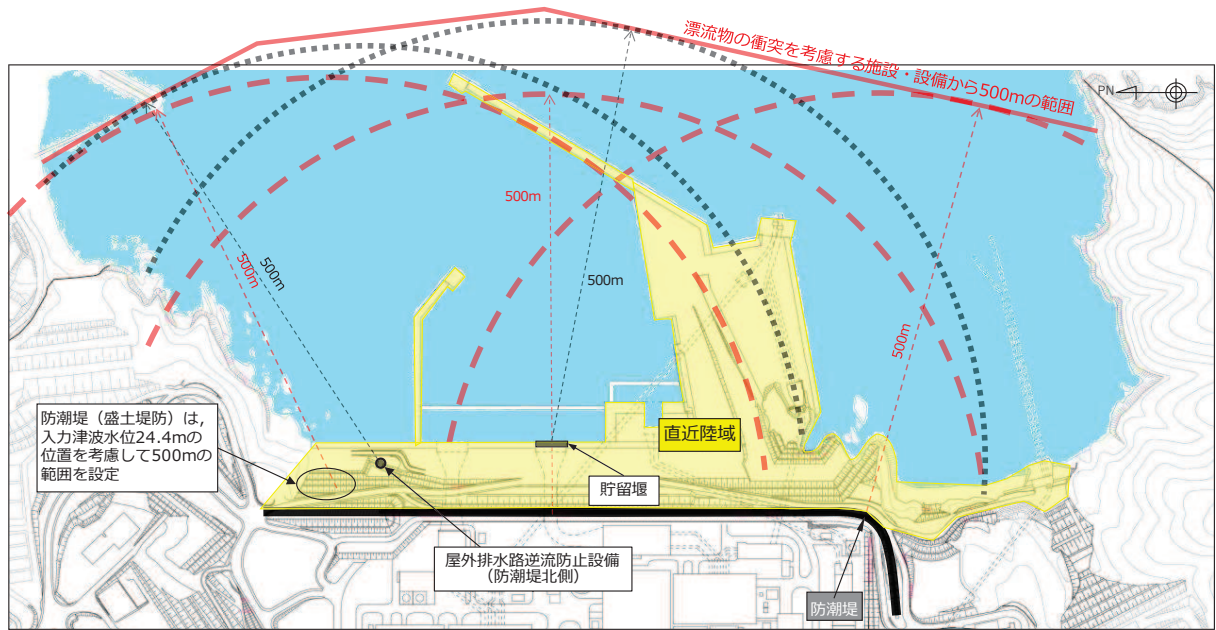


図 4.3-17(1) 「直近海域」の区分  
 (防潮堤, 貯留堰及び屋外排水路逆流防止設備 (防潮堤北側) から 500m の隔離)

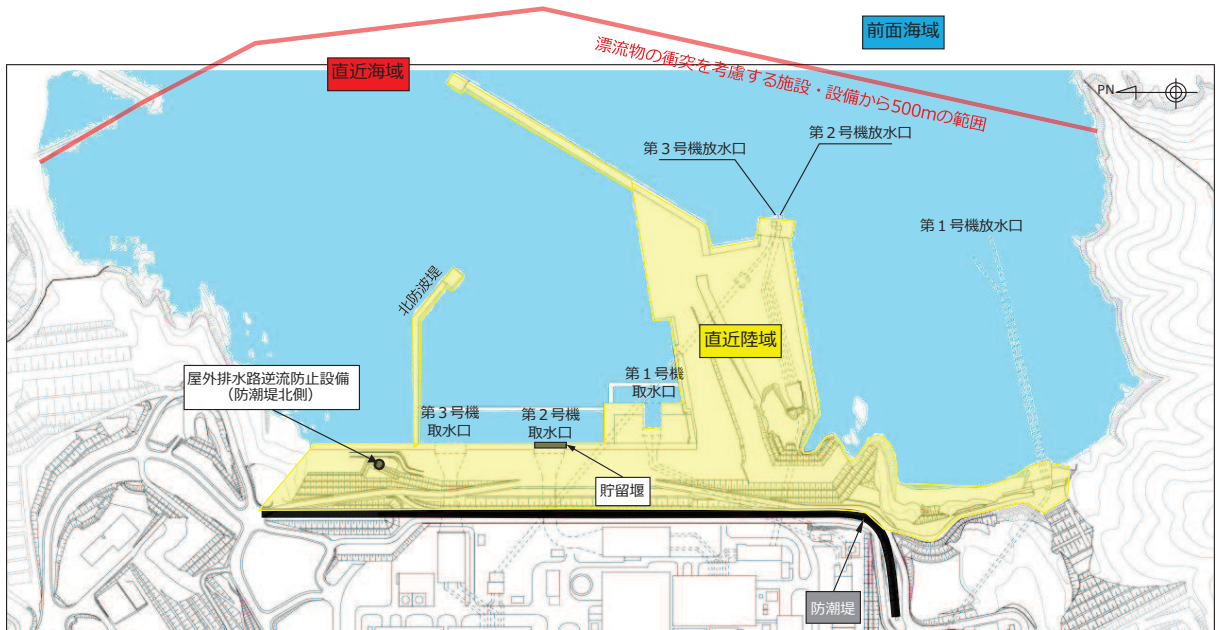


図 4.3-17(2) 「直近海域」の区分

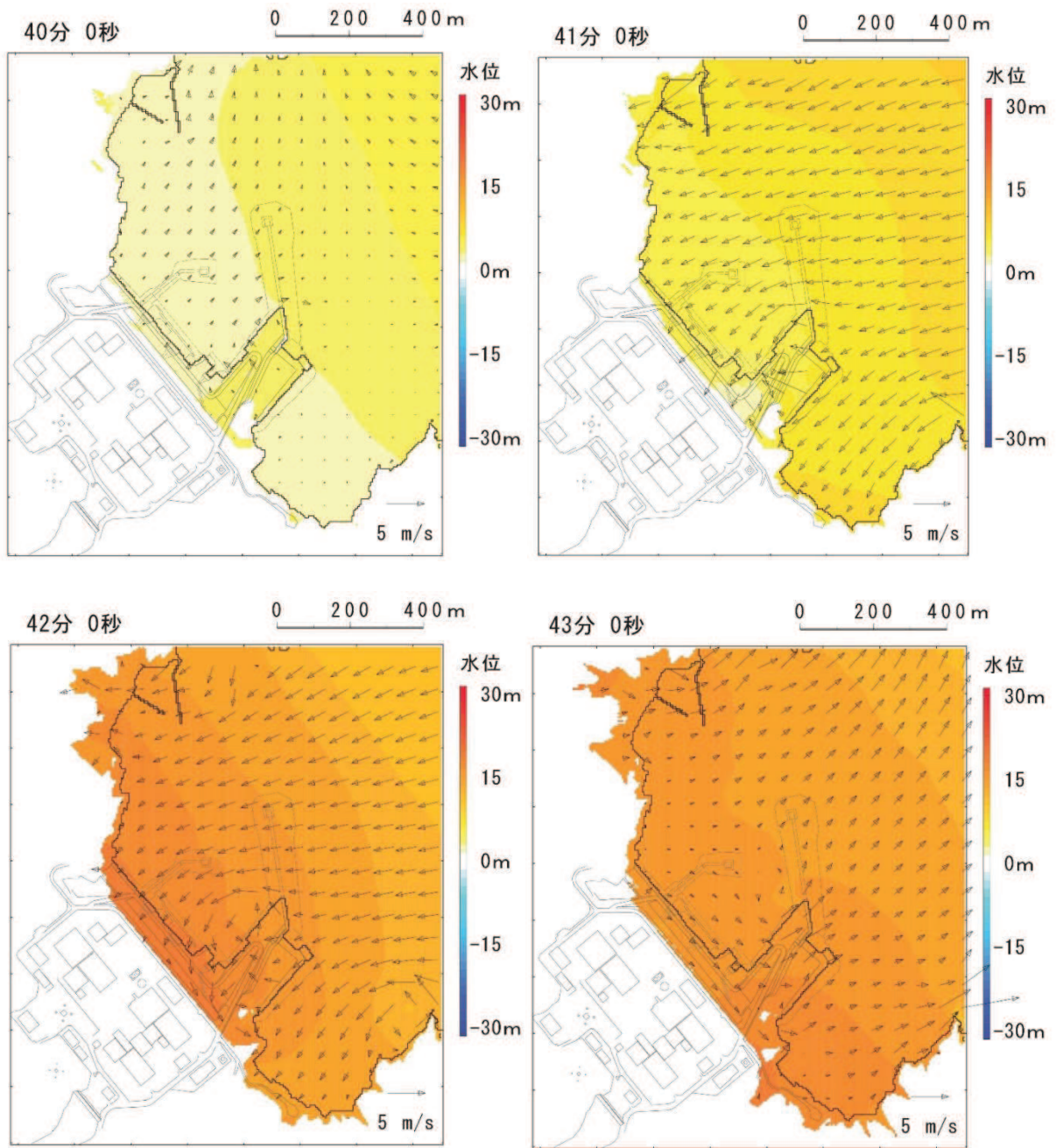


図 4.3-18 基準津波の第一波襲来時（地震発生から 40～43 分後）の流向・流速

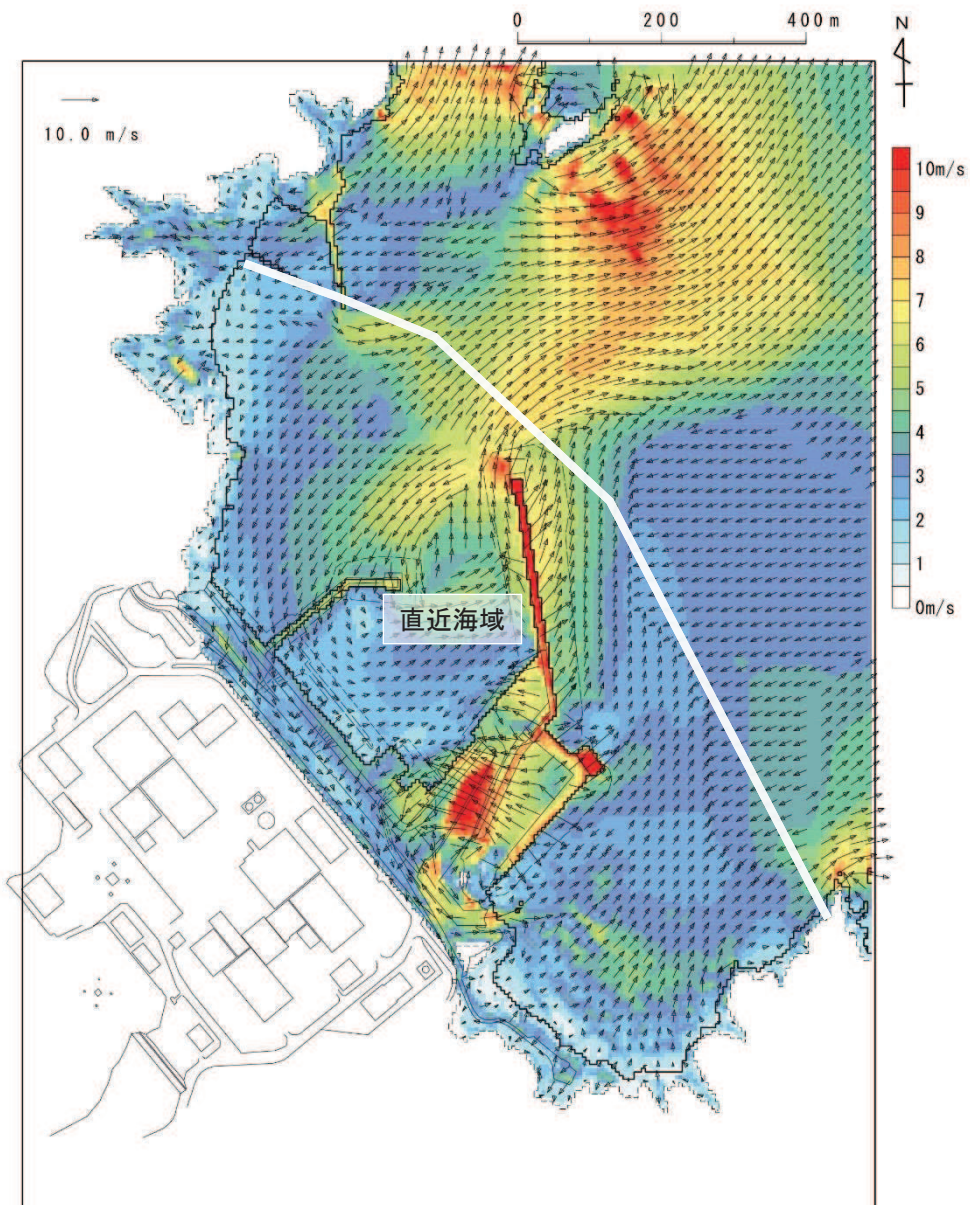


図 4.3-19 基準津波における最大流速分布図と「直近海域」の関係  
(地震発生から約 46 分後まで)

a. 直近陸域

「直近陸域」は、図 4.3-16 に示す範囲であり、防潮堤よりも海側の敷地内であることから、「4.2 取水口付近の漂流物に対する取水性」で取水口前面に到達する可能性があるとして評価した漂流物のうち、敷地内として整理されているものが該当する。

b. 直近海域

防潮堤、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）及び貯留堰からの離隔が 500m の範囲の海域が「直近海域」であるが、図 4.3-20 に示すように、その大部分は漁業権消滅区域に設定されている。ただし、「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がある（以下、「直近海域（北西部）」という。）。

このような状況を踏まえ、初期配置が「直近海域」となる漂流物について検討を行った。なお、発電所港湾に入出港する船舶については「4.2 取水口付近の漂流物に対する取水性」に示すとおり津波時に退避することから、発電所港湾に入出港する船舶以外の船舶を検討対象とした。

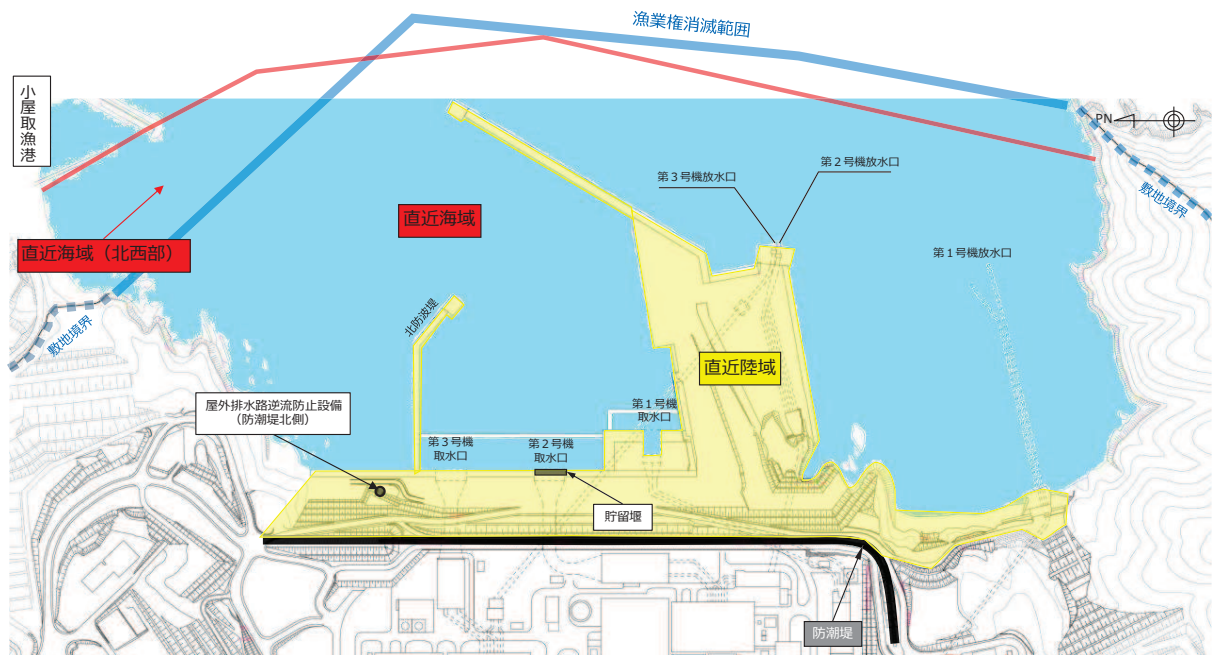


図 4.3-20 「直近海域」と漁業権消滅区域の関係

「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、通常時では小屋取漁港の漁船が漁をしていることが想定されるが、図 4.3-21 のとおり、「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からこの範囲で漁をしている可能性は極めて低い。一方、漁業権消滅区域では漁をしていないものの、漁船の航行は可能である。ただし、発電所は小規模な湾の奥に立地し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、発電所周辺の漁業権消滅区域内をわざわざ航行して移動する漁船はない（図 4.3-22）。

以上のことから、通常時では「直近海域（北西部）」で漁をしている可能性は極めて低いと考えられるものの、否定することはできないため、「直近海域（北西部）」で漁を行っていることを想定する。

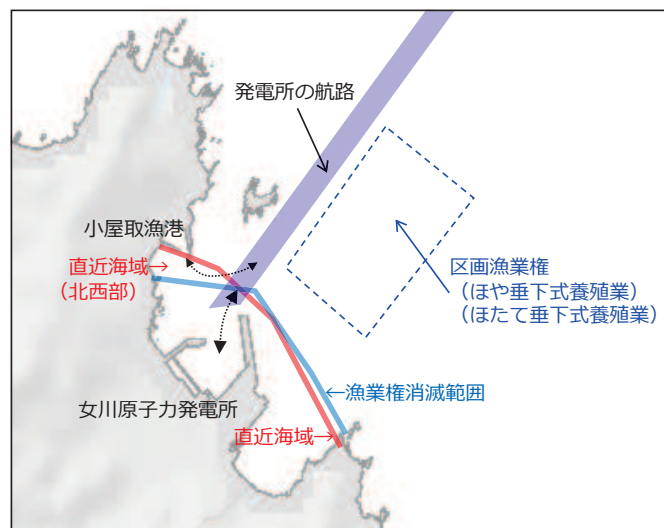


図 4.3-21 発電所前面の航路

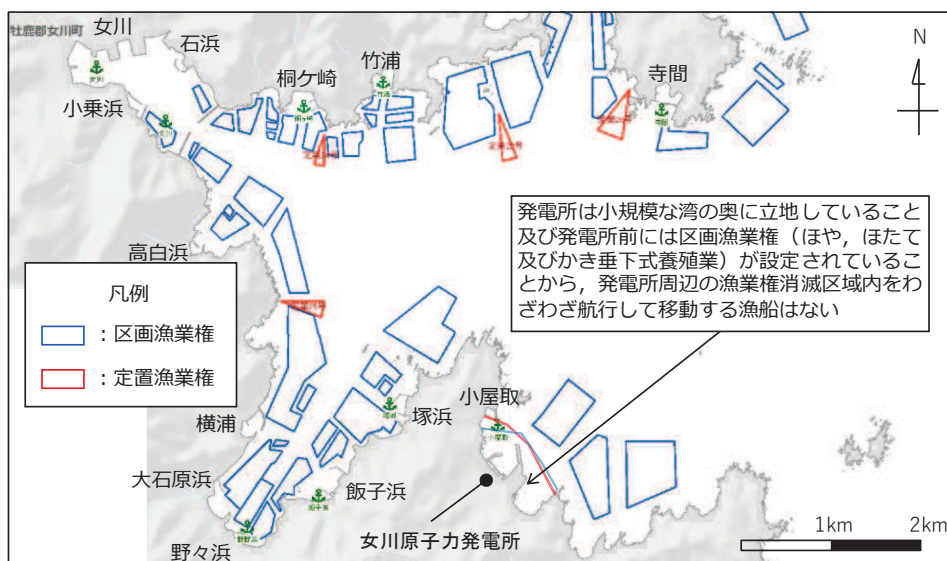


図 4.3-22 漁業権消滅区域を航行する可能性の検討

津波襲来時では、上記の「直近海域（北西部）」で漁を行っている漁船及び小屋取漁港で係留している漁船が沖へ退避する際に「直近海域」を航行する可能性があり、これらの漁船が「直近海域」を退避中に航行不能となる可能性は否定できないことから、退避中の小屋取漁港の漁船が「直近海域」に該当する（図4.3-23）。なお、「直近海域（北西部）」又はそれよりも沖で漁を行っていた漁船が係留するために小屋取漁港に戻ることは漁船破損に繋がるため、沖に留まる可能性が高いが、仮に漁港に戻ることを想定したとしても、沖への退避中に航行不能となった場合と同様の評価であり、小屋取漁港の漁船が「直近海域」に該当する。

なお、「直近海域（北西部）」を対象に流向・流速の特徴を確認した（参考2）。

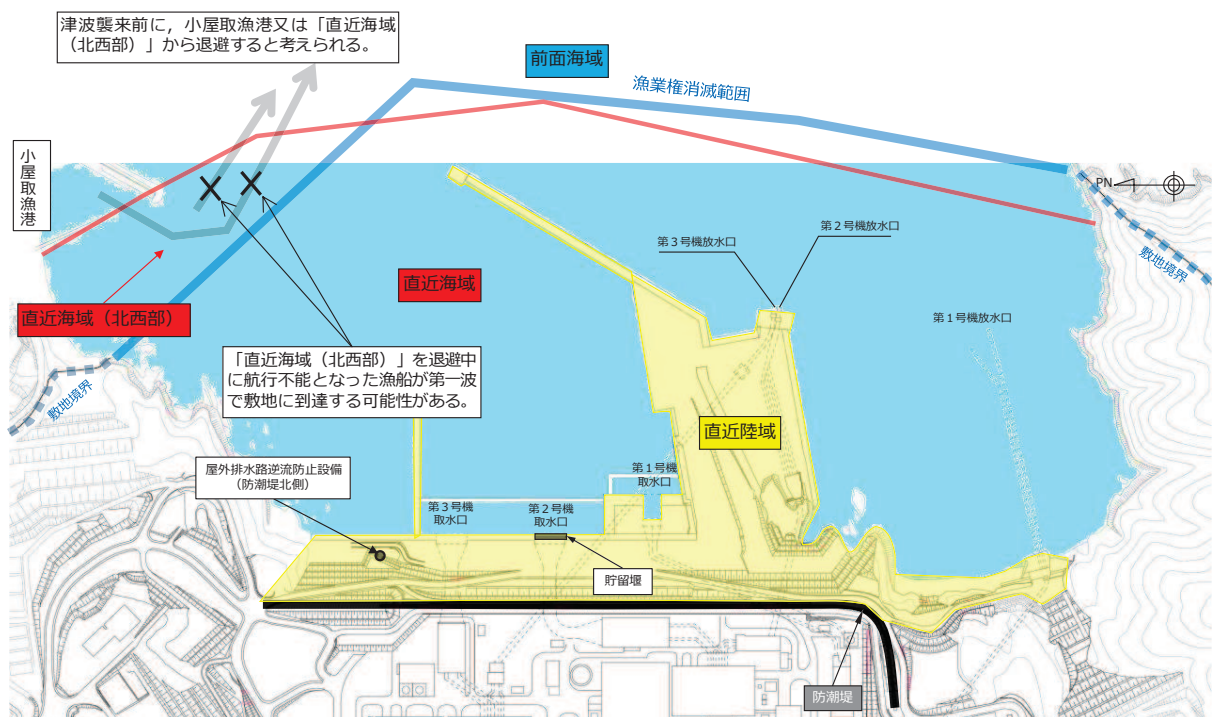


図 4.3-23 「直近海域」を初期位置とする漁船の考え方



さらに、小屋取漁港以外の漁船については、発電所が小規模な湾の奥に立地していることから、「直近海域」を航行することは津波襲来時の退避に対して時間的なロスとなるため、「直近海域」を航行せずに図 4.3-24 のとおり最短のルートで沖へ退避する。そのため、津波時に「直近海域」には小屋取漁港以外の漁船はいないと評価した。

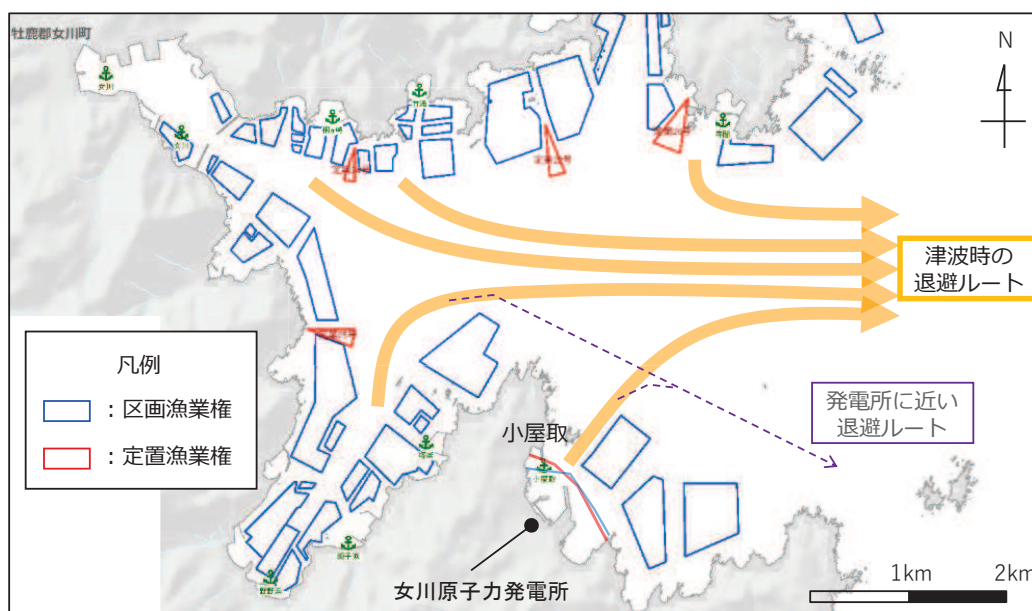


図 4.3-24 津波時における各漁港から沖へ向かう退避ルート

### c. 前面海域

通常時、「直近海域」よりも沖側の「前面海域」には、女川湾内の漁船が漁を行っているか、航行していることが想定される。

津波襲来時には、これらの漁をしている漁船と航行中の漁船に加え、各漁港から沖へ退避する漁船が図 4.3-24 のルートで退避することが想定されるが、これらの漁船が退避中において航行不能となる可能性は否定できない。

また、「前面海域」の漂流物が津波第一波で漂流して「直近海域」内に入り、第二波以降の津波によって衝突する可能性については、図 4.2-32～図 4.2-38 に示すとおり、津波第一波の特徴である東西方向の流れが支配的であるため、津波第一波で「直近海域」に漂流してくる可能性は低いと考える。

以上のことから、「前面海域」には女川湾内の漁船を考慮する。

「直近陸域」、「直近海域」及び「前面海域」に区分した結果を表 4.3-3 に示す。

表4.3-3 取水口前面に到達する可能性があるとして評価した漂流物

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

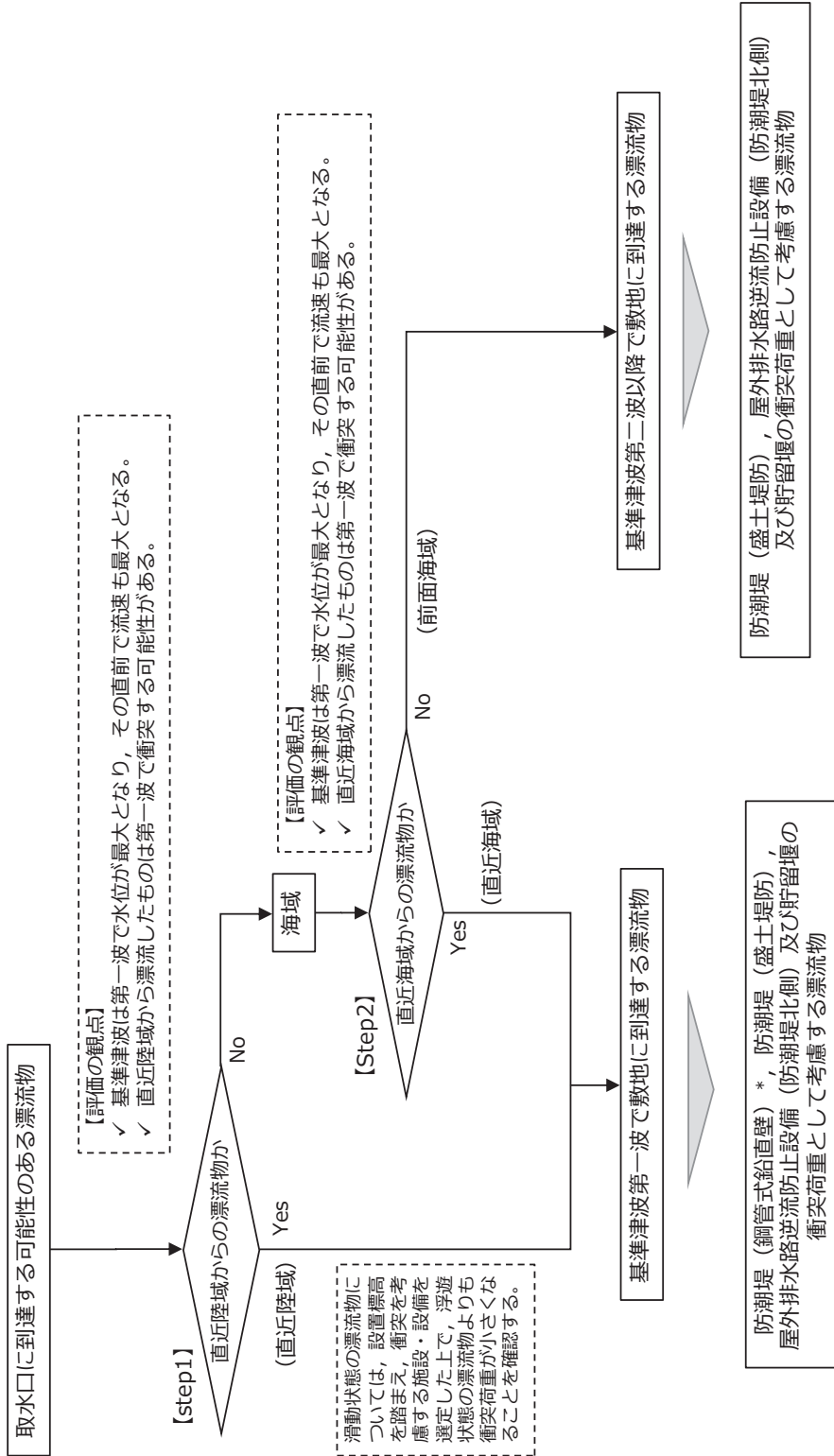
注記 \*1：「直近陸域」及び「直近海域」は、衝突を考慮する施設・設備から離隔が500m以内、「前面海域」は500m以上である。  
 \*2：敷地外のタンクの重量は、発電所の軽油タンク（撤去済み：330kl）の重量が約22tであることを踏まえ、保守的にこれと同等として22tを考慮する。

## ② 衝突荷重として考慮する漂流物の選定

基準津波の特性、漂流形態（浮遊、滑動）、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、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漂流物の選定を行った。選定フローを図 4.3-25 に示す。なお、防潮堤は構造の違いから防潮堤（鋼管式鉛直壁）と防潮堤（盛土堤防）に区分されることから、以降では2つに分けて評価を行うこととする。

Step1 として、「直近陸域」からの漂流物に整理されるものに関しては、いずれも津波第一波で到達すると考えられ、浮遊するものと滑動するものに区分される。このうち、浮遊するものに関しては、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）及び貯留堰に衝突する可能性があるとして整理した。一方、滑動するものに関しては、滑動するものが設置されていた標高よりも低い位置にある貯留堰に衝突する可能性があるとして整理した。なお、滑動するものが設置されていた標高よりも高い位置にある防潮堤（盛土堤防）及び屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）については、標高差に大きな差がないことから、念のため衝突する可能性があるとして整理した。滑動による漂流物が衝突する可能性のあるものの整理結果を表 4.3-4 に示す。

Step2 で「直近海域」からの漂流物として整理されたものに関しては、いずれも津波第一波で到達すると考えられ、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）及び貯留堰に衝突する可能性があるとして整理した。一方、Step2 で「前面海域」からの漂流物として整理されたものに関しては、図 4.3-18 及び図 4.3-19 の流向・流速の観点から、津波第一波で敷地に到達する可能性は低く、第二波以降で到達すると考えられる。そのため、設置高さを踏まえ、「前面海域」からの漂流物は貯留堰に衝突する可能性があるとして整理した。ただし、図 4.3-14 に示すとおり、第二波以降の津波水位と防潮堤（盛土堤防）及び屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）の設置高さに大きな差がないことを踏まえ、防潮堤（盛土堤防）及び屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）については、念のため「前面海域」からの漂流物の衝突荷重が「直近海域」からの漂流物の衝突荷重よりも小さくなることを確認する。



注記 \* : 防潮堤 (鋼管式鉛直壁) については、O.P.+17.0m以上に設置されており、  
 滑动状態の漂流物から十分に高い位置にあることから、滑动状態の漂流物は  
 衝突しない。

図 4.3-25 衝突荷重として考慮する漂流物の選定フロー

表4.3-4 衝突荷重として考慮する漂流物 (Step1: 直近陸域のうち滑動による漂流物)

調査範囲	取水口へ到達する漂流物	取水口への到達形態	設置標高	衝突荷重を考慮する施設・設備				
				防潮堤 (鋼管式鉛直壁) (O. P. +17. 0m)	防潮堤 (盛土堤防) (O. P. +5. 0m)	屋外排水路逆流防止設備 (防潮堤北側) (O. P. +5. 7m)	貯留堰 (O. P. -6. 3m)	
敷地内	陸域	角落し	滑動	主にO. P. +2. 5m ~O. P. +4. 0m	×*1	○*2	○*3	○*4
		第3号機モニタリング架台	滑動		×*1	○*2	○*3	○*4
		車両系重機・燃料等輸送車	滑動		×*1	○*2	○*3	○*4
		PC板 (カーテンウォール)	滑動		×*1	○*2	○*3	○*4
		キュービクル類	滑動		×*1	○*2	○*3	○*4

注記 \*1: 防潮堤 (鋼管式鉛直壁) の露出部下端標高はO. P. +17. 0mであり、滑動による漂流物の設置標高よりも十分に高い位置にあることから、衝突荷重を考慮する必要がないと判断。

\*2: 防潮堤 (盛土堤防) の下端標高はO. P. +5. 0mであり、滑動による漂流物の設置標高よりも高い位置にあるが、基準地震動S<sub>s</sub>による地盤沈下を考慮し、念のため、滑動による衝突荷重を考慮すると判断。

\*3: 屋外排水路逆流防止設備 (防潮堤北側) の下端標高はO. P. +5. 7mであり、滑動による漂流物の設置標高よりも高い位置にあるが、滑動する漂流物の寸法 (高さを有すること) を踏まえ、念のため、滑動による衝突荷重を考慮すると判断。

\*4: 貯留堰の天端標高はO. P. -6. 3mであり、滑動による漂流物の設置標高よりも低い位置にあることから、滑動による衝突荷重を考慮すると判断。

以上を踏まえ、衝突荷重として考慮する漂流物を表 4.3-5 に示す。また、各漂流物の重量の大小関係から、荷重算定に用いる代表漂流物を選定した結果を表 4.3-6 に示す。

防潮堤（鋼管式鉛直壁）、防潮堤（盛土堤防）及び屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）については、「直近陸域」の巡視点検用車両（2.15t）及び「直近海域」の小型漁船（総トン数 5t）を考慮する。また、貯留堰については、「直近陸域」の巡視点検用車両（2.15t）、「直近海域」の小型漁船（総トン数 5t）及び「前面海域」の漁船（総トン数 約 19t）を考慮する。なお、念のため、防潮堤（盛土堤防）及び屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）については、「前面海域」の漁船（総トン数 約 19t）による影響を確認することとする。滑動状態で衝突するものとしては、最大重量である「直近陸域」の車両系重機（41.2t）を防潮堤（盛土堤防）、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）及び貯留堰に考慮する。

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）及び貯留堰の衝突荷重として考慮する巡視点検用車両（2.15t）については、2019年9月時点で発電所の入構許可証を発行している約 2600 台の車両から、最も重量のある巡視点検用の車両として選定したものであるため、今後これよりも重い巡視点検用の車両が入構してくる可能性は低いと考えられるが、念のため 2.15t を超える巡視点検用車両については入構しないよう保安規定に定めることとする。また、「直近海域」からの衝突を考慮する小型漁船（総トン数 5t）については、小屋取漁港にある 18 隻の漁船（総トン数 0.7～4.7t、いずれも FRP 製）のうち最大の漁船（総トン数 4.7t、FRP 製）を想定している。なお、今後鋼製漁船や現状よりも重い漁船に変更されることが考えられるが、FRP の特徴である軽量、耐久性、形状の自由度、防錆製及び通信電波の透過性の観点から FRP 漁船から変更される可能性は極めて低く、また小屋取漁港の漁船は、藻類漁業（のり、わかめ等）、小型定置漁業（いわし等）、雑魚せん漁業及びその他漁業（あわび、うに等）を営んでおり、これらの漁業形態から総トン数 5t を超える漁船に変更される可能性も低いと考える。

表4.3-5 衝突荷重として考慮する漂流物と衝突荷重として考慮する施設・設備

調査範囲		衝突する可能性のある漂流物	重量等	取水口への到達形態	初期配置区分	漂流物が到達するタイミング	衝突荷重を考慮する施設・設備	
敷地内	陸域	角落し	約7t	滑動	直近陸域	第一波で到達	防潮堤（盛土堤防）*4 屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）*4 貯留堰*4	
		第3号機モニタリング架台	—*1	滑動	直近陸域	第一波で到達		
		車両系重機・燃料等輸送車	2.7～41.2t	滑動	直近陸域	第一波で到達		
		PC板（カーテンウォール）	約8t	滑動	直近陸域	第一波で到達		
		キュービクル類	約5t	滑動	直近陸域	第一波で到達		
		がれき	—*2	浮遊	直近陸域	第一波で到達		
	巡視点検用車両	2.15t	浮遊	直近陸域	第一波で到達	防潮堤（盛土堤防） 防潮堤（鋼管式鉛直壁） 屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側） 貯留堰		
海域	ゴムボート	1t未満	浮遊	直近海域	第一波で到達			
敷地外	小屋取地区	海域	小型漁船（FRP）	総トン数：5t*6 （排水トン数：15t）	浮遊	直近海域	第一波で到達	貯留堰 防潮堤（盛土堤防）*7 屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）*7
			がれき	—*2	浮遊	前面海域	第二波以降で到達	
		陸域	がれき	—*2	浮遊	前面海域	第二波以降で到達	
	車両		—*3	浮遊	前面海域	第二波以降で到達		
	小屋取地区以外（女川等）	海域	がれき	—*2	浮遊	前面海域	第二波以降で到達	
			漁船（FRP）	総トン数：約19t （排水トン数：約57t）	浮遊	前面海域	第二波以降で到達	
		陸域	がれき	—*2	浮遊	前面海域	第二波以降で到達	
			車両	—*3	浮遊	前面海域	第二波以降で到達	
			コンテナ・ユニットハウス	約30t	浮遊	前面海域	第二波以降で到達	
タンク	22t以下*5 （約200k1）	浮遊	前面海域	第二波以降で到達				

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。  
 \*4：滑動状態で衝突することを踏まえ、0.P.+17.0m以上に設置される防潮堤（鋼管式鉛直壁）は対象外とする。  
 \*5：敷地外のタンクの重量は、発電所の軽油タンク（撤去済み：330k1）の重量が約22tであることを踏まえ、保守的にこれと同等として22tを考慮。  
 \*6：小屋取漁港の小型船舶は最大で総トン数4.7tであるが、保守的に総トン数5tとして評価する。  
 \*7：防潮堤（盛土堤防）及び屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）は、念のため第二波以降で敷地に到達する漂流物の影響を確認する。

表4.3-6 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	漂流物が到達するタイミング	衝突荷重を考慮する施設・設備			
					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	第一波で到達	—	○	○	○
巡視点検用車両	2.15t	浮遊	直近陸域	第一波で到達	○	○	○	○
小型漁船 (FRP)	総トン数：5t (排水トン数：15t)	浮遊	直近海域	第一波で到達	○	○	○	○
漁船 (FRP)	総トン数：約19t (排水トン数：約57t)	浮遊	前面海域	第二波以降で到達	—	○	○	○



#### 4.3.4 浮遊状態の漂流物による衝突荷重の算定方法

##### ① 規格・基準類及び既往の研究論文の整理

規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物による衝突荷重算定式を表 4.3-7 に示す。

表 4.3-7 (1) 規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物による衝突荷重算定式の整理

No.	出典	種類	概要及び算定式	算定式の適用性が確認された範囲 (実験条件等)
①	松富ほか (1999)	流木	<p>津波による流木の漂流荷重を提案している。本式は円柱形状の流木が縦向きに衝突する場合の漂流荷重算定式である。</p> $F_m / (\gamma D^2 L) = 1.6 C_{MA} \{v_{A0} / (gD)^{0.5}\}^{1.2} (\sigma_y / \gamma L)^{0.4}$ <p><math>F_m</math> : 衝突力, <math>\gamma</math> : 流木の単位体積重量, <math>D</math> : 木材の直径,  <math>L</math> : 木材の長さ, <math>g</math> : 重力加速度, <math>C_{MA}</math> : 見かけの質量係数 (水の緩衝機能も加味), <math>v_{A0}</math> : 衝突速度, <math>\sigma_y</math> : 木材の降伏応力</p>	<p>「実験に基づく推定式」</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・見かけの質量係数に関する水路実験 (水路: 高さ0.5m, 幅0.3m, 長さ11.0m), 流木 (丸太) の直径: 4.8cm~12cm, 流木の重量: 305~8615gf</li> <li>・衝突荷重に関する空中での実験</li> </ul> <p>水理模型実験及び空中衝突実験において, 流木 (植生林ではない丸太) を被衝突体の前面 (2.5m以内) に設置した状態で衝突させている。女川のサイト条件を踏まえると, 被衝突体の直近に衝突体があることを仮定する場合に適用性がある可能性がある。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。</p>
②	池野・田中 (2003)	流木	<p>円柱以外にも角柱, 球の形状をした木材による漂流荷重を提案している。</p> $F_H / (gM) = S \cdot C_{MA} \cdot \{V_H / (g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})\}^{2.5}$ <p><math>F_H</math> : 衝突力, <math>g</math> : 重力加速度, <math>M</math> : 漂流物の質量,  <math>S</math> : 係数 (=5.0), <math>C_{MA}</math> : 付加質量係数, <math>V_H</math> : 漂流物移動速度,  <math>D</math> : 漂流物の直径 (角柱の場合は正方形断面辺長), <math>L</math> : 漂流物の長さ</p>	<p>「実験に基づく推定式」 (縮尺1/100 の模型実験)</p> <p>漂流物の形状: 円柱, 角柱, 球          漂流物重量: 0.588N~29.792N</p> <p>受圧板を陸上構造物と想定し, 衝突体を受圧板前面80cm (現地換算80m) 離れた位置に設置した状態で衝突させた実験である。模型縮尺 (1/100) を考慮した場合, 現地換算で直径2.6~8mの仮定となり, 女川のサイト条件を考慮すると適用性が無いものと判断する。</p>
③	道路橋示方書 (2002)	流木等	<p>橋 (橋脚) に自動車, 流木あるいは船舶等による漂流荷重を定めている。</p> $P = 0.1WU$ <p><math>P</math> : 衝突力, <math>W</math> : 流送物の重量, <math>U</math> : 表面流速</p>	<p>新規基準に基づく審査において適用された実績がある。</p> <p>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ことから, 被衝突体の前面海域からの漂流物を想定する場合に適用性があると判断する。</p>
④	FEMA 2 <sup>nd</sup> (2012) (FEMA : FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY)	流木 コンテナ	$F_i = 1.3u_{max}\sqrt{km_d(1+c)}$ <p><math>F_i</math> : 衝突力, <math>c</math> : 付加質量係数,  <math>u_{max}</math> : 漂流物を運ぶ流体の最大流速, <math>m_d</math> : 漂流物の質量,  <math>k</math> : 漂流物の有効軸剛性</p>	<p>「運動方程式に基づく衝突力方程式」</p> <p>非減衰系の振動方程式に基づいており, 衝突体及び被衝突体の両方とも完全弾性体で, かつ衝突時のエネルギー減衰が一切考慮されていない前提条件での算定式であることから, 衝突時に塑性変形を伴う漂流物の荷重算定では, 個別の漂流物に対して, 実現象を再現するような軸剛性を適切に定める必要がある。</p> <p>漂流物が地表面を転がるような場合は, 衝突流速を50%として良い可能性があるとの記載がある。</p>
⑤	水谷ほか (2005)	コンテナ	<p>漂流するコンテナの漂流荷重を提案している。</p> $F_m = 2\rho_w\eta_m B_c V_x^2 + \left(\frac{WV_x}{gdt}\right), \quad V_x \cong C_x = 2\sqrt{g\eta_m}$ <p><math>F_m</math> : 衝突力, <math>g</math> : 重力加速度, <math>W</math> : コンテナの重量,  <math>B_c</math> : コンテナ幅, <math>\rho_w</math> : 遡上波の最大水位, <math>dt</math> : 衝突時間,  <math>\rho_w</math> : 水の密度, <math>V_x</math> : コンテナの漂流速度, <math>C_x</math> : 津波の遡上流速</p>	<p>「実験に基づく推定式」 (縮尺1/75 の模型実験)</p> <p>使用コンテナ: 長さを20ft と40ft, コンテナ重量: 0.2N~1.3N 程度,          遡上流速: 1.0m/s 以下, 材質: アクリル</p> <p>被衝突体の直近のエプロン上にコンテナを設置して衝突力を求めた算定式である。衝突体と水塊が一体となって衝突し, 衝突前の運動量が全て力積として作用するものとして考えた算定式であり, 右辺の第1項は付加質量による荷重を表している。</p>

表 4.3-7(2) 規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物による衝突荷重算定式の整理

No.	出典	種類	概要及び算定式	算定式の適用性が確認された範囲（実験条件等）
⑥	有川ほか (2007, 2010)	流木 コンテナ	<p>鋼製構造物（コンテナ等）による漂流荷重を提案している。</p> $F = \gamma_p x^{\frac{2}{5}} \left( \frac{5}{4} \tilde{m} \right)^{\frac{3}{5}} v^{\frac{6}{5}}, x = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2}, k = \frac{(1 - \nu^2)}{\pi E}, \tilde{m} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ <p><math>F_m</math> : 衝突面半径の 1/2（ここではコンテナ衝突面の縦横長さの平均の 1/4）,  <math>E</math> : ヤング係数, <math>\nu</math> : ポアソン比, <math>m</math> : 質量, <math>v</math> : 衝突速度,  <math>\gamma_p</math> : 塑性によるエネルギー減衰効果, 添字 1, 2 は衝突体と被衝突体を表す。</p>	<p>「実験に基づく推定式」（縮尺 1/5 の模型実験）                      使用コンテナ：長さ 1.21m, 高さ 0.52m, 幅 0.49m                      衝突速度：1.0～2.5m/s 程度, 材質：鋼製                      水理模型実験では, コンテナを被衝突体の前面 1.21m（現地換算 6.05m）に設置して衝突力を求めた算定式である。                      衝突体の剛性 <math>k_1</math> と被衝突体の剛性 <math>k_2</math> の両方がパラメータとして含まれている算定式であり, 個別の漂流物に対して, 実現象を再現するような剛性に係る <math>k</math> 値を適切に定める必要があるが, 対象としている種類以外への適用性がある <math>k</math> 値に係る <math>k_1</math> 及び <math>k_2</math> の値, すなわち実験データを再現するよう同定された当該式の妥当な <math>k_1</math> 及び <math>k_2</math> の値が不明であるため, 現状では当該式は対象としている種類以外への適用は難しいと考える。</p>

② 漂流物による衝突荷重算定式の適用について

「①規格・基準類及び既往の研究論文の整理」で示した論文に対して、「4.3.3 衝突荷重として考慮する漂流物の選定」において区分した、漂流物の初期配置（「直近陸域」、「直近海域」及び「前面海域」）及び適用流速の観点も加えた結果を表 4.3-8 に示す。

表 4.3-8 規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物による衝突荷重算定式の整理結果

No.	出典	種類	漂流物の初期配置	適用流速	適用性
①	松富ほか (1999)	流木	直近陸域 直近海域	衝突速度	個別の流木 (丸太) の種類等に応じて、実現象を再現するようなパラメータを適切に定める必要があるという課題はあるものの、「直近陸域」又は「直近海域」からの流木に対して適用可能と判断する。 なお、衝突荷重として考慮する漂流物に流木は選定していない。
②	池野・田中 (2003)	流木	直近陸域	漂流物の移動速度	流木を対象とした算定式であるが、実験の模型縮尺 (1/100) を考慮すると、原子力発電所における漂流物衝突事象への適用は困難と判断する。 なお、衝突荷重として考慮する漂流物に流木は選定していない。
③	道路橋示方書 (2002)	流木等	前面海域	表面流速 (津波流速)	漂流物が流下 (漂流) して来た場合に、表面流速 (津波流速) を与えることで漂流流速に対する荷重を算定できるため、「前面海域」からの漂流物に対して適用可能と判断する。
④	FEMA 2 <sup>nd</sup> (2012) (FEMA : FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY)	流木 コンテナ	直近陸域	漂流物を運ぶ流体の最大流速	個別の漂流物に対して、実現象を再現するような軸剛性を適切に定める必要があるという課題はあるものの、「直近陸域」又は「直近海域」からの漂流物に対して適用可能と判断する。
⑤	水谷ほか (2005)	コンテナ	直近陸域	津波の遡上流速	エプロン上にコンテナを設置して衝突力を求めるという特殊な実験により得られた式であ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	直近陸域 直近海域	衝突速度	剛性に係るk値を適切に定める必要があるが、対象としている種類以外への適用性があるk値に係る $k_1$ 及び $k_2$ の値、すなわち実験データを再現するよう同定された当該式の妥当な $k_1$ 及び $k_2$ の値が不明であるため、現状は当該式が対象としている種類 (流木) 以外への適用は困難と判断する。 したがって、「直近陸域」又は「直近海域」からの流木に対して適用可能と判断する。 なお、衝突荷重として考慮する漂流物に流木は選定していない。

また、「4.3.3 衝突荷重として考慮する漂流物の選定」及び表 4.3-8 から、漂流物による衝突荷重算定式の適用について以下のとおり評価した。

a. 巡視点検用車両（以下「車両」という。）

規格・基準類及び既往の研究論文の漂流物による衝突荷重算定式において、車両を対象とした算定式としては、「FEMA (2012) \*<sup>1</sup>」が新規基準に基づく審査において適用された実績がある。これ以外のものとして、対象種別がコンテナとされている算定式（水谷ほか、有川ほか、道路橋示方書）の車両への適用についても検討した。

「水谷ほか (2005)」の式は、入力パラメータの車両に対する実験での検証がされていないため、車両への適用は難しいと考える。よって、車両の衝突荷重の算定の対象外とする。

「有川ほか (2007, 2010)」の式では、入力パラメータとして、衝突面積、ヤング率、ポアソン比、塑性によるエネルギー減衰効果が必要になるが、車両の実験データを再現するよう同定された当該式の妥当なパラメータが不明であるため、現状では当該式は車両への適用は難しいと考える。よって、車両の衝突荷重の試算の対象外とする。

「道路橋示方書 (2002)」は、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、「前面海域」からの漂流物に対して適用可能と考えるが、評価対象の車両は「直近陸域」からの漂流物であるため、衝突荷重の試算の対象外とした。

以上から、車両については「FEMA (2012) \*<sup>1</sup>」を適用することとする。

b. 漁船（以下「船舶」という。）

基準津波の第一波で衝突する船舶（総トン数 5t, FRP 製）については、軸剛性を適切に設定した上で、上記車両と同様に「FEMA (2012) \*<sup>1</sup>」を適用することとする。なお、「FEMA (2012) \*<sup>1</sup>」以外の算定式として「水谷ほか (2005)」及び「有川ほか (2007, 2010)」があるが、上記車両と同様に船舶への適用は難しいと考え、対象外とした。

また、基準津波の第二波以降で衝突する船舶（総トン数 19t）については、新規基準に基づく審査において、船舶に適用された実績がある「道路橋示方書 (2002)」を適用することとする。「道路橋示方書 (2002)」は、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ことから、被衝突体の前面海域からの漂流物を想定する場合に適用性があると判断し、前面海域からの船舶の衝突による荷重算定に適用する。なお、評価対象である貯留堰の前面における最大流速が約 1.9m/s (図 4.3-15) であるのに対して、全時刻の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の数値を切り上げた 13.0 m/s (1.9m/s の約 6.8 倍) を用いることで保守的な評価となるようにする。

#### 4.3.5 滑動状態の漂流物による衝突荷重の算定方法

海底又は陸上を滑動するものの衝突荷重算定式に関する知見は比較的少ないが、「FEMA (2019) \*2」によれば、漂流物の衝突に関して「ASCE (2016) \*3」に従うよう記載されており、「ASCE (2016) \*3」の中で、流速 4m/s の条件下で 2270kg の石材・コンクリート殻が海底を滑動する際の衝突荷重が例示されている。

この例示を参考に、滑動状態で衝突を考慮するもののうち、最も重量の大きい車両系重機 (41.2t) を対象に荷重を算定する。

なお、取水口付近の敷地陸域 (O.P.+2.5m) を滑動する漂流物が引き波により海側に滑動した場合、図 4.3-26 のように発電所港湾内に落下することが考えられるが、貯留堰は取水口の内側に設置されていることから、落下によって貯留堰に衝突することはない。

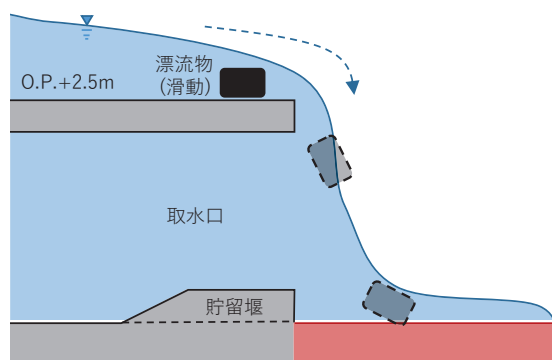


図 4.3-26 取水口付近の敷地陸域から滑動して発電所港湾内に落下する概念図

#### 4.3.6 漂流物による衝突荷重の算定における設計上の配慮について

漂流物による衝突荷重の算定においては、各パラメータについて、以下の項目を考慮して設定する。

##### ① 漂流物による衝突荷重算定用の流向

漂流物による衝突荷重は、漂流物が被衝突物に対して法線方向に作用する際に最大となると考えられる。「4.3.2 基準津波の特徴（水位、流向及び流速）の把握」で示したとおり、被衝突物である防潮堤、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）及び貯留堰前面での最大流速は法線方向と一致していない。そのため、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「4.3.7 ② b. 衝突形態」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、防潮堤（鋼管式鉛直壁）については漂流物が斜めから衝突することでねじれの影響があると考えられることを踏まえ、「6.1.2 防潮堤（鋼管式鉛直壁）の強度計算書に関する補足説明」においてその影響を確認することとする。

##### ② 漂流物による衝突荷重算定用の流速

漂流物による衝突荷重は、漂流物が被衝突物に衝突する速度、すなわち流速が大きければ荷重としても大きくなる。「4.3.2 基準津波の特徴（水位、流向及び流速）の把握」で示したとおり、防潮堤、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）及び貯留堰前面での最大流速は、約 4.9m/s、約 2.9m/s 及び約 1.9m/s であった。ただし、設計上の配慮として、被衝突物に漂流物が衝突する際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の数値を切り上げ、13.0 m/s とする。すなわち、この設計用の流速は、防潮堤前面、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）前面及び貯留堰前面における最大流速（約 4.9m/s、約 2.9m/s 及び約 1.9m/s）をそれぞれ約 2.6 倍、約 4.4 倍及び約 6.8 倍した値に相当する。

##### ③ 漂流物による衝突荷重と津波荷重との重畳

漂流物による衝突荷重と津波荷重の組合せについて、実際に施設に作用する荷重としては、津波による最大荷重と漂流物による最大荷重が同時に作用する可能性は小さく、「ASCE (2016) \*3」においても漂流物衝突と津波荷重の重畳は考慮する必要がないとされているものの、設計上の配慮として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。



#### 4.3.7 漂流物による衝突荷重の算定

衝突荷重として考慮する浮遊状態の漂流物として選定した船舶及び車両について、規格・基準類及び既往の研究論文の衝突荷重算定式の女川原子力発電所での適用性を考慮した上で、「直近陸域」の車両（2.15t）と「直近海域」の船舶（総トン数5t）は「FEMA（2012）\*1」,「前面海域」の船舶（総トン数19t）は道路橋示方書式を適用して衝突荷重を算定した。

また、滑動状態で衝突を考慮する車両系重機（41.2t）は、「ASCE（2016）\*3」の例示を参考に、衝突荷重を算定した。

「直近陸域」の車両（2.15t）と「直近海域」の船舶（総トン数5t）の衝突荷重算定時に用いる諸条件については、以下のとおり設定した。

##### ① 車両

車両の衝突荷重算定時に用いる「FEMA（2012）\*1」の付加質量係数  $C$  は保守的に最大値の  $C=1$  を適用する。

また、車両の軸剛性は、軽自動車（ $2.04 \times 10^6$  N/m）、セダン型乗用車（ $2.4 \times 10^6$  N/m）及び大型乗用車（ $2.8 \times 10^6$  N/m）から最大となる大型乗用車の軸剛性（ $2.8 \times 10^6$  N/m）を用いるものとする。なお、軽自動車の  $2.04 \times 10^6$  N/m は「高島ら（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  $2.4 \times 10^6$  N/m 及び大型乗用車の  $2.8 \times 10^6$  N/m は、「高島ら（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  $2.04 \times 10^6$  N/m よりも大きい値である。また、採用する軸剛性  $2.8 \times 10^6$  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、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（図4.3-27）。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  $2.8 \times 10^6$  N/m を採用することとする。

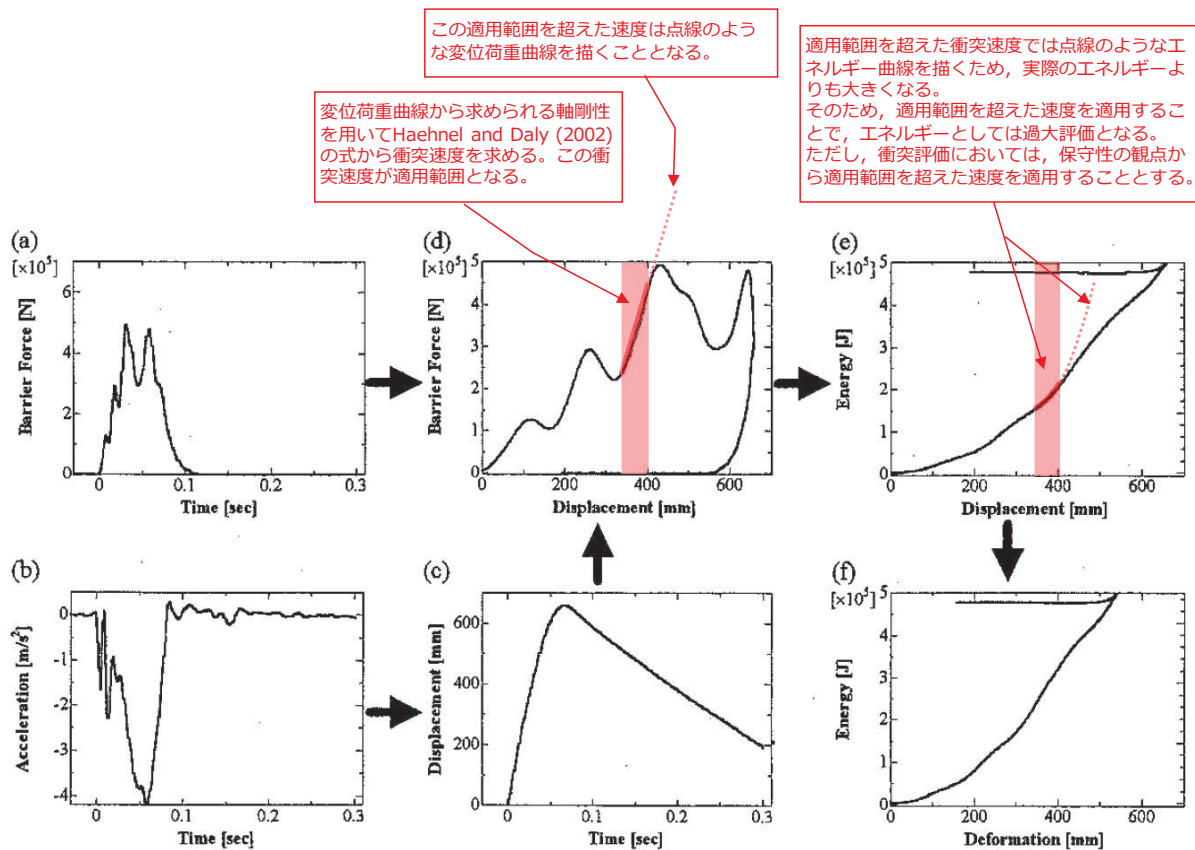


Fig.2 Calculation Process for Energy Absorption Characteristic

(エネルギー吸収特性の計算プロセス)

図 4.3-27 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）

## ② 船舶

### a. 付加質量係数

船舶の衝突荷重算定時に用いる「FEMA (2012) \*1」の付加質量係数  $C$  は、上記車両と同様に保守的に最大値の  $C=1$  を適用する。

### b. 衝突形態

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、衝突を評価する上では衝突形態が重要となる。そのため、衝突形態に関する検討を行った。

「構造物の衝撃挙動と設計法（(社)土木学会，1994）」（以下、「土木学会（1994）」という）によれば、実験の結果から、漂流船の衝突として、図 4.3-28 に示すとおり「航路直角面への正面衝突は、海洋構造物近傍の潮流の Shear-flow による船体の漂流方向の変更、並びに風による船体の横向き漂流現象によりあまりあり得ない。」とし、「一番頻度の高い衝突形態は、海洋構造物の隅角部への船首、船側及び船尾の衝突である。」としている。

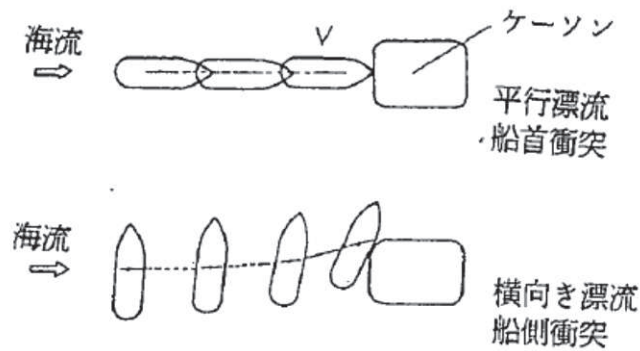


図 4.3-28 漂流による衝突形態（「土木学会（1994）」）

ただし、これらの衝突形態は被衝突物がケーソンを想定しているが、評価対象施設は、防潮堤、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）及び貯留堰であり、津波襲来方向に対して直角方向に堰き止める構造であることから、このような衝突形態の特徴とはならず、様々な形態で衝突すると考えられる。

そのため、評価対象施設に対して様々な形態で衝突することを考え、衝突荷重として保守的になるような衝突形態を想定し、衝突パターンと衝突形態の特徴を表 4.3-9 のとおり整理した。

その結果、衝突パターン a では 1 箇所衝突が生じるが、衝突パターン b～e に関しては 2 箇所以上で衝突が生じて荷重が分散されるため、評価対象施設に衝突荷重が集中荷重として作用するよう衝突パターン a での衝突形態を想定することとする。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。

その上で、衝突面積が小さく、評価対象施設に対してエネルギー密度が高くなる衝突形態としては、船首方向から衝突する a-1（最も衝突面積が小さい）と考えられることから、衝突パターン a-1（船首方向から衝突）を想定して、衝突荷重を算出することとする。

なお、念のため、衝突パターン a-2 及び a-3 による衝突荷重への影響の程度について確認する。

次に、船舶の衝突時のトリム（船首と船尾の喫水差）については、船舶が津波に押されてトリムが上がった状態（船首が上がった状態）で衝突と想定される。ただし、トリムが上がった状態では船舶の重心位置と衝突位置の関係から、衝突後に船舶がさらに上向きになり、荷重が逃げると考えられるため、保守的に船舶の重心位置と衝突位置が水平となるように考える。

表 4.3-9 船舶の衝突パターンと衝突形態の特徴

衝突パターン	津波の襲来方向	船舶の衝突向き	衝突形態の特徴
	<p>衝突を評価する施設に対して直角方向から津波が襲来。</p>	<p>衝突を評価する施設に対して直角方向（船首，船側，船尾）から衝突。</p>	<p>船首（又は船側，船尾）の1箇所で衝突する。なお，屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）及び貯留堰の幅は，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。また，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。</p>
	<p>衝突を評価する施設に対して直角方向から津波が襲来。</p>	<p>衝突を評価する施設に対して斜め向きで衝突。</p>	<p>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る。</p>
	<p>衝突を評価する施設に対して斜め方向から津波が襲来。</p>	<p>津波の襲来方向と同じ方向から船首又は船尾衝突。</p>	<p>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る。</p>
	<p>衝突を評価する施設に対して斜め方向から津波が襲来。</p>	<p>津波の襲来方向と同じ方向（船側）から衝突。</p>	<p>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る。</p>

### c. 軸剛性

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。

このような状況を踏まえ、FRP 製の材質を考慮できる方法を用い、荷重-変位関係から軸剛性を算出することとした。

船舶は、強固な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）に対して座屈強度が小さいと考えられることから、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。

「土木学会 (1994)」によれば、図 4.3-29 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いる。

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が、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。

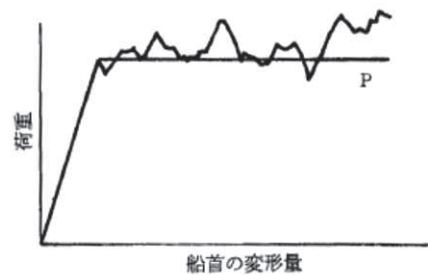


図 4.3-29(1) 荷重と船首の変形量（「土木学会 (1994)」）

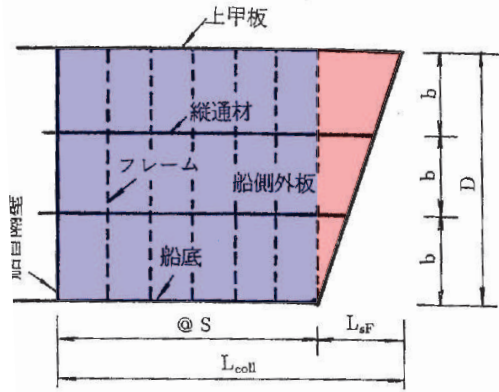


図 3.3 船首部の標準型

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。

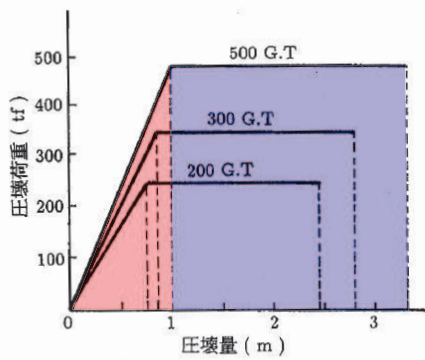


図 3.6 圧壊荷重と圧縮量

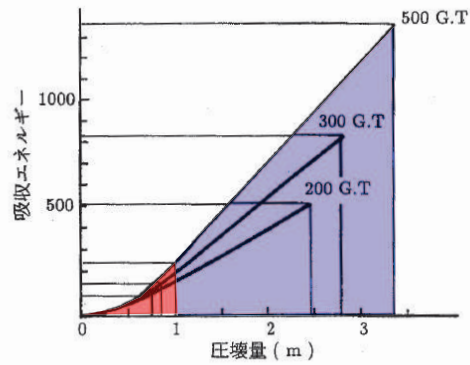


図 3.7 船側強度の算定

図 4.3-29 (2) 荷重と船首の変形量 (「土木学会 (1994)」に一部加筆)

これらを踏まえ、「土木学会（1994）」では、船舶の圧壊荷重（船首強度） $P_c$  については、以下に示す平板の座屈応力度の算定式から座屈強度  $\sigma_c$  を算出し、船首形状寸法等に乗じることで求められるとしている。

$$\sigma_c = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

$$P_c = 2Dt(\cos\theta)\sigma_c \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

ここで、

$E$	: ヤング率 (tf/m <sup>2</sup> )	$a$	: 横肋骨心距 (mm)
$\nu$	: ポアソン比	$b$	: 縦肋骨心距 (mm)
$k$	: 座屈係数 (( $b/a + a/b$ ) <sup>2</sup> )	$D$	: 船の深さ (m)
$t$	: 船側外板厚 (mm)	$2\theta$	: 船首角度 (°)

「土木学会（1994）」では、上記の式を鋼製の大型船舶に適用しているが、式中に船舶の材質を考慮できるヤング率  $E$  及びポアソン比  $\nu$  が入っていることから、適切にヤング率  $E$  及びポアソン比  $\nu$  を設定することで FRP 製の船舶の圧壊荷重を算出することが可能と考える。この「土木学会（1994）」に示された鋼製の船舶の圧壊荷重を FRP 製の船舶へ適用することについては、以下の点から妥当性があると評価した。

- ・ 「強化プラスチック船規則解説（日本海事協会会誌，1978）」によれば、「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、「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018）」の考え方が、鋼製の船舶を基本にしているものと考えられる。
- ・ 「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018）」で示されている縦強度や船側板厚の式が「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）」で示されている鋼製の船舶に適用する式を基に FRP の船舶に修正したものを採用している。

また、FRP 製の船舶の構造については、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「小型漁船のインベントリ分析に関する研究一 A：モデル船の建造・運航状況調査一（海上技術安全研究所報告 第

3 卷 第 5 号 (平成 15 年))」(図 4.3-30) に示されており、寸法、外形及び断面がほぼ同じであることから、FRP 製の船舶の構造は鋼製を含む他の船舶と同じ構造であると考えられる。評価対象である小屋取漁港の漁船もほたての養殖を営んでいることから、図 4.3-30(2) で示されている FRP 製の漁船と概ね同様の形状であると想定される。

さらに、「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 は座屈強度を基準に構造設計する必要があることとされており、FRP 製の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える。



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

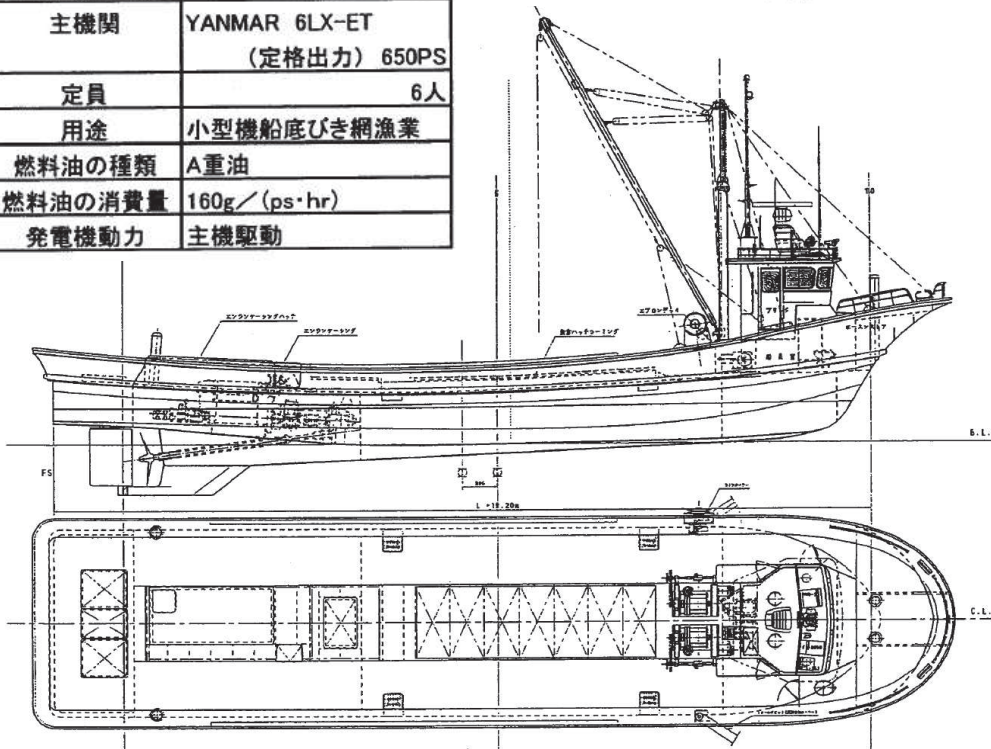


図-2.1 アルミ合金漁船の一般配置図

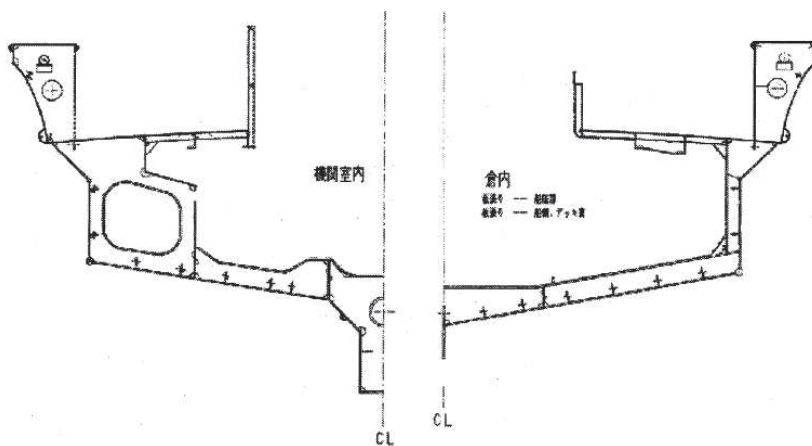


図-2.2 アルミ合金漁船の中央断面図

図 4.3-30 (1) アルミ合金漁船 (「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))」)

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

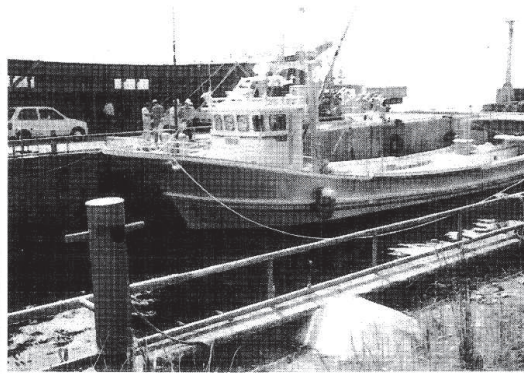


写真-2.2 FRP漁船

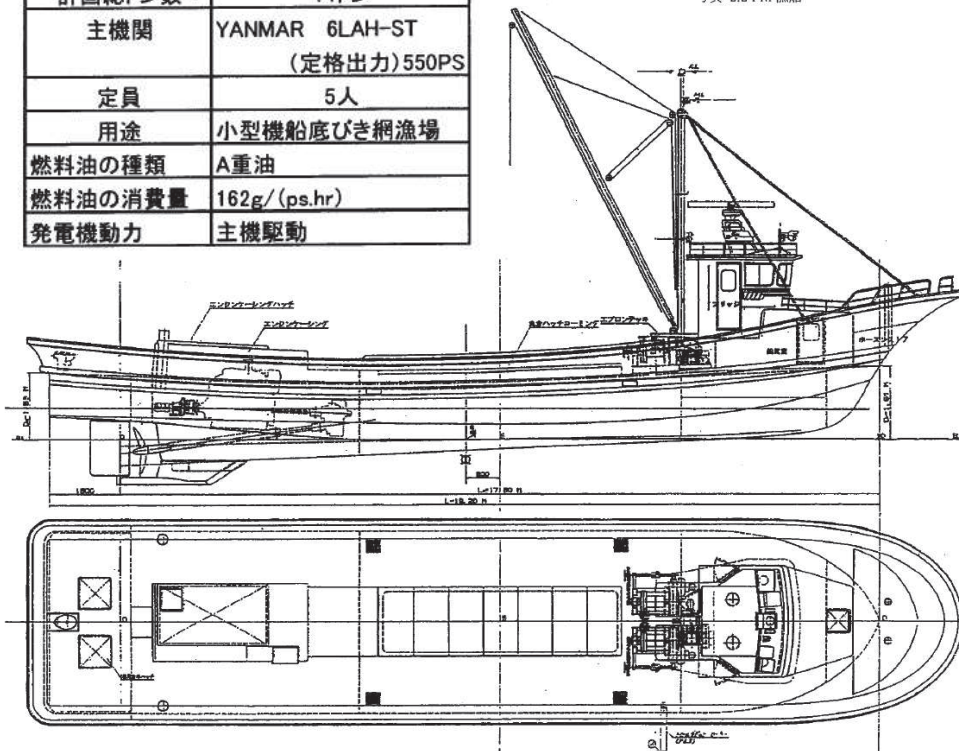


図-2.4 FRP漁船の一般配置図

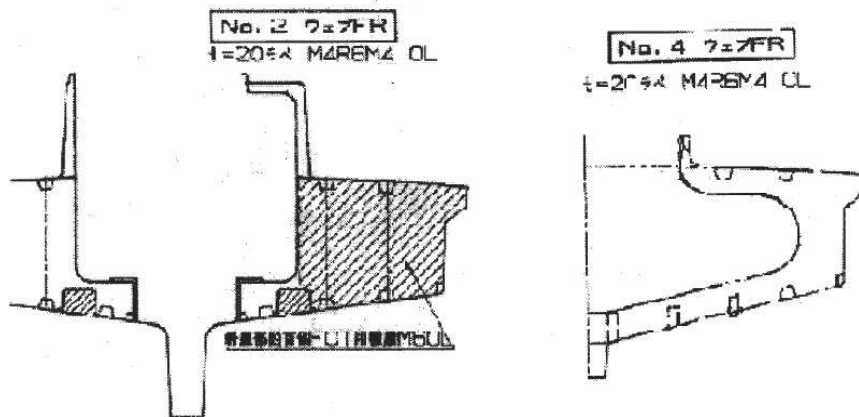


図-2.5 FRP漁船の横断面図

図 4.3-30 (2) FRP 漁船 (「小型漁船のインベントリ分析に関する研究一 A : モデル船の建造・運航状況調査一 (海上技術安全研究所報告 第 3 巻 第 5 号 (平成 15 年))」)

以上を踏まえ、式(4.1)及び式(4.2)を用いて圧壊荷重を算定する。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) については、不確かさ及びばらつきがあることから最大値又は最大値を上回るように設定する (表 4.3-10)。また、船舶の構造に係る条件については、表 4.3-11 に示すとおり「強化プラスチック船規則 (日本海事協会, 2018)」に従い算出する方法を基本に、「土木学会 (1994)」に記載の算出方法を用いた場合でも確認することとした。ここで、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ことを踏まえ、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・漁場の施設的设计参考図書 (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。

式(4.1)及び式(4.2)から FRP 製の船舶 (総トン数 5t) の圧壊荷重は、船体構造を「強化プラスチック船規則 (日本海事協会, 2018 年)」を基にした場合に 75.0kN、船体構造を鋼製の船舶 («土木学会 (1994)») を基にした場合に 35.6kN となる。

表4.3-10 FRP製の船舶（総トン数5t）の軸剛性算出に用いる入力条件一覧（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	$6.86 \times 10^3 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
		「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	9～12(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 <sup>2</sup> )
		「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 <sup>2</sup> )
$\nu$ : 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）	0.320～0.358

表 4.3-11 FRP 製の船舶（総トン数 5t）の軸剛性算出に用いる入力条件一覧（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	「土木学会（1994）」より $(b/a + a/b)^2$ にて算出 $k = (500/500+500/500)^2 = 4$	「土木学会（1994）」より $(b/a + a/b)^2$ にて算出 $k = (572/472+472/572)^2 = 4.15$
$t$ ：船側外板厚(mm)	「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018 年）」より中央部の外板の厚さ $15S\sqrt{d + 0.026L}$ の 0.85 倍にて算出 $S$ ：肋骨の心距(m)（下記と同様に 0.5(m)） $d$ ：計画最大満載喫水(m)（「強化プラスチック船規則解説（日本海事協会会誌，1978 年）」より 0.52(m)） $t = \{15 \times 0.5 \times (0.52 + 0.026 \times 12.8)^{0.5}\} \times 0.85 = 5.89(\text{mm})$	「土木学会（1994）」より $0.82\sqrt{L} + 2.5$ にて算出 $t = 0.82 \times 11^{0.5} + 2.5 = 5.22(\text{mm})$ 「土木学会（1994）」の中で示されている計算例（参考 3）では船側外板厚はほぼ $\sqrt{L}$ であり，上式の 0.85 倍に近い数値となっているが，保守的に上式をそのまま採用
$a$ ：横肋骨心距(mm)	「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018 年）」より 500(mm)を採用	「土木学会（1994）」より $450+2L$ にて算出 $a = 450+2 \times 11 = 472(\text{mm})$
$b$ ：縦肋骨心距(mm)	「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018 年）」より 500(mm)を採用	「土木学会（1994）」より $550+2L$ にて算出 $b = 550+2 \times 11 = 572(\text{mm})$
$D$ ：船の深さ(m)	「強化プラスチック船規則解説（日本海事協会会誌，1978 年）」より 1.01(m)を採用	「土木学会（1994）」より $0.08 \times L$ にて算出 $D = 0.08 \times 11 = 0.88(\text{m})$
$2\theta$ ：船首角度(°)	「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））」では約 70 度（図 4.3-31 参照）であるが，保守的に「土木学会（1994）」の 35 度を採用	「土木学会（1994）」より $2\theta = 35 \sim 70$ 度とされていることを踏まえ，保守的になるよう 35 度を採用

図 4.3-29 のとおり、「土木学会（1994）」によれば、船舶の破壊が進み、船首傾斜部がすべて破壊した後は、75.0kN 又は 46.1kN の圧壊荷重が一定値として作用することとなるが、FRP 製の小型船舶の圧壊荷重の算定について、その妥当性が十分に検証されていないことから、その圧壊荷重をそのまま衝突荷重とは考えずに、保守的に衝突速度に応じて荷重が増大することを仮定し、衝突荷重を算出することとする。

そのため、上記で算出した FRP 製の船舶（総トン数 5t）の圧壊荷重と、その圧壊荷重に対応する変位量、すなわち船首傾斜部の長さ  $L_{sf}$  (m) から、以下のように軸剛性  $k$  を算出することとする。

$$k = \frac{P_c}{L_{sf}} \quad \dots \dots \dots (4.3)$$

なお、船首傾斜部の長さは、「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・運航状況調査一（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）が約 3m であることから、「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018 年）」を基にした場合の船の長さ 12.8m で案分すると 1.77m となる（図 4.3-31 参照）。ただし、「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018 年）」では船首部を 0.1L 以下と定めているため、これより算出される 1.28(m) を用いることとする。一方、「土木学会（1994）」によれば  $0.25 \times D$  (m) にて算出され、船首傾斜部の長さは 0.256(m) となり、実際の漁船の形状とは異なり、小さく算出されることとなる。ただし、保守性の観点から、「土木学会（1994）」を基にした場合にはこの式をそのまま用いることとする。

以上から、FRP 製の船舶（総トン数 5t）の軸剛性は、「強化プラスチック船規則（日本海事協会，2018 年）」を基にした場合に  $0.59 \times 10^5$  N/m、「土木学会（1994）」を基にした場合に  $1.81 \times 10^5$  N/m となるため、軸剛性が大きくなる  $1.81 \times 10^5$  N/m を「FEMA（2012）\*1」に適用し、衝突荷重を算出することとする。

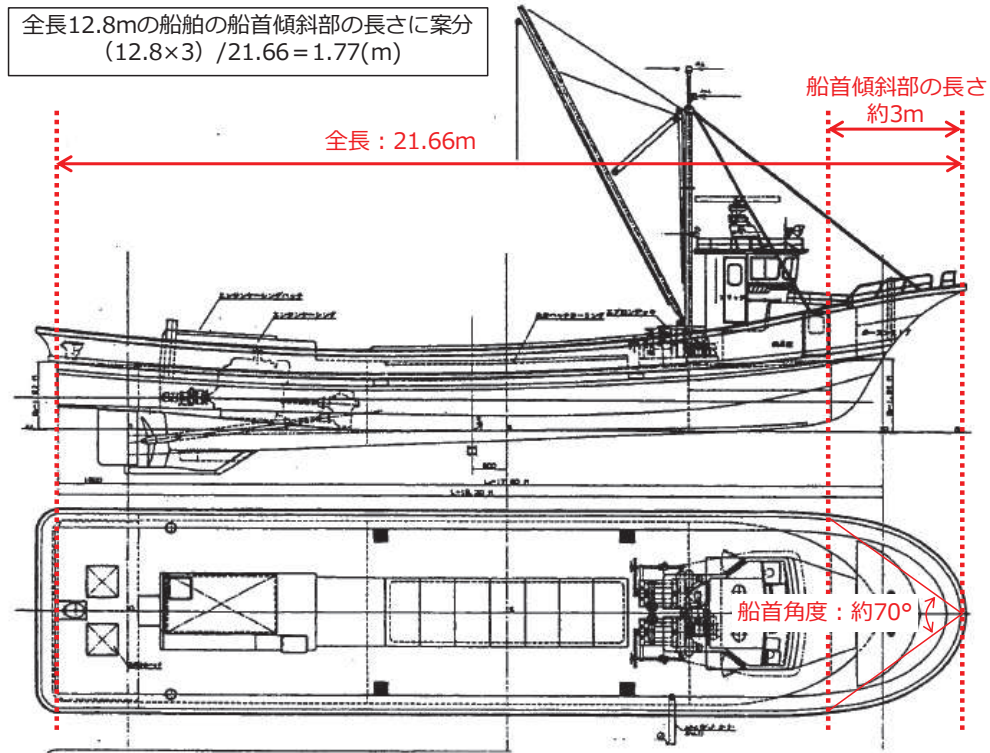


図-1 一般配置図(FRP漁船)

図 4.3-31 FRP 漁船の船首傾斜部の長さ及び船首角度（「小型漁船のインベントリ分析に関する研究一 A：モデル船の建造・運航状況調査一（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）

### ③ 荷重の算定

「① 車両」及び「② 船舶」を踏まえ、表 4.3-12 に防潮堤（鋼管式鉛直壁）で考慮する漂流物による衝突荷重を、表 4.3-13 に防潮堤（盛土堤防）、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）及び貯留堰で考慮する漂流物による衝突荷重を示す。算出の結果、漂流物による最大衝突荷重は、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）及び貯留堰のいずれにおいても 1855kN であるため、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（57t）を、防潮堤（鋼管式鉛直壁）の衝突荷重として考慮したとしても、設計用衝突荷重 2000kN に包絡されることを確認した。

表4.3-12 漂流物による衝突荷重一覧（防潮堤（鋼管式鉛直壁））

種類	質量 (t)	適用式	流速 (m/s)	衝突荷重 (kN)	設計用衝突荷重 (kN)
車両	2.15	「FEMA (2012)」	13	1855	2000
船舶（直近海域）	15*1	「FEMA (2012)」	13	1245	
【参考】 船舶（前面海域）	57*	道路橋示方書	13	727	

注記 \*1：船舶の質量は、総トン数の3倍する。

表4.3-13 漂流物による衝突荷重一覧

（防潮堤（盛土堤防）、屋外排水路逆流防止設備（防潮堤北側）及び貯留堰）

種類	質量 (t)	適用式	流速 (m/s)	衝突荷重 (kN)	設計用衝突荷重 (kN)
車両	2.15	「FEMA (2012)」	13	1855	2000
船舶（直近海域）	15*1	「FEMA (2012)」	13	1245	
船舶（前面海域）	57*1	道路橋示方書	13	727	
車両系重機*2	41.2	「ASCE (2016)」	13	624*3	

注記 \*1：船舶の質量は、総トン数の3倍する。

\*2：滑動状態で衝突することを考慮する漂流物。

\*3：「ASCE (2016)」の例示は以下のとおり。

$$F_i = 36 \times I_{TSU} = 36 \times 1.25 = 45 \text{ kN}$$

$F_i$ ：設計衝突力 (kN)

$I_{TSU}$ ：重要度係数 (1.25)

流速：4 (m/s)

重量：2270 (kg)

上記の例示を踏まえ、流速13m/s、重量41.2tを考慮すると以下のとおり。

$$F_i = 36 \times 1.25 \times (13/4) \times (41200/2270)^{0.5} = 624 \text{ kN}$$



船舶の衝突荷重算定は、「② 船舶」で示したとおり軸剛性について「土木学会(1994)」を基にした場合の  $1.81 \times 10^5$  N/m を採用し、「FEMA (2012) \*1」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、念のため、「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」を基にした場合の軸剛性  $0.59 \times 10^5$  N/m から衝突荷重を算出するとともに、FRP 材の物性によるばらつきの影響、軸剛性算出に大きく影響すると考えられる船首傾斜部の長さ及び船舶の長さによる影響について確認した。

これらの影響確認結果を表 4.3-14 に示す。

軸剛性について「土木学会(1994)」を基にしたケース(表 4.3-11 及び表 4.3-12 で示した衝突荷重の設定条件)を A とし、軸剛性を「強化プラスチック船規則(日本海事協会, 2018年)」から算出するケースを B、軸剛性を「土木学会(1994)」から算出するが、船首傾斜部の長さを実際の長さに近い値とするためケース B と同様の設定にしたケースを C とした。その結果、ケース A (1245kN) は、ケース B (708kN) の 1.75 倍、ケース C の 2.23 倍であり、保守的な衝突荷重となっていることを確認した。

また、ケース A に対して、ヤング率を文献の最小値にしたケースを D、ポアソン比を最小値にしたケースを E として衝突荷重を算出した結果、ケース A はそれぞれ 1.34 倍、1.04 倍となっており、ポアソン比の影響は小さいものの、材料物性であるヤング率及びポアソン比を最大値及び最大値を上回る値に設定しており、保守性を有する設定となっていることを確認した。

ケース F は、船舶の長さを総トン数 5t の標準的な長さとして「漁港・漁場の施設的设计参考図書(水産庁, 2015年)」から 11.0m としたケースであり、ケース A はケース F の 1.05 倍で、船舶の長さによる影響は小さいが保守的な衝突荷重となっていることを確認した。

注記\*1: FEMA (2012) : Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Second Edition, FEMA P-646, Federal Emergency Management Agency, 2012

\*2: FEMA (2019) : Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Third Edition, FEMA P-646, Federal Emergency Management Agency, 2019

\*3: ASCE (2016) : Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI Standard 7-16, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia

表 4.3-14 船舶の衝突荷重算定における保守性の確認結果

ケース	船舶の構造によるばらつき		材料物性のばらつき		船首傾斜部の長さ (m)	衝突荷重 (kN)	ケース A における保守性の確認
	適用文献・規則	船舶の長さ (m)	ヤング率 (tf/m <sup>2</sup> )	ポアソン比			
A	土木学会 (1994)	12.8 <sup>*1</sup>	1.22×10 <sup>6*3</sup>	0.4 <sup>*5</sup>	0.22 <sup>*7</sup>	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	強化プラスチック船規則 (日本海事協会, 2018 年)	12.8 <sup>*1</sup>	1.22×10 <sup>6*3</sup>	0.4 <sup>*5</sup>	1.28 <sup>*8</sup>	708	—
C	土木学会 (1994)	12.8 <sup>*1</sup>	1.22×10 <sup>6*3</sup>	0.4 <sup>*5</sup>	1.28 <sup>*8</sup>	556	—
D	土木学会 (1994)	12.8 <sup>*1</sup>	0.70×10 <sup>6*4</sup>	0.4 <sup>*5</sup>	0.22 <sup>*7</sup>	940	—
E	土木学会 (1994)	12.8 <sup>*1</sup>	1.22×10 <sup>6*3</sup>	0.308 <sup>*6</sup>	0.22 <sup>*7</sup>	1197	—
F	土木学会 (1994)	11.0 <sup>*2</sup>	1.22×10 <sup>6*3</sup>	0.4 <sup>*5</sup>	0.22 <sup>*7</sup>	1177	—

注記 \*1: 「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, 総トン数約 5t に最も近いと考えられる船舶の長さ

\*2: 「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

\*3: 表 4.3-10 の最大値

\*4: 表 4.3-10 の最小値

\*5: 表 4.3-7 の最大値を上回る値

\*6: 表 4.3-7 の最小値

\*7: 土木学会 (1994) から算出 (実際の船舶よりも短い, 短い方が保守的であるため採用)

\*8: 強化プラスチック船規則 (日本海事協会, 2018 年) から算出

(参考1) 屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）について

屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）は防潮堤よりも海側の南側に位置している。屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）の位置を図1に、断面図を図2に示す。

屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）については、防潮堤よりも海側に位置しているが、地中（岩盤内）の集水ピット内に設置されることから、**図3のとおり漂流物が衝突しにくい構造となっており、漂流物は入力津波水位（O.P.+24.4m）と同時に衝突することはない。**

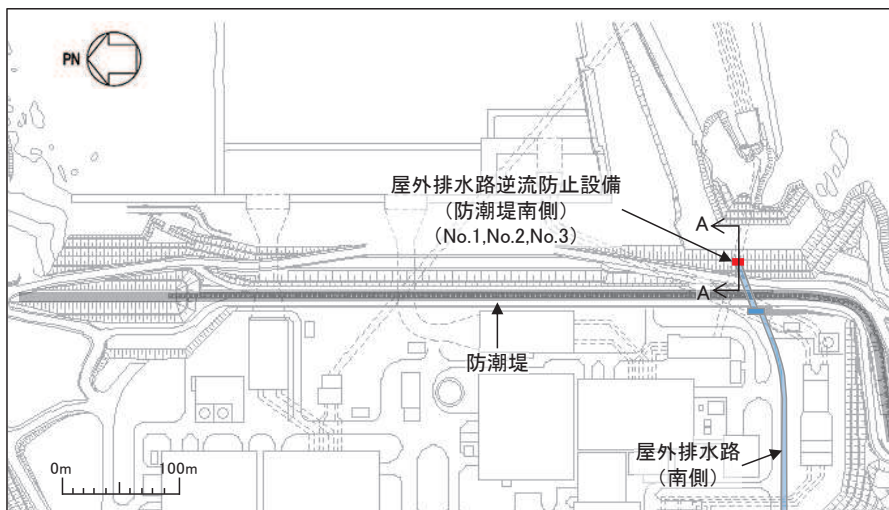


図1 屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）の位置図

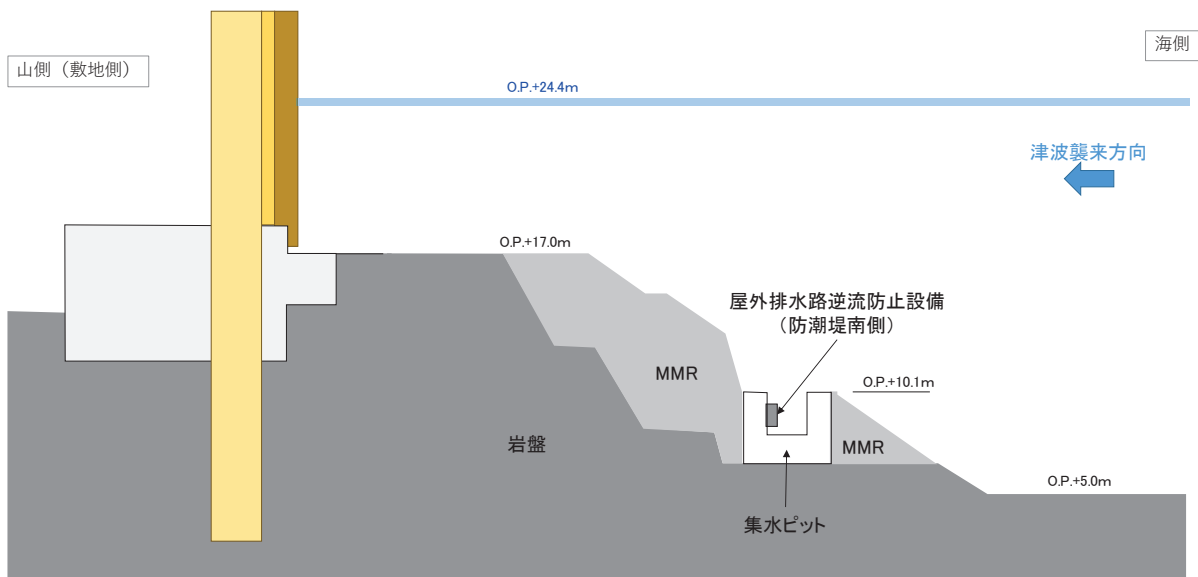


図2 屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）の断面図（A-A 断面）

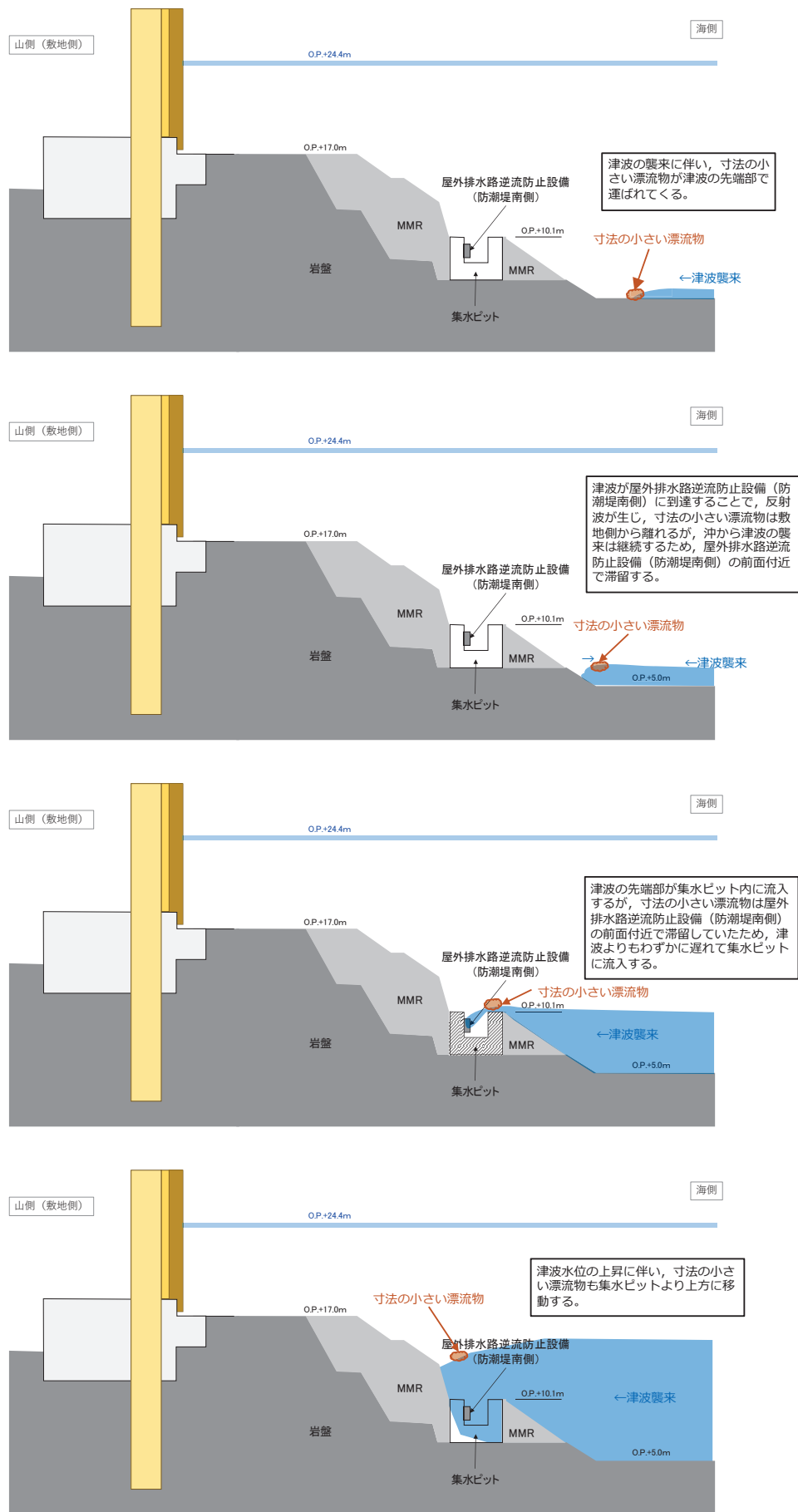


図3 寸法の小さい漂流物の衝突の可能性

屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）に漂流物は衝突しないと考えられるものの、寸法の小さな漂流物が集水ピットに流入する可能性があることから、念のため寸法の小さな漂流物が衝突する場合の検討を行った。

寸法の小さい漂流物については、東北地方太平洋沖地震直後の敷地内での調査で確認された漂流物（「4.2.2①発電所敷地内における東北地方太平洋沖地震に伴う津波の漂流物の特徴及び実績の把握」参照）から木片を想定した（写真1及び写真2）。木片の大きさについては、集水ピット上面の開口部の形状を踏まえ、直径5cm、長さ145cm（約3kg）とした。また、図4に示すとおり集水ピット頂部から屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）に衝突するための速度 $v_0$ は2.4~4.8(m/s)であることから、衝突速度は4.8(m/s)とした。

衝突荷重の算定に用いた式は「4.3.4②漂流物による衝突荷重算定式の適用について」を踏まえ、「FEMA（2012）」、松富（1999）及び有川ほか（2010）を用いた。

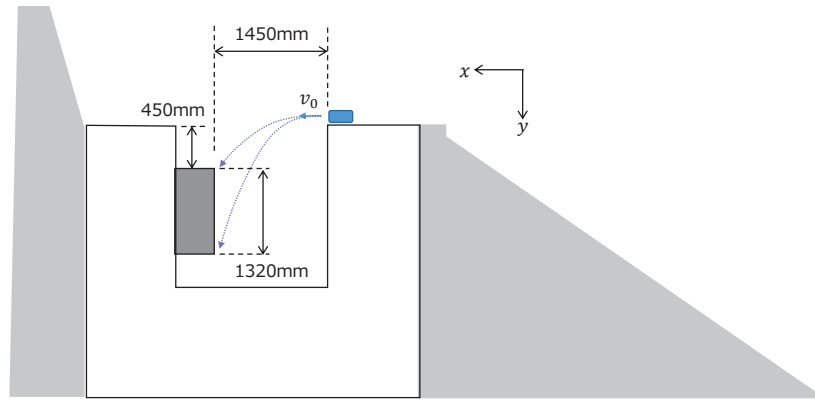
衝突荷重の結果は表1のとおりである。



写真1 敷地内で確認された東北地方太平洋沖地震に伴う津波の漂流物  
(写真 4.2-1(7)再掲)



写真2 敷地内で確認された東北地方太平洋沖地震に伴う津波の漂流物  
(写真 4.2-1(7)再掲)



屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）  
の上部に衝突する場合の速度

$$v_0 = \sqrt{\frac{gx^2}{2y}} = \sqrt{\frac{9.80665 \times 1.45^2}{2 \times 0.45}} = 4.79(\text{m/s})$$

屋外排水路逆流防止設備（防潮堤南側）  
の下部に衝突する場合の速度

$$v_0 = \sqrt{\frac{gx^2}{2y}} = \sqrt{\frac{9.80665 \times 1.45^2}{2 \times 1.77}} = 2.41(\text{m/s})$$

図4 衝突速度の検討

表1 寸法の小さい漂流物による衝突荷重の算定

種類	質量 (kg)	適用式	衝突 速度 (m/s)	衝突荷重 (kN)	【参考】 重畳時に屋外排水路逆流 防止設備（防潮堤南側） 全体に作用する荷重(kN)
木材	3	「FEMA（2012）」	4.8	24	540*
		松富（1999）	4.8	25	
		有川（2010）	4.8	17	

注記\*：重畳時に作用する荷重  $310\text{kN/m}^2$  に扉体面積（ $1.32 \times 1.32 \div 1.742\text{m}^2$ ）を乗じて算出。

(参考2)「直近海域(北西部)」の流向・流速について

「直近海域(北西部)」の流向・流速について、水粒子の動きを把握する方向として有効な軌跡解析を実施し、その特徴を確認した。解析時間は、第一波での到達する可能性の検討であることを踏まえ、地震発生から70分とした。

解析結果を図1及び図2に示す。

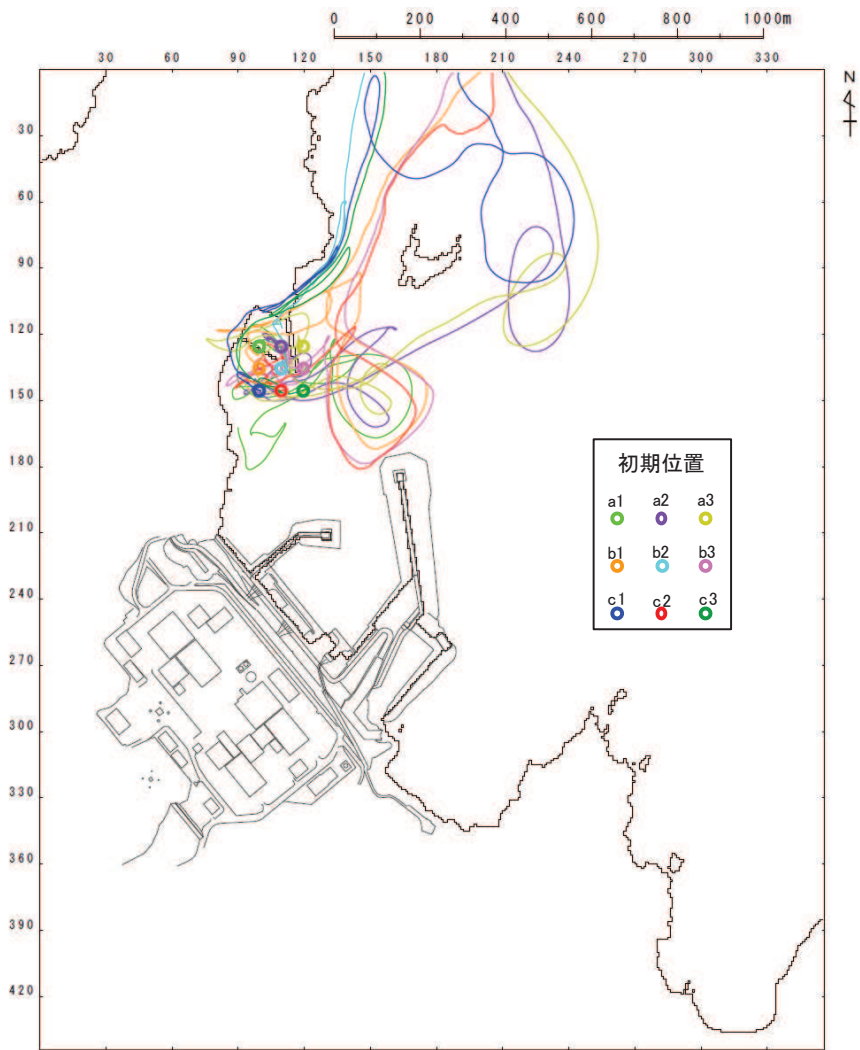
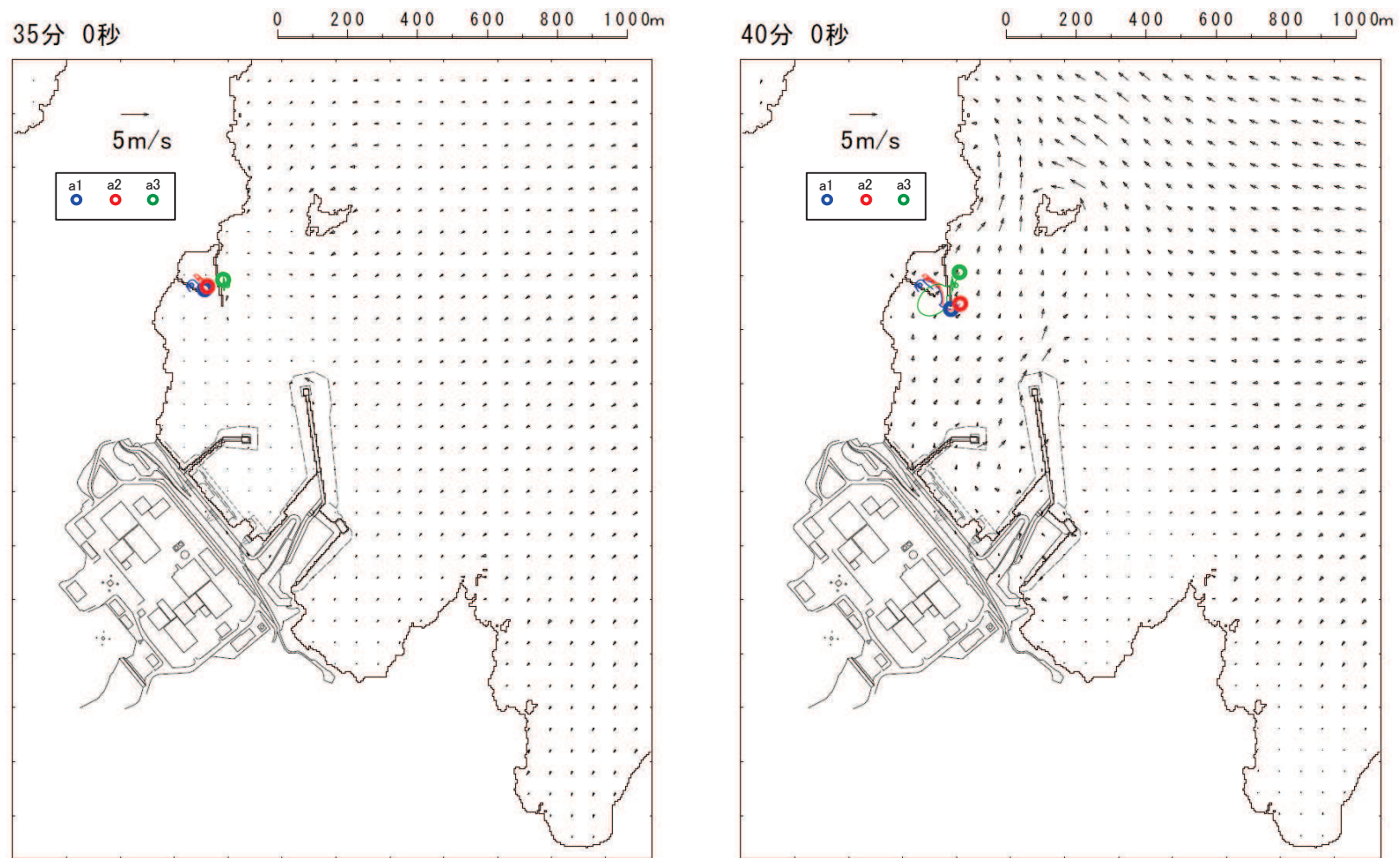


図1 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果（地震発生から70分後まで）

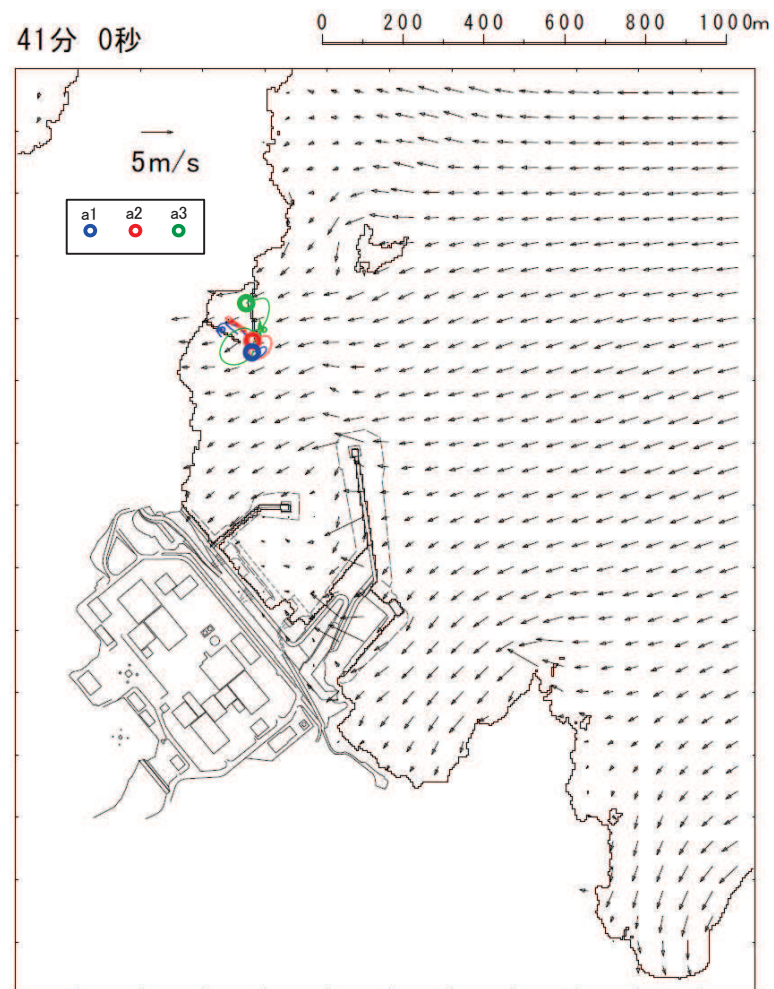




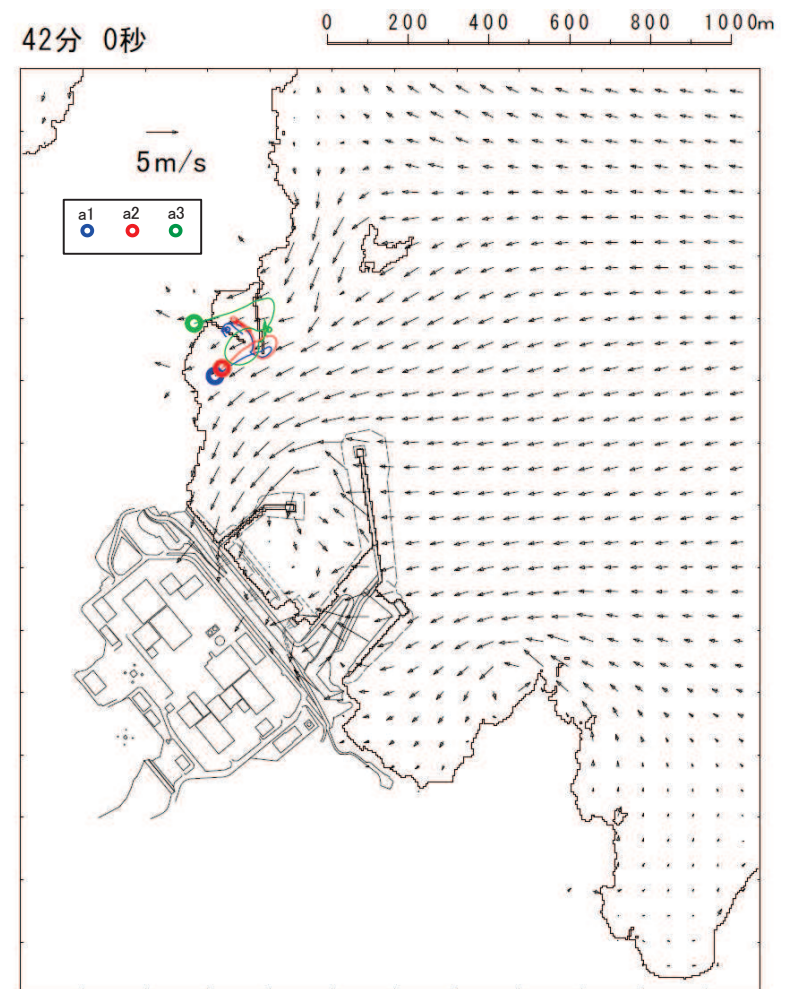
【a1, a2, a3】津波第一波襲来前であり，ほとんど移動しない。

【a1, a2, a3】ほとんど移動しない。

図 2 (1) 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果の詳細（35 分後及び 40 分後）

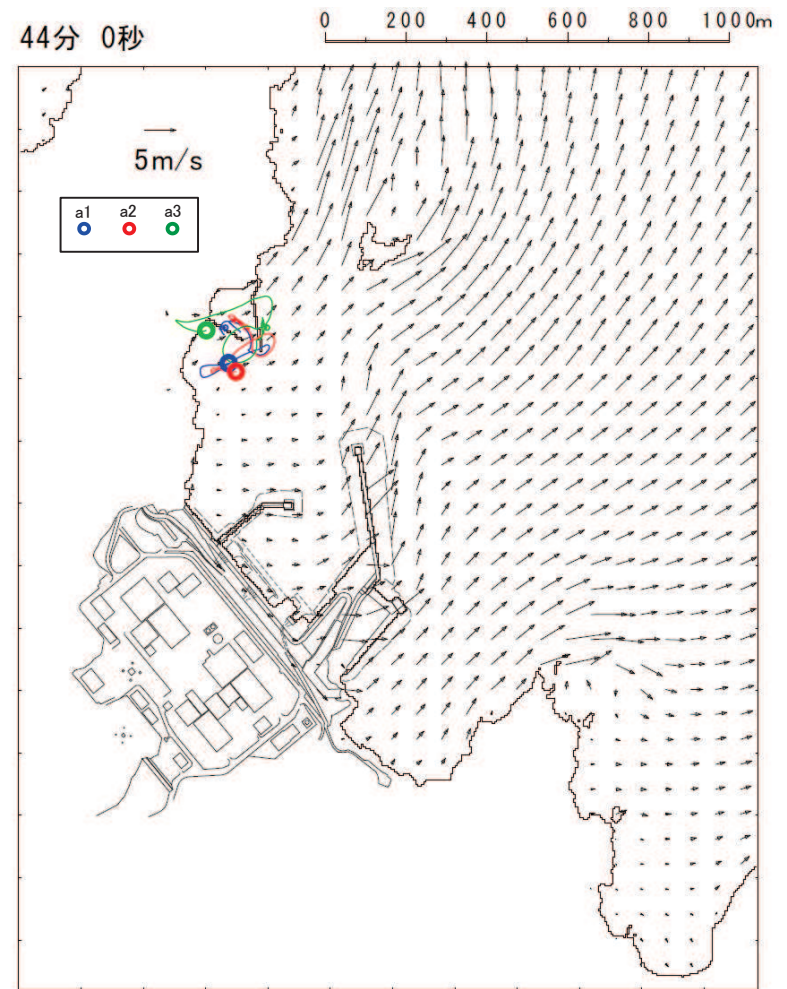
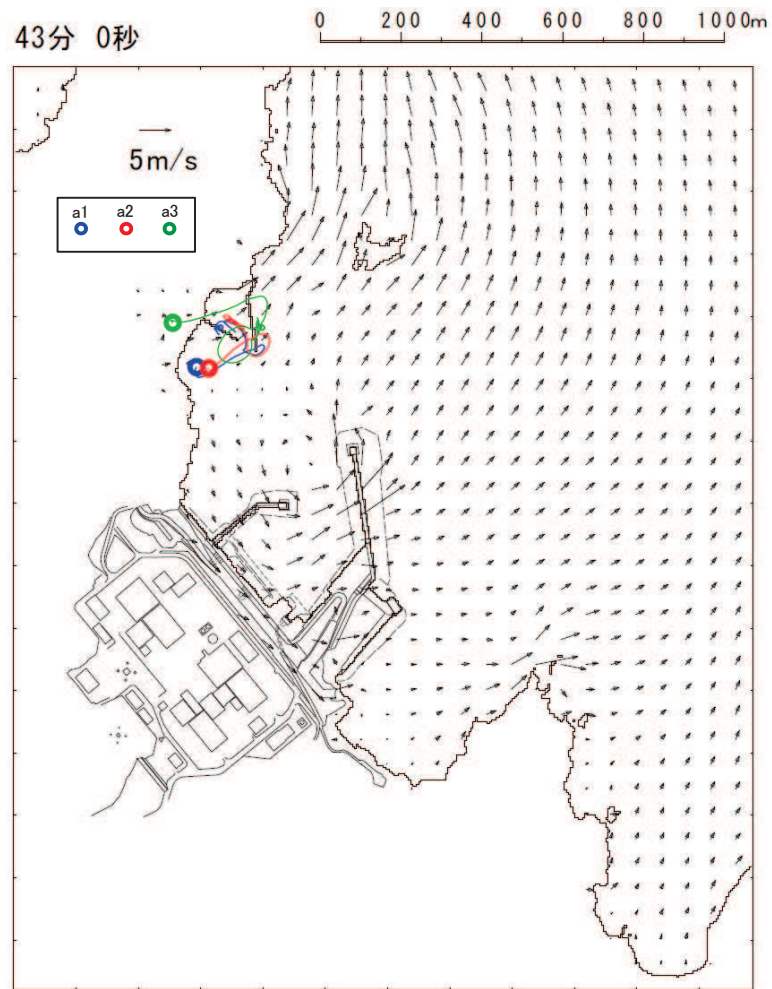


【a1, a2, a3】ほとんど移動しない



【a1, a2, a3】津波第一波のピーク（最大水位時刻直前）であり、小屋取漁港近傍で南西方向に移動する。

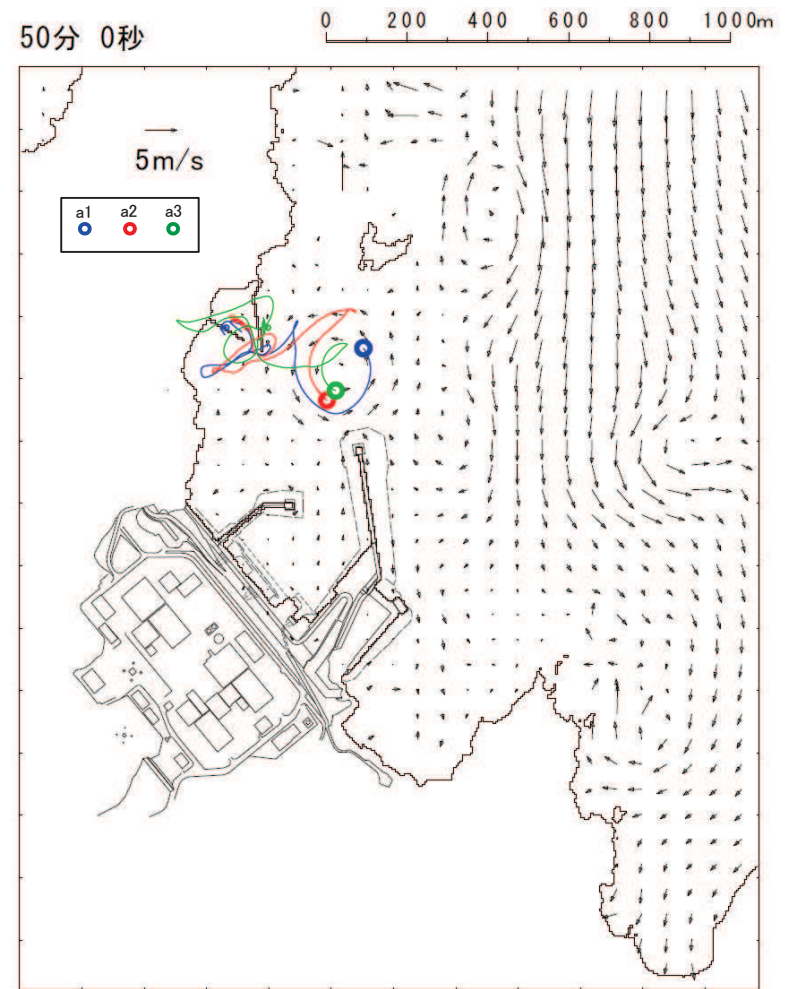
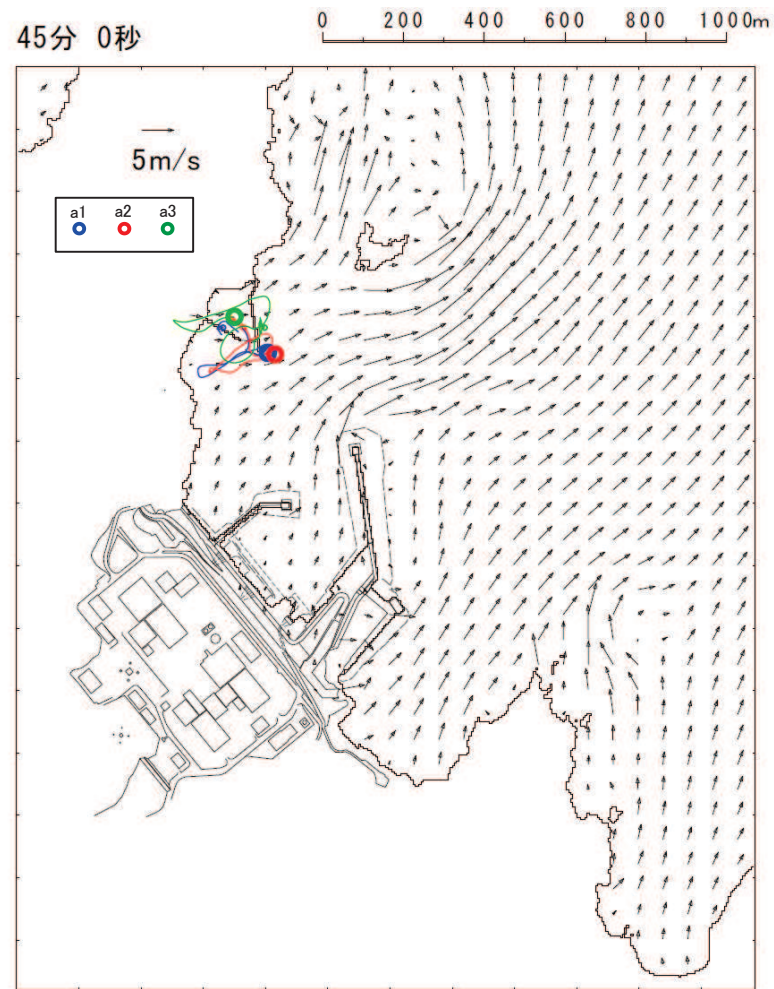
図 2 (2) 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果の詳細（41 分後及び 42 分後）



【a1, a2, a3】津波第一波のピーク（最大水位時刻直後）であり、引き波の影響を受け、北東方向へ移動し始める。

【a1, a2, a3】津波第一波の引き波の影響を受けるが、小屋取漁港近傍でわずかに移動するのみである。

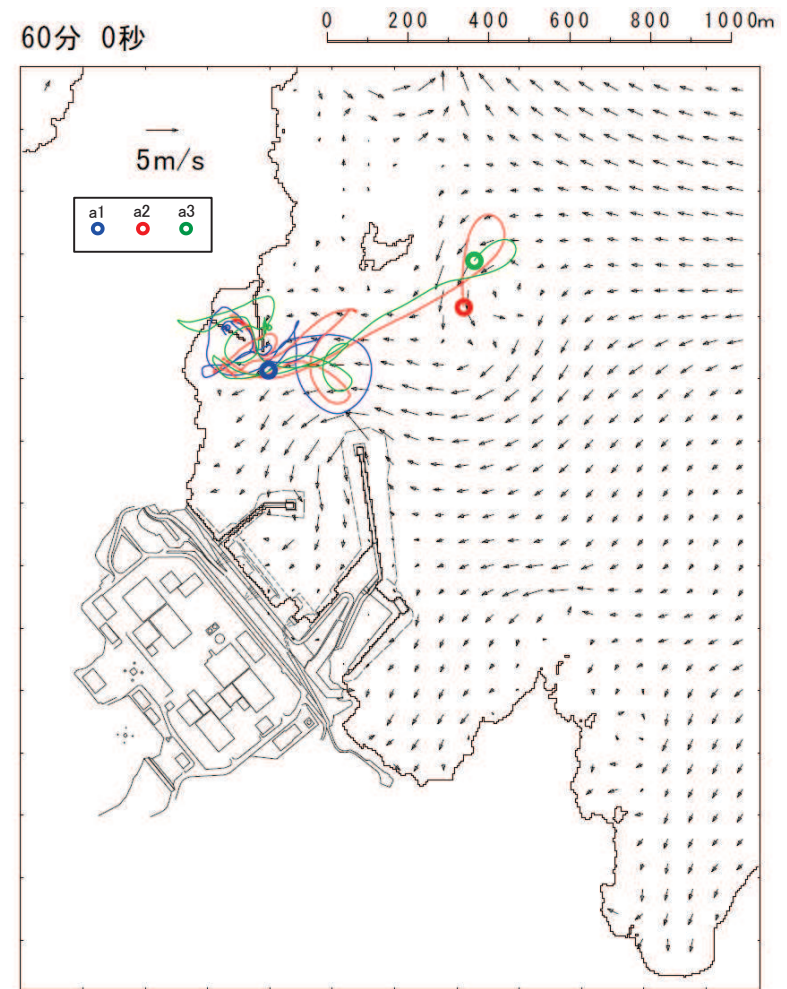
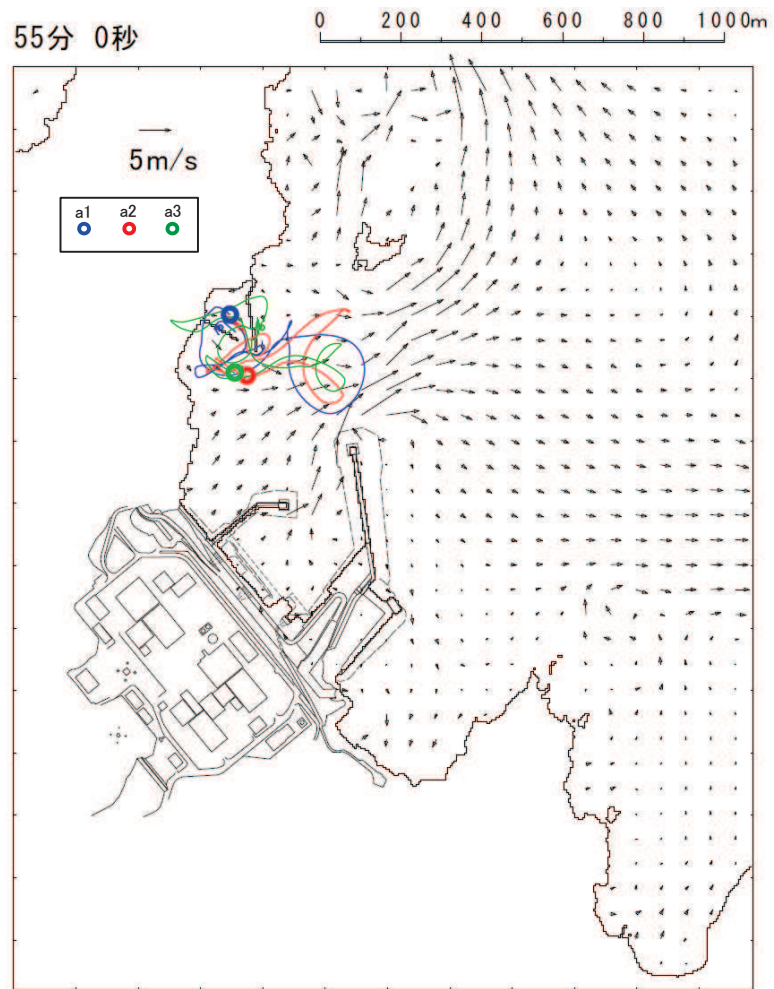
図 2 (3) 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果の詳細（43 分後及び 44 分後）



【a1, a2, a3】引き波の影響を受け、小屋取漁港近傍でわずかに移動する。

【a1, a2, a3】津波第二波以降の影響により発電所の東防波堤堤頭部付近を移動する。

図 2 (4) 「直近海域 (北西部)」内における軌跡解析結果の詳細 (45 分後及び 50 分後)

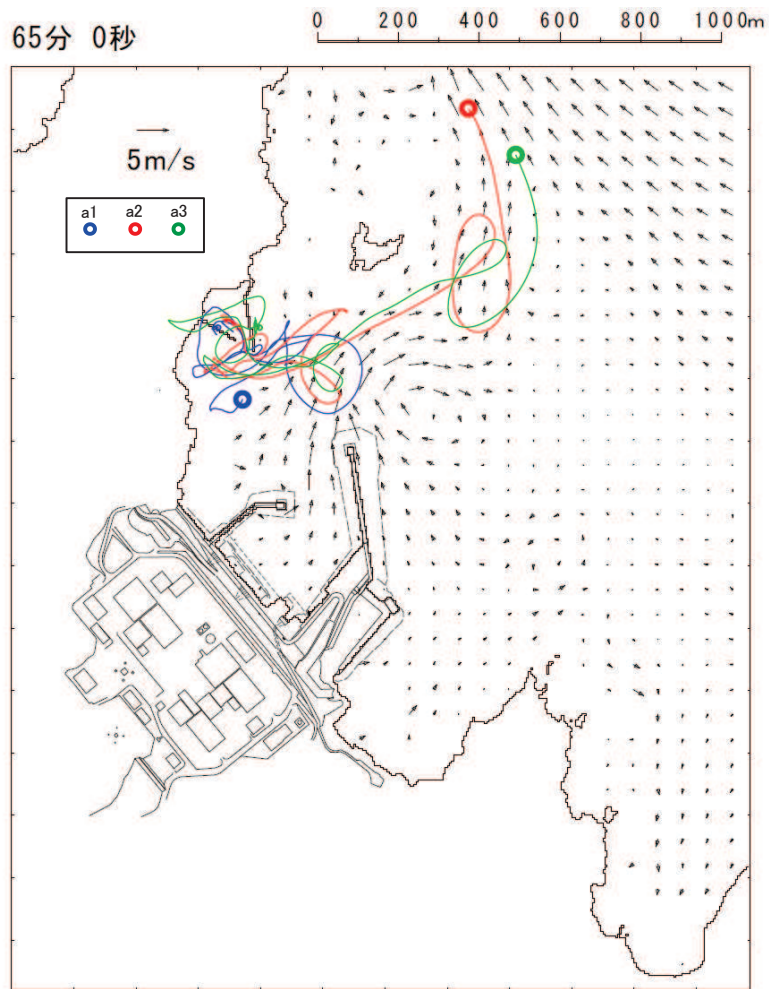


【a1, a2, a3】津波第二波以降の影響により，小屋取漁港へ移動する。

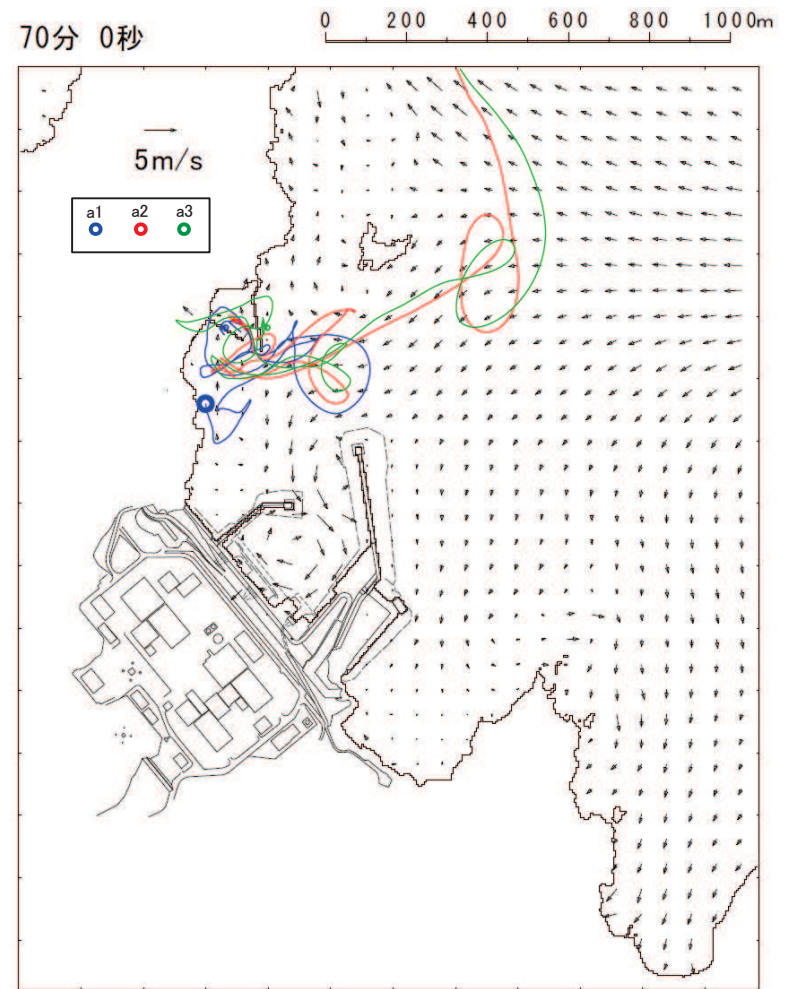
【a1】津波第二波以降の影響を受け，小屋取漁港近傍でわずかに移動する。

【a2, a3】津波第二波以降の影響を受け，大きく沖側へ移動する。

図2(5) 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果の詳細（55分後及び60分後）

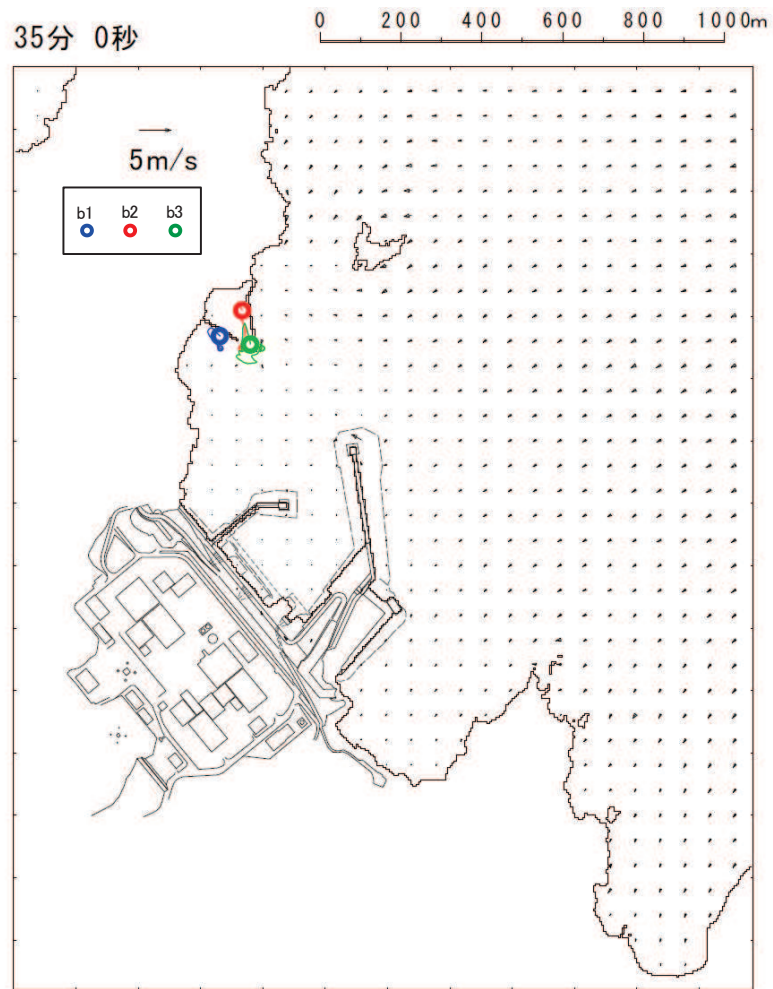


【a1】津波第二波以降の影響を受け、小屋取漁港近傍でわずかに移動する。  
 【a2, a3】津波第二波以降の影響を受け、大きく沖側へ移動する。

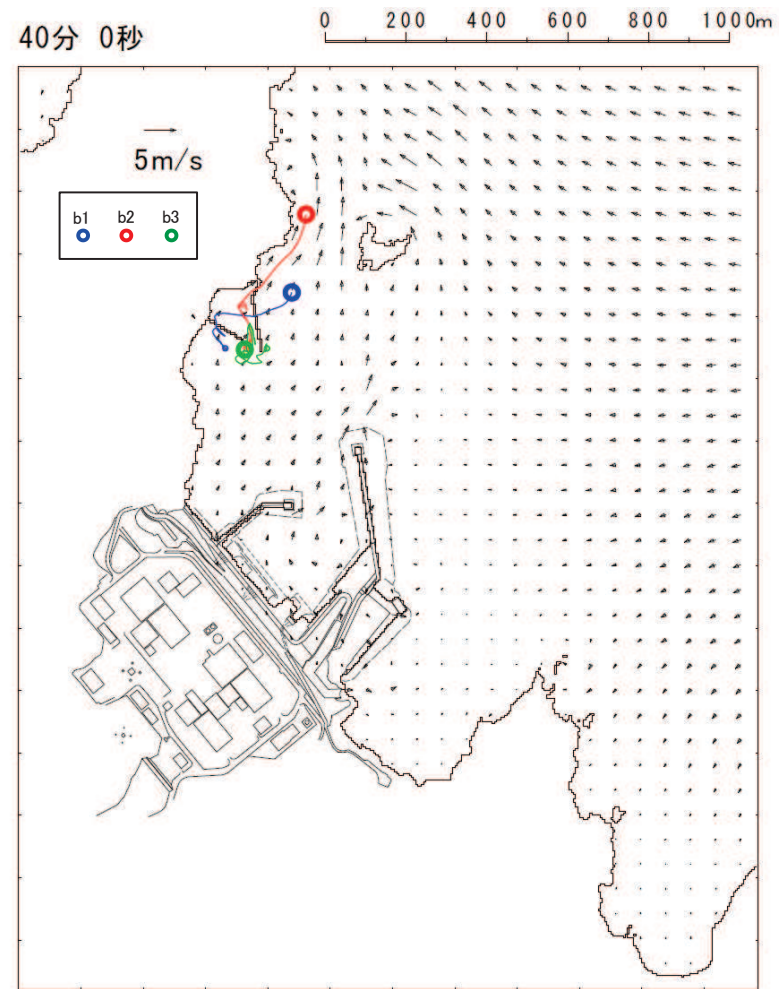


【a1】津波第二波以降の影響を受け、小屋取漁港近傍でわずかに移動する。  
 【a2, a3】表示外に移動し、敷地側には移動してこない。

図2(6) 「直近海域(北西部)」内における軌跡解析結果の詳細(65分後及び70分後)



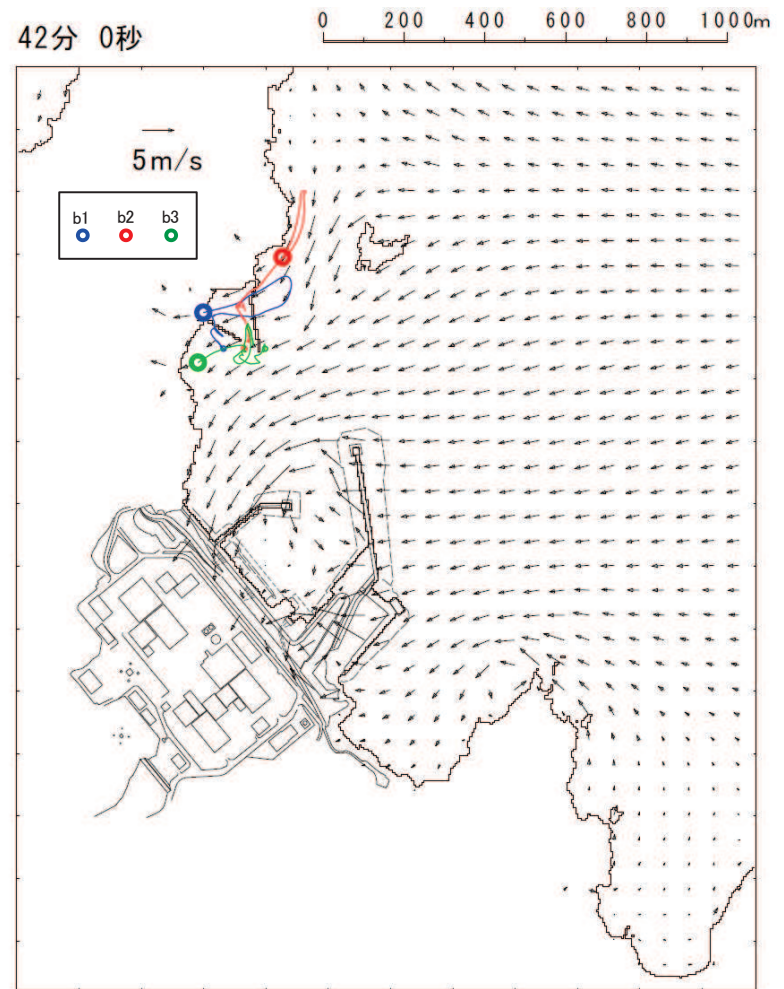
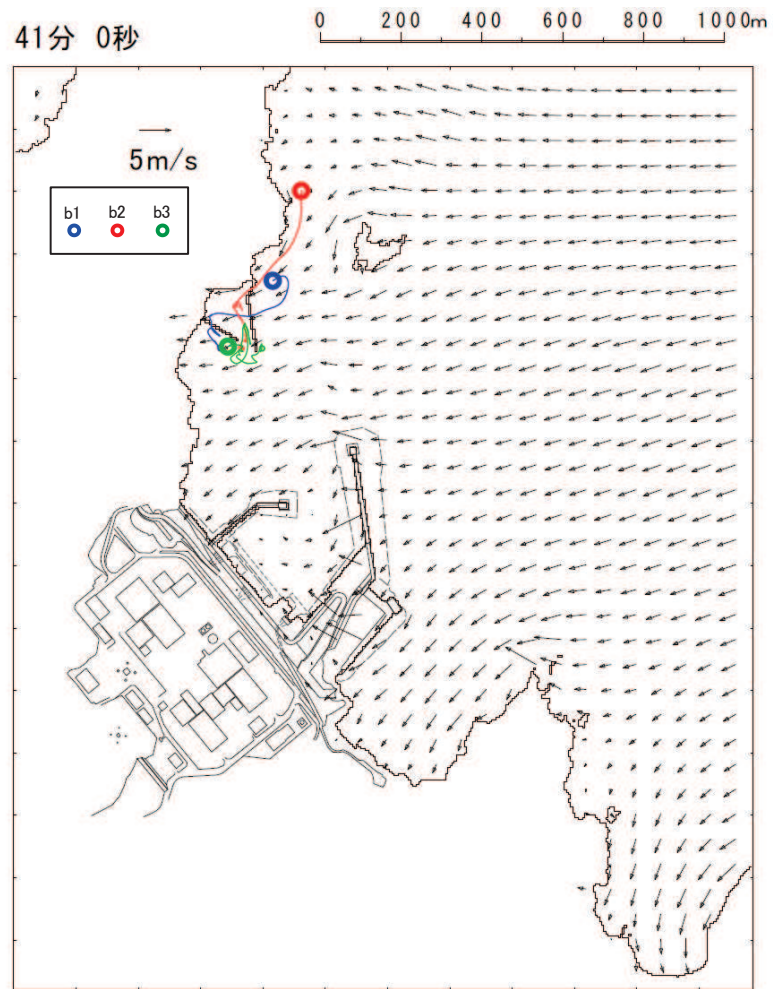
【b1, b2, b3】津波第一波襲来前であり，ほとんど移動しない。



【b1, b2】津波第一波の二段型波形の一時的な引き波で北東側に移動する。

【b3】ほとんど移動しない。

図2(7) 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果の詳細（35分後及び40分後）



【b1, b2】津波第一波の二段型波形の寄せ波により南西方向に移動し始める。

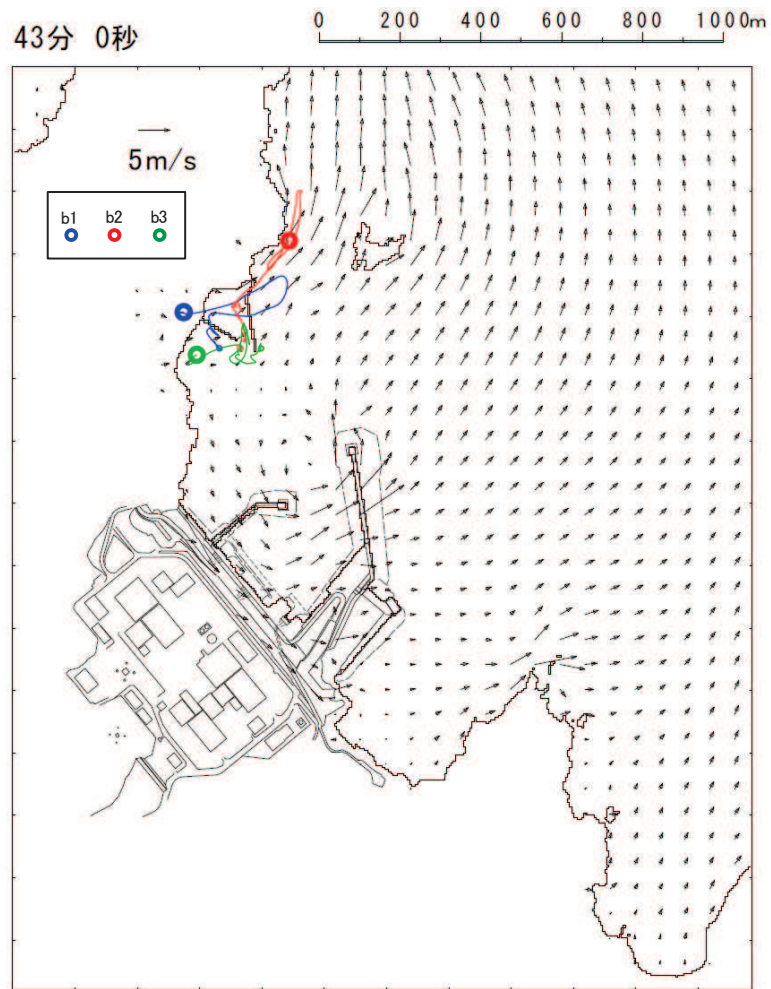
【b1, b2, b3】津波第一波のピーク（最大水位時刻直前）であり、

【b3】ほとんど移動しない。

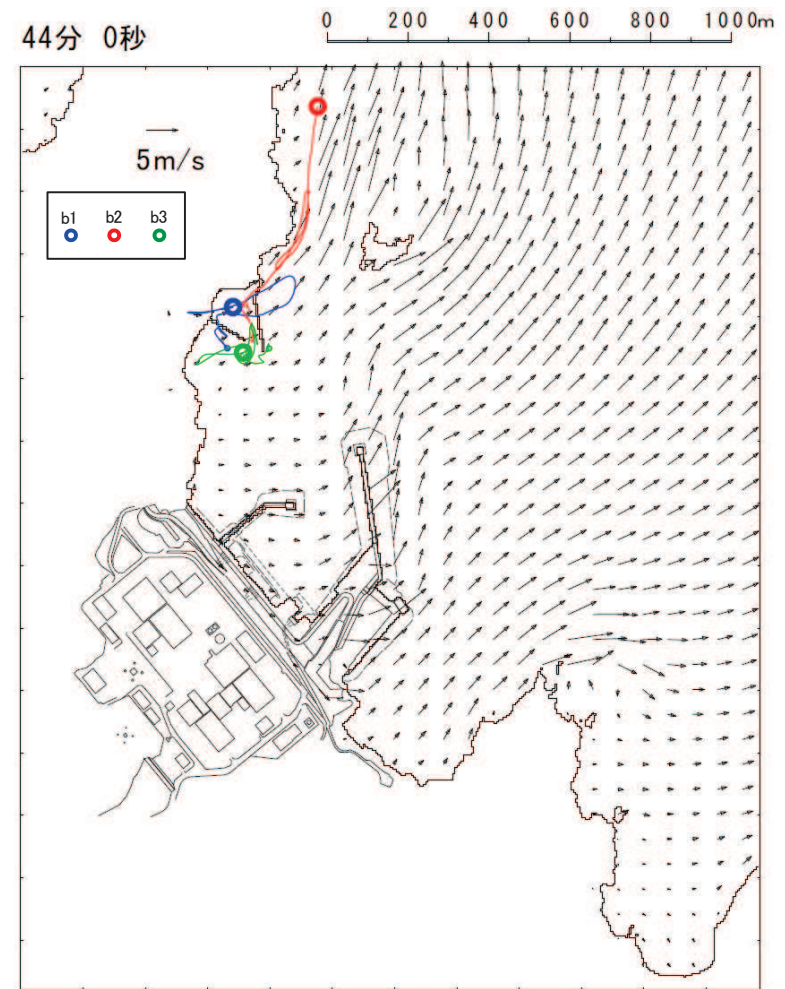
小屋取漁港近傍で南西方向に移動する。

図 2 (8) 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果の詳細（41 分後及び 42 分後）



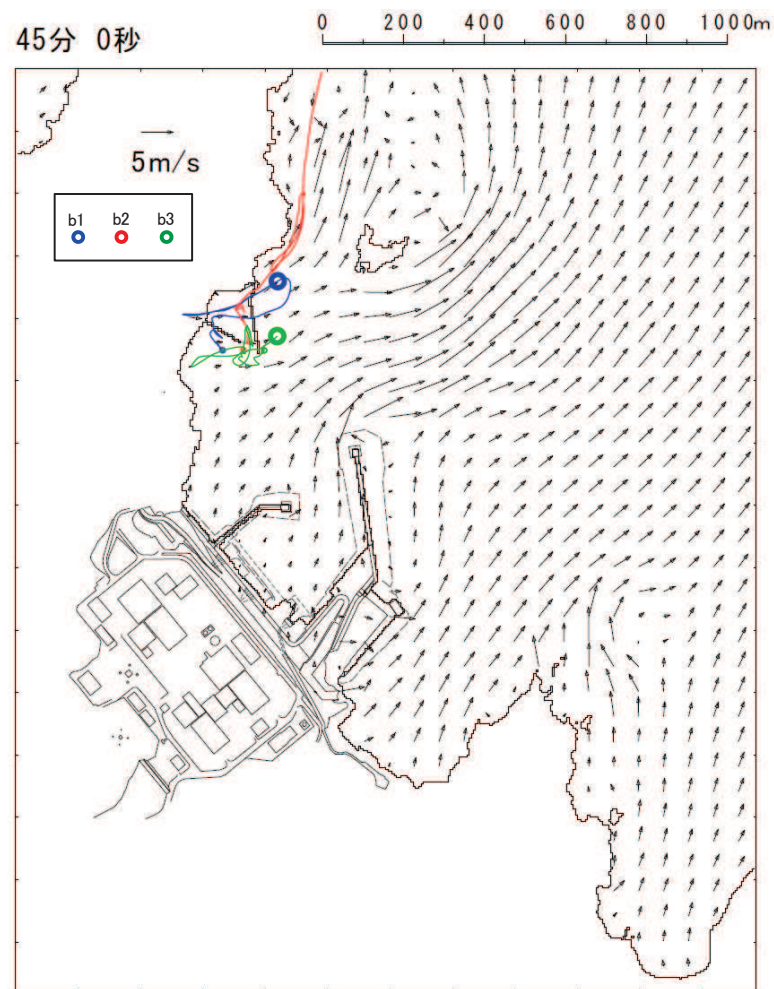


- 【b1】津波第一波のピーク（最大水位時刻直後）であり、引き波の影響を受け、北東方向へ移動し始める。  
 【b2, b3】ほとんど移動しない。



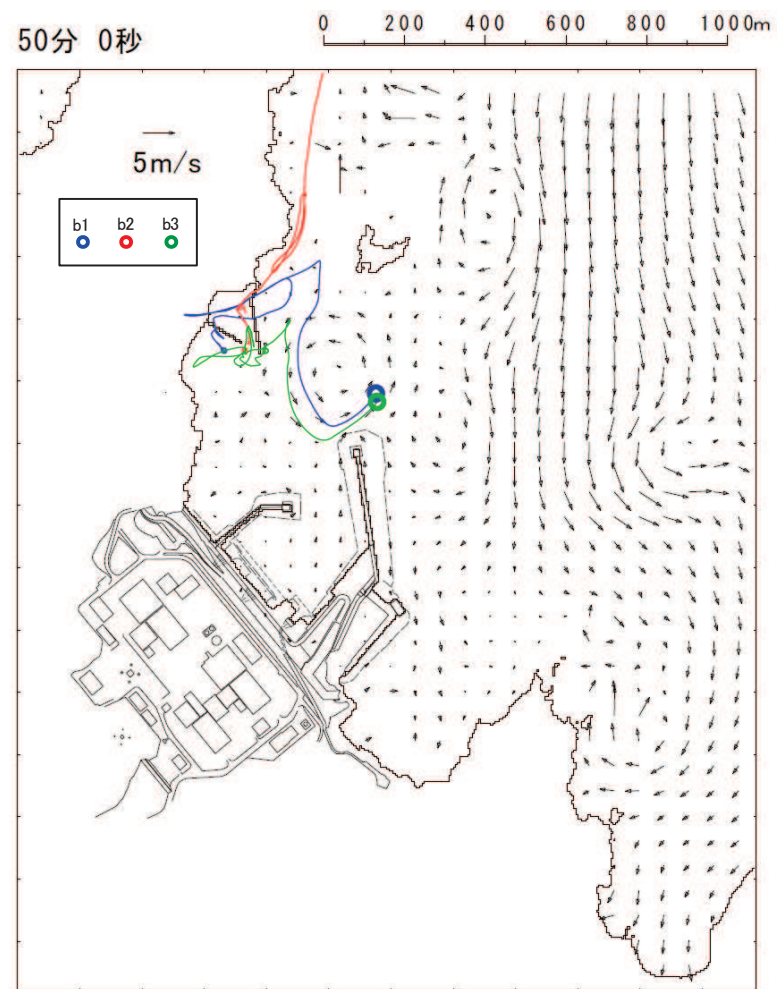
- 【b1】津波第一波の引き波により大きく敷地から離れる方向に移動する。  
 【b2, b3】小屋取漁港近傍でわずかに移動する。

図 2 (9) 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果の詳細（43 分後及び 44 分後）



【b1】表示外に移動し、敷地側には移動してこない。

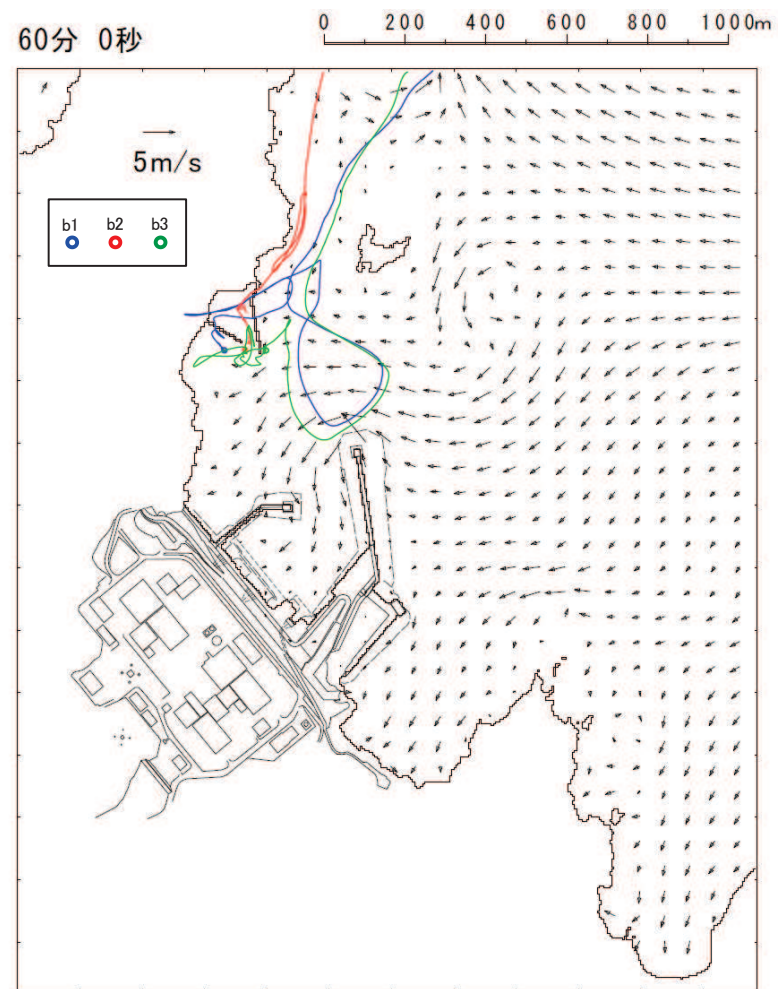
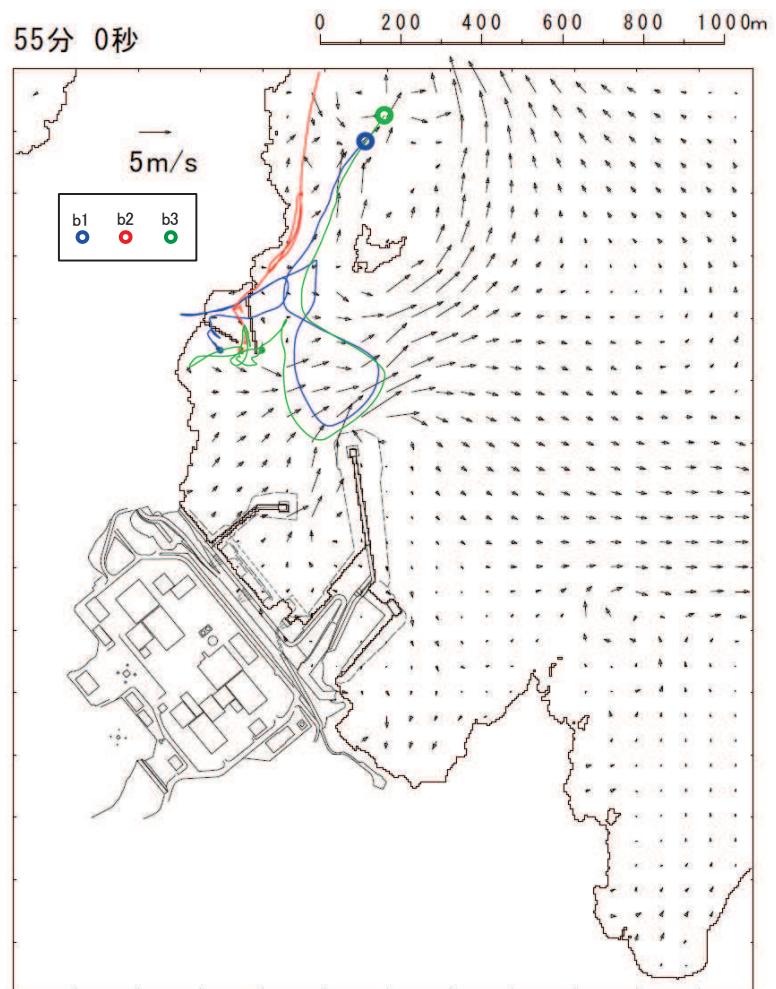
【b2, b3】引き波により北東方向へ移動する。



【b1】表示外で移動し、敷地側には移動してこない。

【b2, b3】津波第二波以降の影響により発電所の東防波堤堤頭部付近を移動する。

図 2 (10) 「直近海域 (北西部)」内における軌跡解析結果の詳細 (45 分後及び 50 分後)

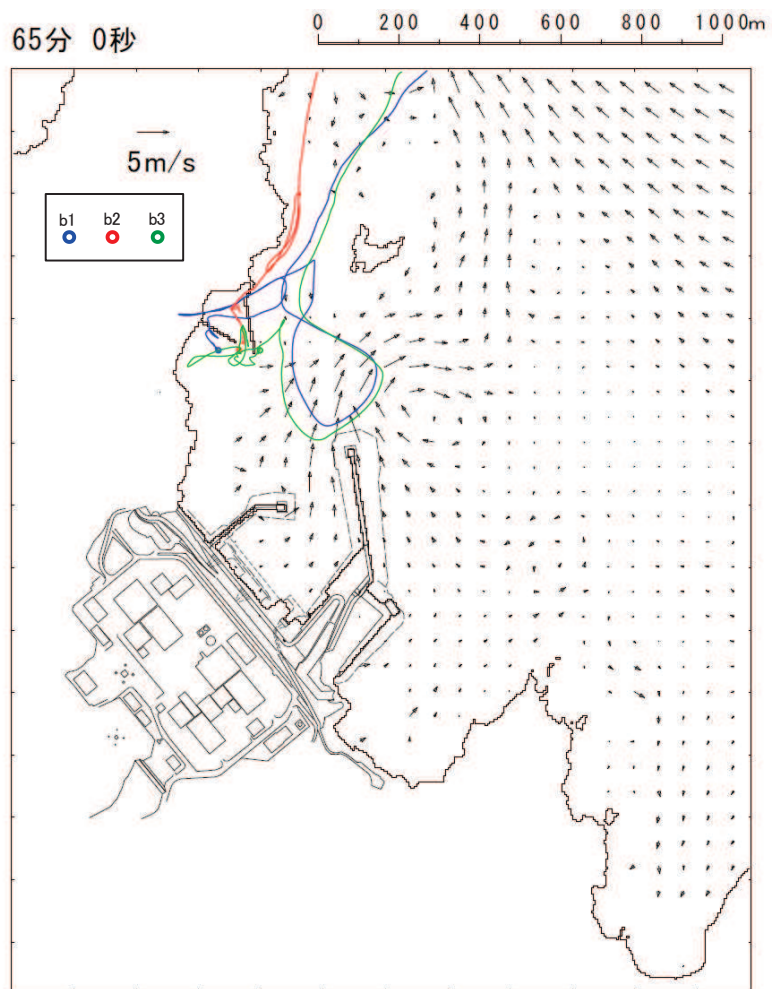


【b1】表示外で移動し，敷地側には移動してこない。

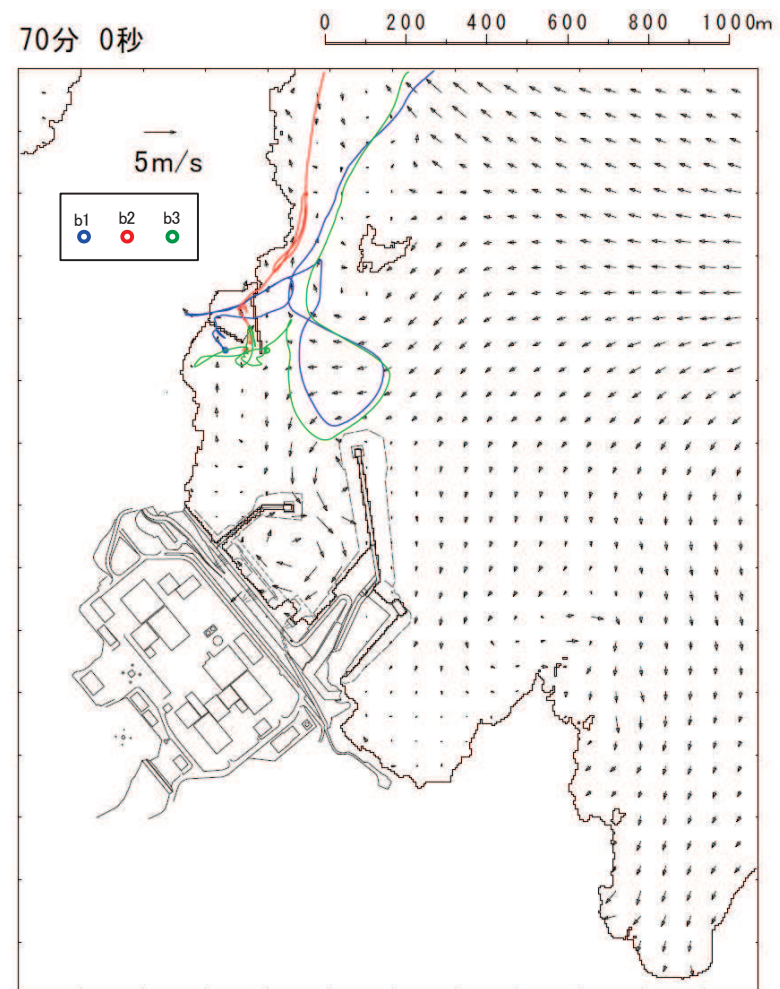
【b2, b3】津波第二波以降の影響により敷地から離れる方向に移動する。

【b1, b2, b3】表示外で移動し，敷地側には移動してこない。

図 2 (11) 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果の詳細（55 分後及び 60 分後）

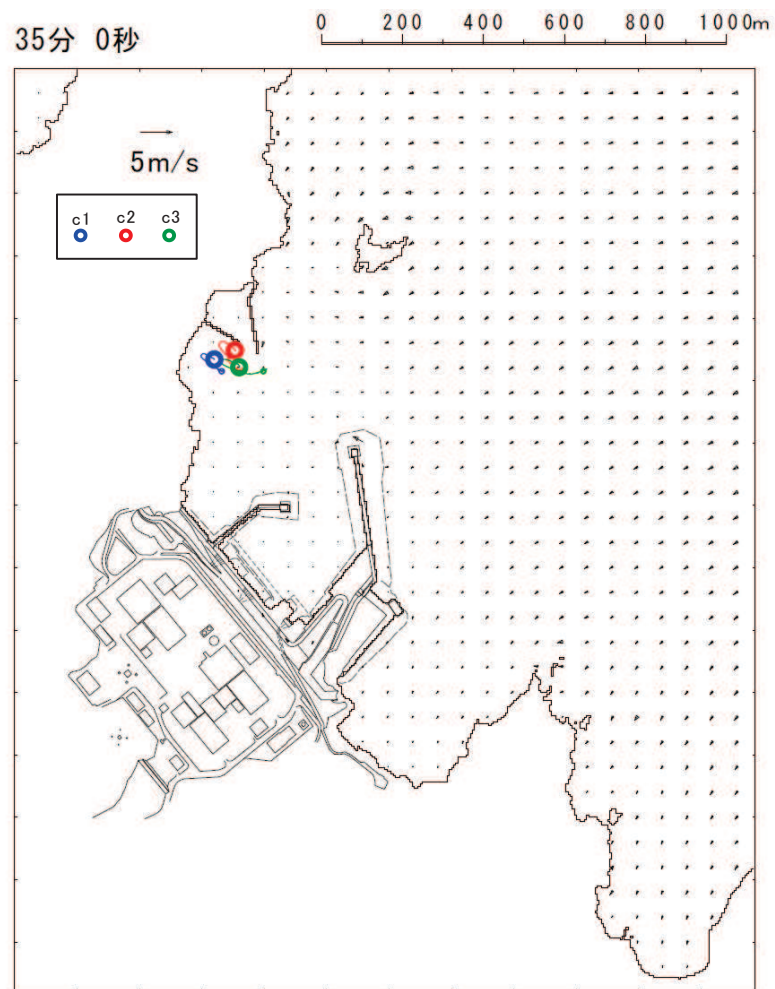


【b1, b2, b3】表示外で移動し，敷地側には移動してこない。

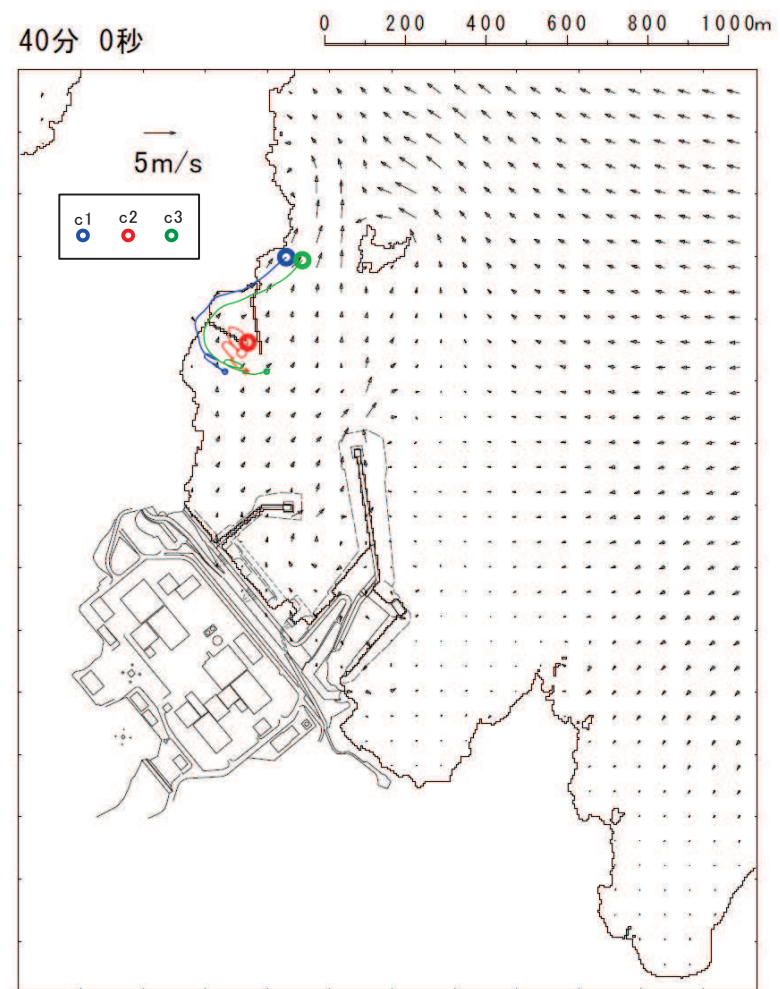


【b1, b2, b3】表示外で移動し，敷地側には移動してこない。

図 2 (12) 「直近海域 (北西部)」内における軌跡解析結果の詳細 (65 分後及び 70 分後)



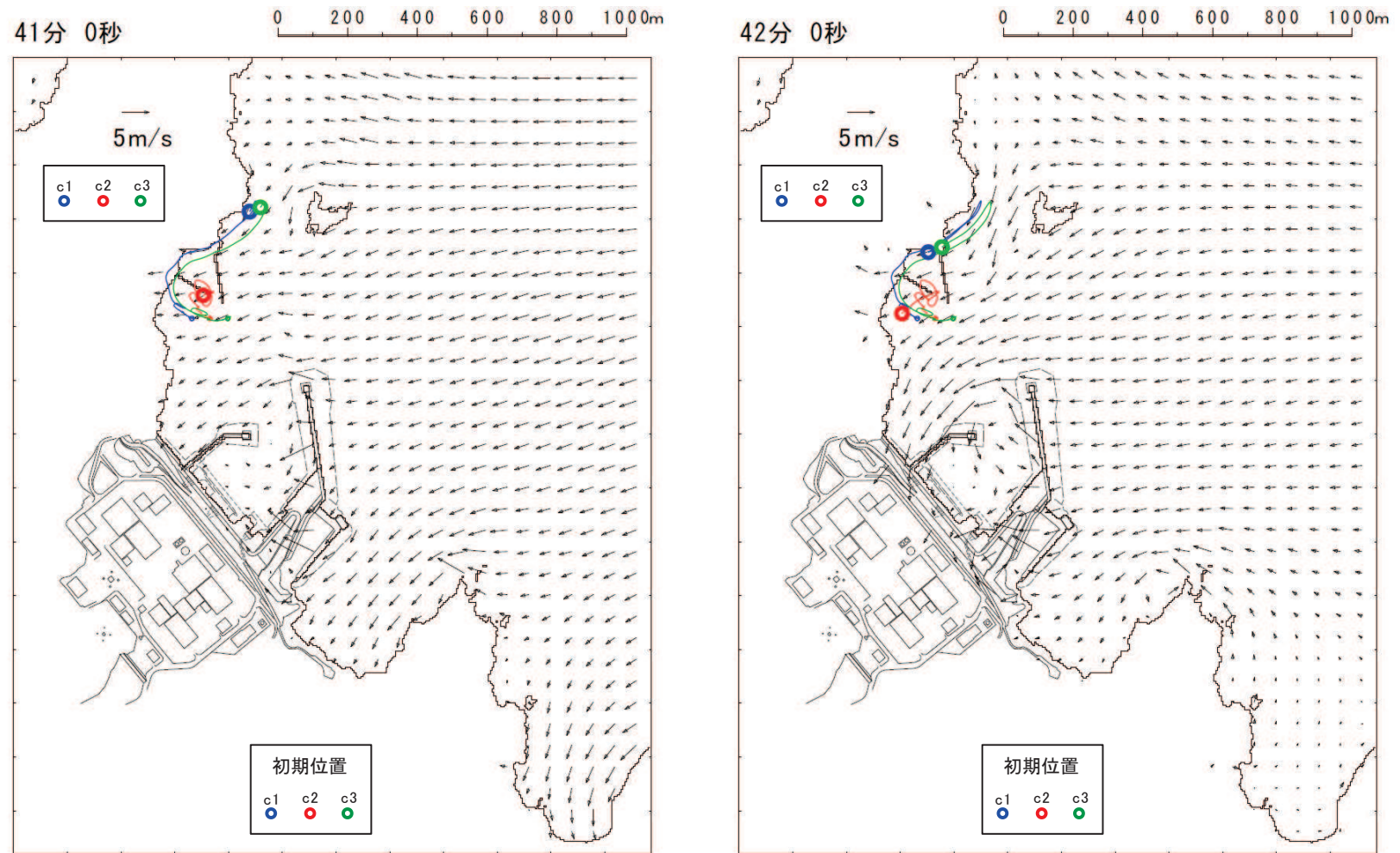
【c1, c2, c3】津波第一波襲来前であり，ほとんど移動しない。



【c1, c3】津波第一波の二段型波形の一時的な引き波で北東側に移動する。

【c2】ほとんど移動しない。

図 2 (13) 「直近海域 (北西部)」内における軌跡解析結果の詳細 (35 分後及び 40 分後)

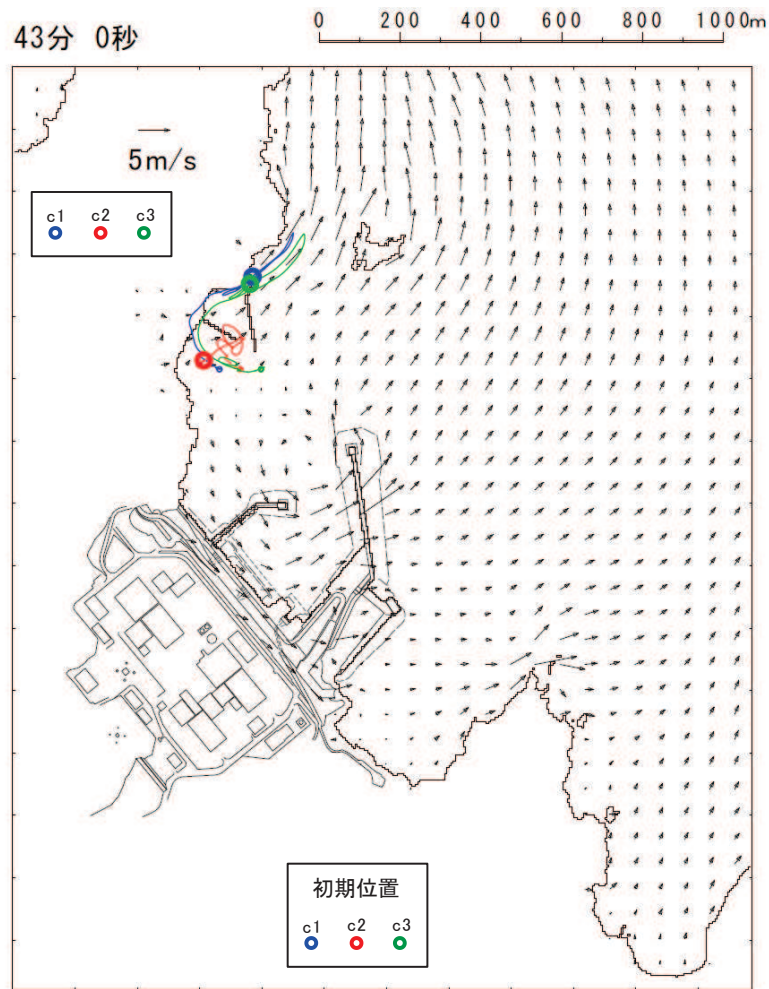


【c1, c3】津波第一波の二段型波形の寄せ波により南西方向に移動し始める。

【c2】ほとんど移動しない。

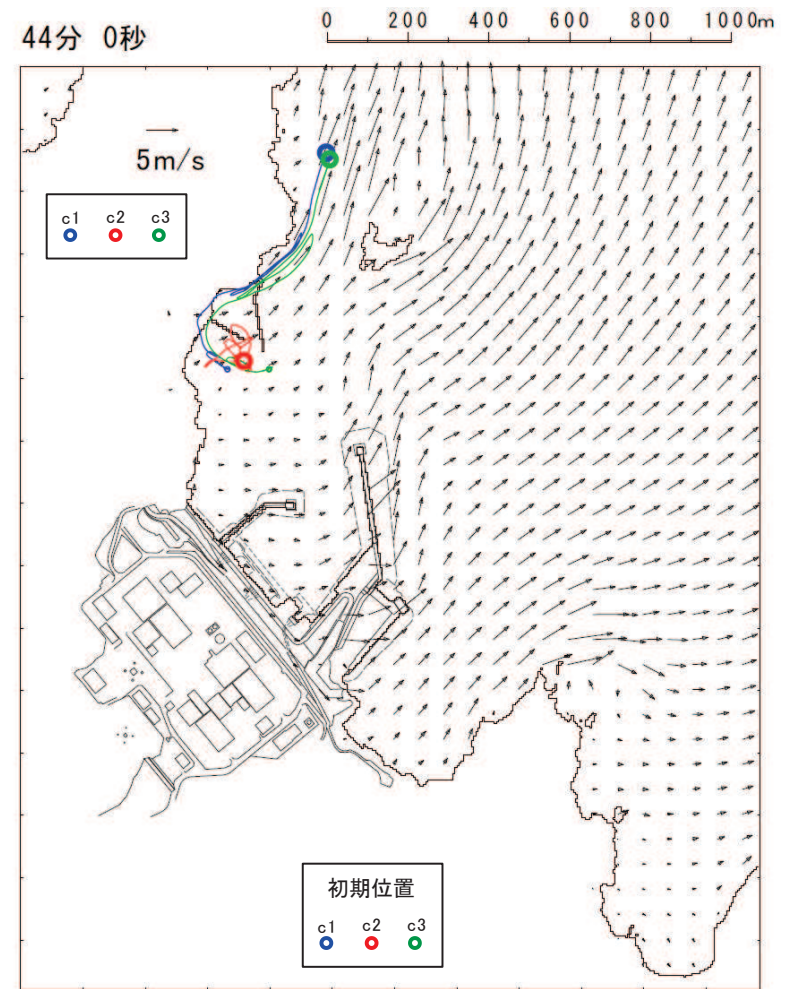
【c1, c2, c3】津波第一波のピーク（最大水位時刻直前）であり、小屋取漁港近傍で南西方向に移動する。

図 2 (14) 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果の詳細（41 分後及び 42 分後）



【c1, c3】津波第一波のピーク（最大水位時刻直後）であり、小屋取漁港近傍でわずかに移動する。

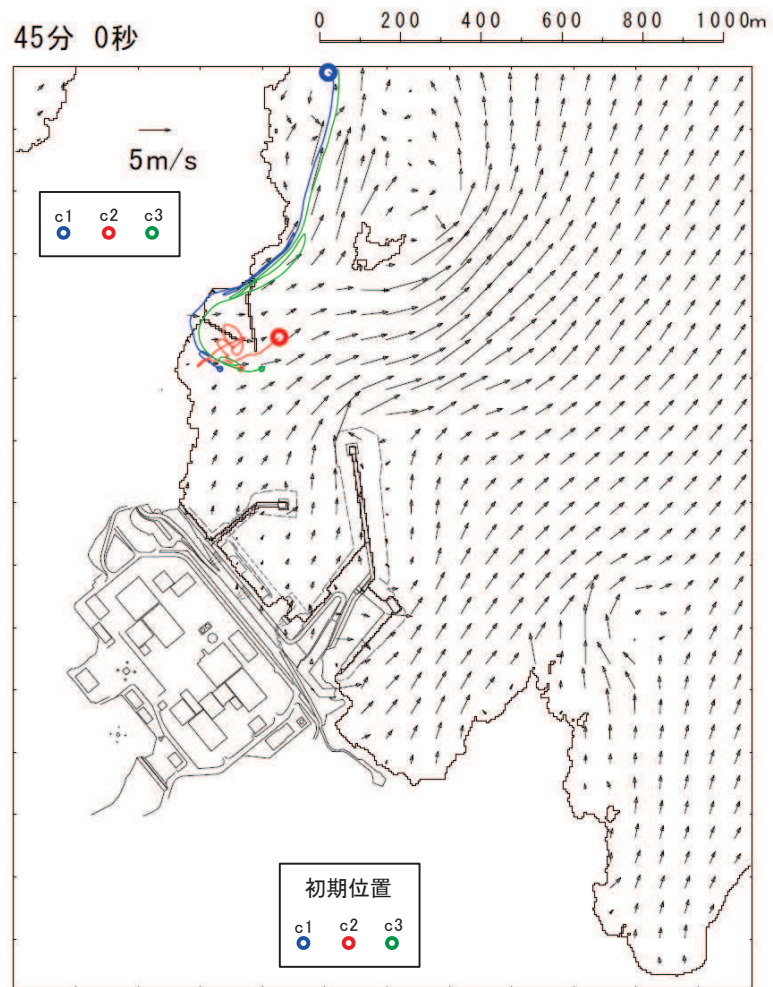
【c2】ほとんど移動しない。



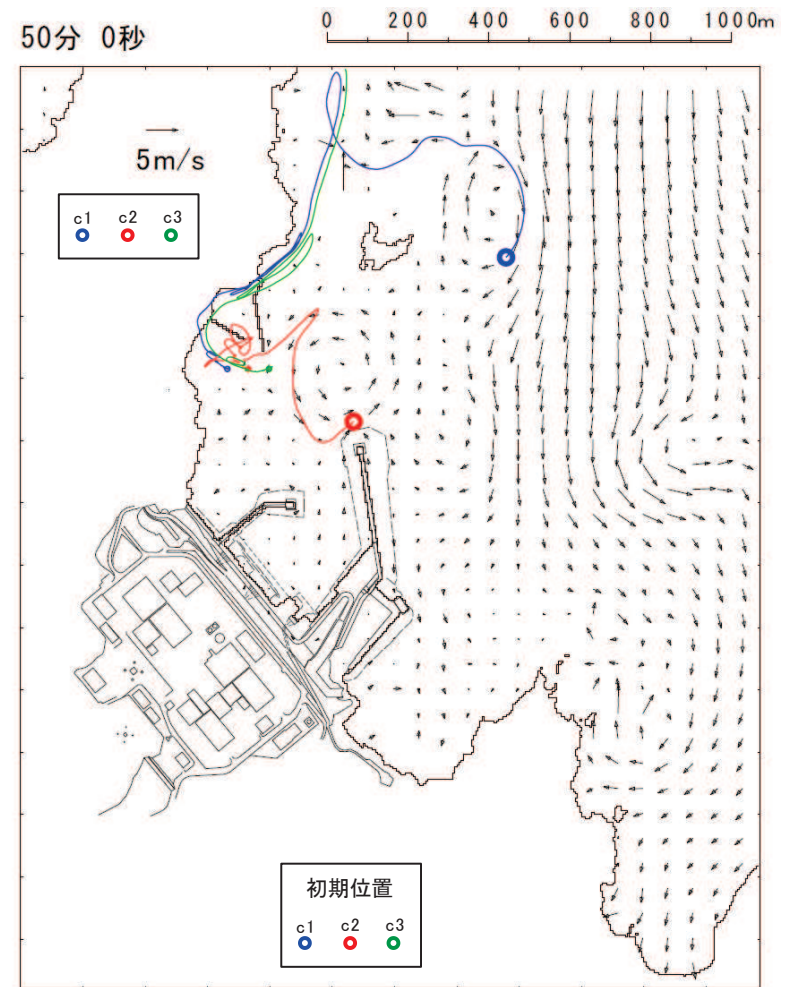
【c1, c3】津波第一波の引き波により大きく敷地から離れる方向に移動する。

【c2】ほとんど移動しない。

図 2 (15) 「直近海域（北西部）」内における軌跡解析結果の詳細（43 分後及び 44 分後）



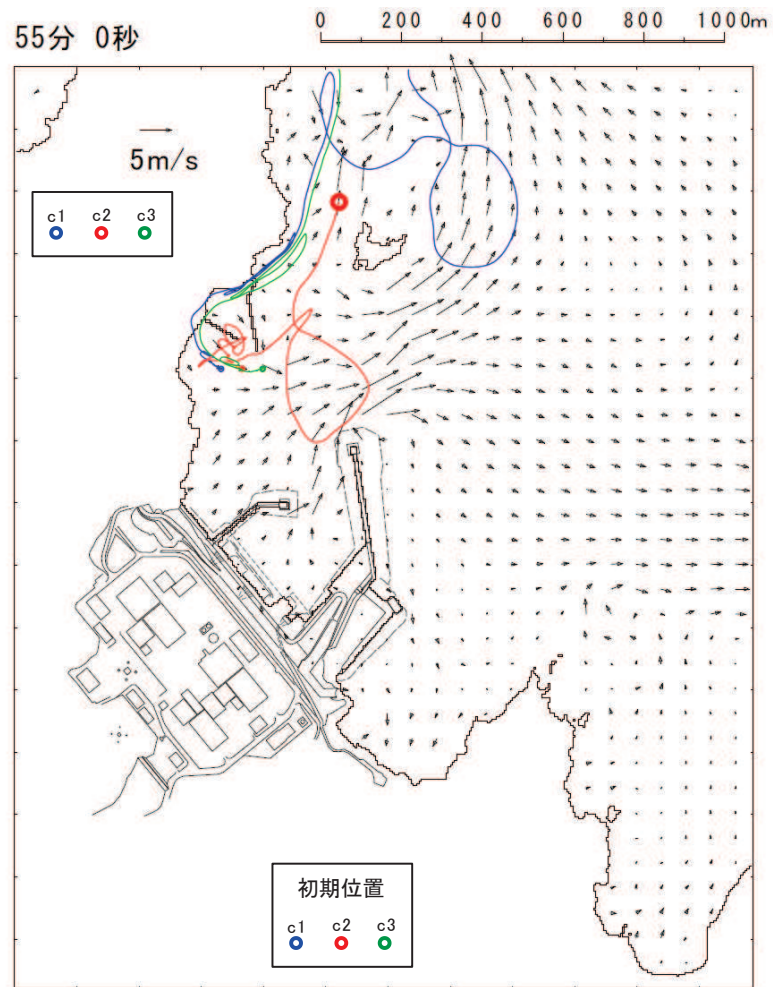
- 【c1】引き波によりさらに敷地から離れる方向に移動する。
- 【c2】小屋取漁港近傍でわずかに移動する。
- 【c3】引き波により表示外へ移動する。



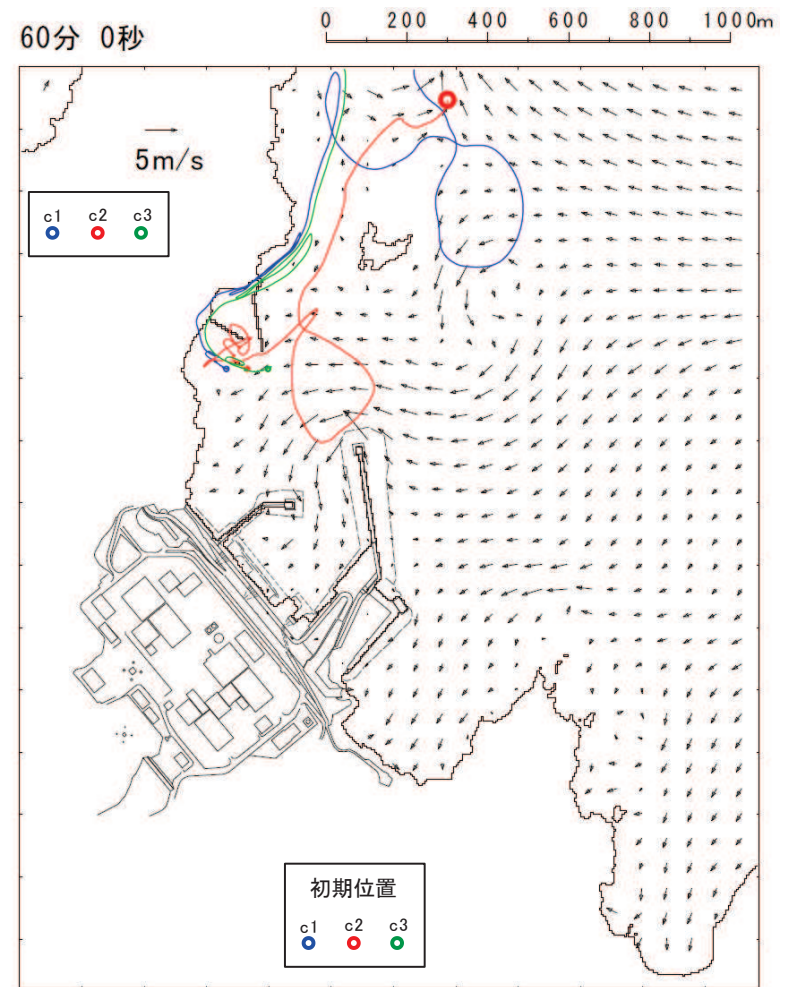
- 【c1】津波第二波以降の影響により沖側で移動する。
- 【c2】津波第二波以降の影響により発電所の東防波堤堤頭部付近を移動する。
- 【c3】表示外で移動し、敷地側には移動してこない。

図 2 (16) 「直近海域 (北西部)」内における軌跡解析結果の詳細 (45 分後及び 50 分後)



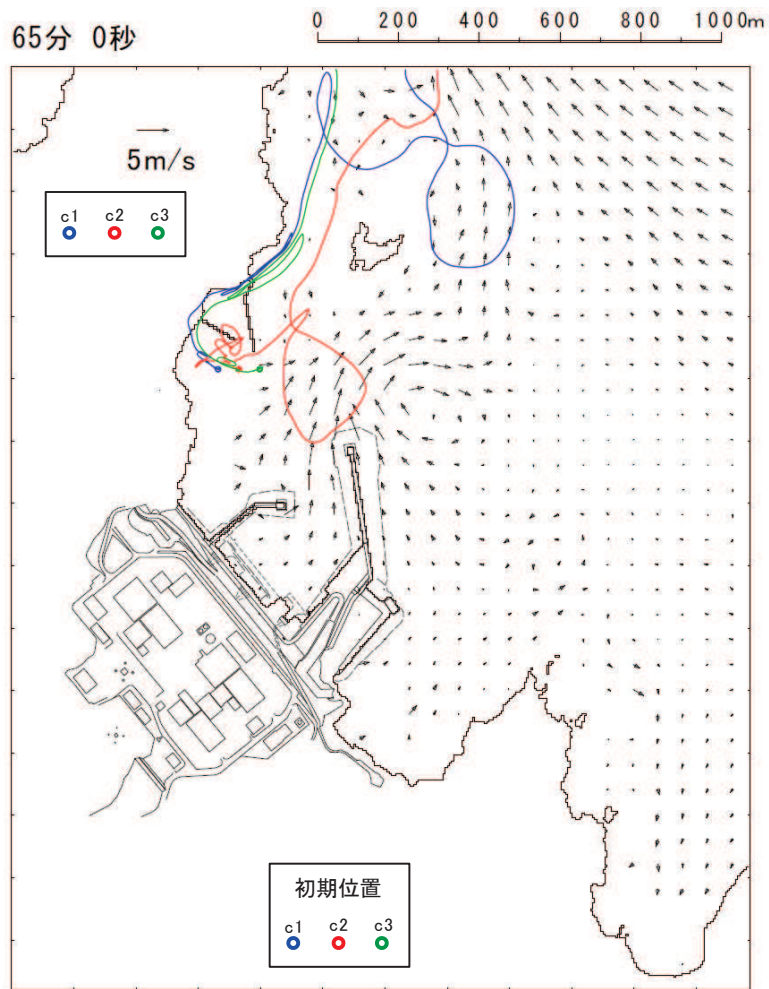


- 【c1】津波第二波以降の影響により表示外に移動する。
- 【c2】津波第二波以降の影響により敷地から離れる方向に移動する。
- 【c3】表示外で移動し、敷地側には移動してこない。

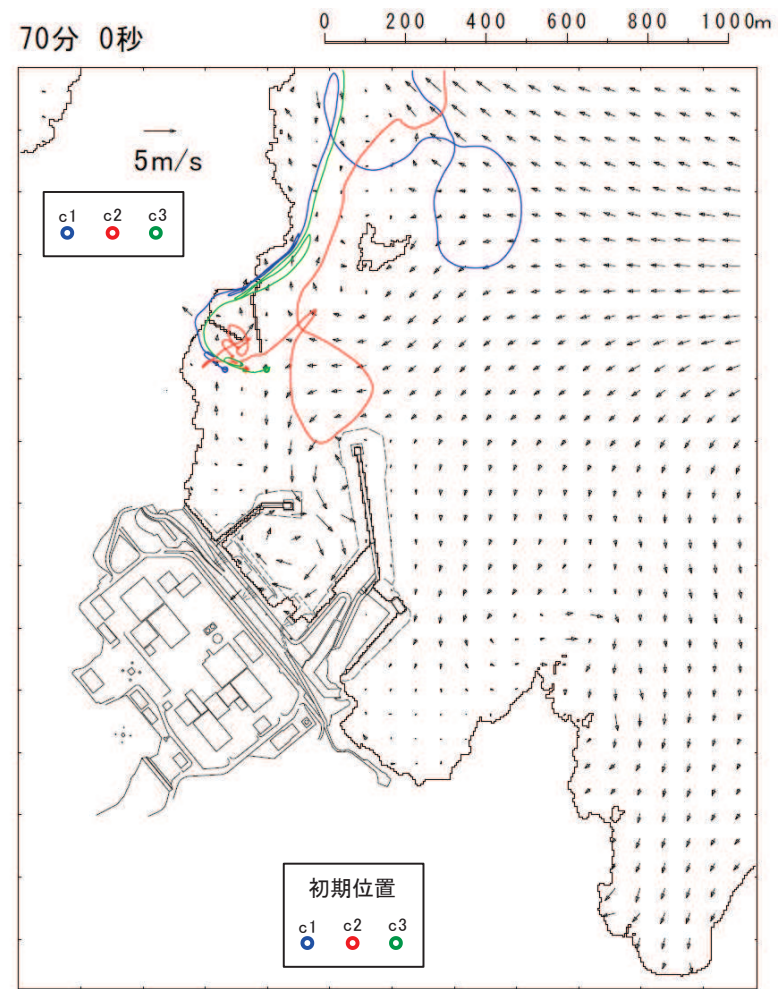


- 【c1, c3】表示外で移動し、敷地側には移動してこない。
- 【c2】津波第二波以降の影響によりさらに敷地から離れる方向に移動する。

図 2 (17) 「直近海域 (北西部)」内における軌跡解析結果の詳細 (55 分後及び 60 分後)



【c1, c2, c3】表示外で移動し，敷地側には移動してこない。



【c1, c2, c3】表示外で移動し，敷地側には移動してこない。

図 2 (18) 「直近海域 (北西部)」内における軌跡解析結果の詳細 (65 分後及び 70 分後)

構造物の衝撃挙動と設計法 ((社) 土木学会, 1994) で示されている船首強度 (圧壊荷重) の計算例を図1に示す。

(2) 船首強度の計算

船首強度は船首の座屈強度から求める。船首部側板の座屈強度は、板厚や側板各辺長さなどの関係式として次式のように表わせる。

$$\sigma_c = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq \sigma_y \quad (3.2)$$

船首の形状寸法など諸値を乗じると、船首強度すなわち圧壊荷重は次式で表わせる。

$$P_c = 2 D t \cos \theta \sigma_c \quad (3.3)$$

ここで式の記号は以下のとおりである。

- $k$  : 座屈係数 =  $\left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b}\right)^2$
- $E$  : ヤング率 =  $2.1 \times 10^7$  tf/m<sup>2</sup>
- $\nu$  : ポアソン比 = 0.3
- $\sigma_y$  : 鋼材の降伏点応力 2,400 kgf/cm<sup>2</sup>

上2式をもとに、船首部側板の座屈強度を算出する。200 G.T, 300 G.T および 500 G.T の船舶の船首部諸元を表3.2のように設定する。

ここで横肋骨心距  $a$  は、

$$a = 450 + 2L \quad (3.4a)$$

縦肋骨心距  $b$  は、

$$b = 550 + 2L \quad (3.4b)$$

また、図3.5に示す船首角度を  $2\theta = 35^\circ$ 、船首傾斜部の長さを  $L_{sf} = 0.25D$  とする。船首強度の計算結果を表3.3に示す。

表 3.2 船首部諸元

ゲート	G.T	L (m)	L <sub>coll</sub> (m)	D (m)	a (mm)	b (mm)	L <sub>sf</sub> (m)
A	200	36.84	3.68	2.95	520	620	0.74
B	300	42.17	4.22	3.37	530	630	0.84
C	500	50.00	5.00	4.40	550	650	1.00

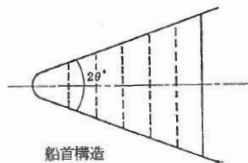


表 3.1 船首部の標準寸法値

構造寸法	記号	標準寸法	単位
船の深さ	D	0.08 L	m
船体外板厚	t	0.82√L + 2.5	mm
フレーム間隔	S	610	mm
船首隔壁位置	L <sub>coll</sub>	0.1 L	m
縦骨材間隔	b	3S	mm
船首部傾斜幅	L <sub>sf</sub>	0.25 D	m
船首部先端角度	2θ	35 ~ 70	度
船体幅	B	L/10 + 3.81	m

表 3.3 船首圧壊強度

L(m)	a(mm)	b(mm)	t(mm)	k	σ <sub>cr</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	D(m)	P <sub>c</sub> (tf)
36.84	520	620	6	4.08	725	2.95	245
42.17	530	630	6.5	4.12	832	3.37	348
50.00	550	650	7	4.12	907	4.00	484

表3.3からa及びbを算出する際に用いるLはメートル単位での数値を用いている。また、板厚tは表3.1で示されている式から算出される値よりも小さい (√Lで算出されていると考えられる)。

図1 構造物の衝撃挙動と設計法 ((社) 土木学会, 1994) で示されている計算例 (構造物の衝撃挙動と設計法 ((社) 土木学会, 1994) に一部加筆)