

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1276

March 2024

津波からの船舶緊急避難の円滑化のための 回頭能力の検証と船速の分析

篠永龍毅・安部智久

Analysis of Turning Ability and Vessel Speeds
with a view to Facilitating Emergency Evacuation from Tsunami

SHINONAGA Tatsunori, ABE Motohisa

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

津波からの船舶緊急避難の円滑化のための 回頭能力の検証と船速の分析

篠永龍毅*・安部智久**

要 旨

津波発生時に船舶が港湾内で漂流した場合、他船との衝突や岸壁への乗り上げ等により港湾内での被害が増大する可能性がある。このため、地震後に津波来襲が予想される場合には、船舶の緊急避難が必要であり、船舶の緊急避難を円滑化する観点からの水域施設（航路・泊地）に関する検討が必要である。

本研究は、今後各地で実施される緊急避難円滑化のための取り組みの参考情報を提供することを目的に、操船シミュレーションを用いて大型船の回頭能力を検証した結果と、AIS（船舶自動識別装置）データを用いて東日本大震災時の船舶が緊急避難する際の港湾内船速を分析した結果を提示するものである。

キーワード：津波，緊急避難，回頭，AIS，水域施設

* 港湾・沿岸海洋研究部 港湾計画研究室 研究官

** 港湾・沿岸海洋研究部 港湾計画研究室 室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

Analysis of Turning Ability and Vessel Speeds with a View to Facilitating Emergency Evacuation from Tsunami

SHINONAGA Tatsunori *
ABE Motohisa **

Synopsis

Drifting vessels in ports during Tsunami can worsen damages on ports, by causing collisions between vessels or running aground on piers. Therefore, countermeasures to facilitate emergency evacuation from ports are necessary for water area facilities: navigation channels and basins.

This study aims at providing useful information for ports in examining measures to facilitate such evacuation by showing results from two examinations: 1) verification of turning abilities of large vessels without support by tugboats, 2) analysis of vessel speeds in the actual emergency evacuation from the tsunami during the Great East Japan Earthquake by AIS data.

Key Words: Tsunami, Emergency Evacuation from Ports, Turning, AIS, Water Area Facilities

* Researcher, Port Planning Division, Port, Coastal and Marine Department
** Head of Planning Division, Port, Coastal and Marine Department
National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land Infrastructure, Transport and Tourism
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-468-44-5019 Fax : +81-468-42-9265 e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 本研究の背景と経緯	1
2.1 津波来襲時の船舶の対応	1
2.2 本研究の経緯	1
3. 大型船の回頭能力に関する検証	3
3.1 回頭実態の把握と検証対象の抽出	3
3.2 検証の方法	10
3.3 入船自力離棧の検証結果	14
3.4 出船着棧における水深影響の検証結果	16
4. 東日本大震災時の船舶が緊急避難する際の港湾内船速に関する分析	19
4.1 分析の方法	19
4.2 各港の概要	19
4.3 港湾内船速についての分析	25
4.4 船舶の間隔についての分析	30
4.5 各港の比較	32
5. まとめ	33
謝辞	33
参考文献	33

1. はじめに

津波発生時に船舶が港湾内で漂流した場合、他船との衝突や岸壁への乗り上げ等により港湾内での被害が増大する可能性がある。このため地震後に津波が予想される場合には、船舶の緊急避難や係留強化が必要となる。このような問題意識から、国土交通省は2021年3月に「海・船の視点からみた港湾強靱化 Ver.1」を公表し今後の取り組みの方向性を示した¹⁾。この中で、船舶の緊急避難を円滑化するための水域施設（航路・泊地）に関する検討の必要性が示されている。

本研究は、このような施設整備に先立ち今後各地で実施される緊急避難円滑化をはじめとした取り組み（リスク評価や港湾BCPの改訂等）の参考情報を提供することを目的に、大型船の回頭能力の検証を行うとともに、船舶が緊急避難を実際に行った際の船舶動静をAIS（Automatic Identification System）データにより分析するものである。

本資料の構成は以下のとおりである。第2章において既往の研究結果と課題を提示する。第3章において操船シミュレーションにより大型船の回頭能力を検証し、大型船の自力離棧の可否や所用時間について考察する。第4章においてAISデータにより東日本大震災発生時の船舶が緊急避難する際の船舶動静を分析し、船舶が緊急避難する際の港湾内船速について考察する。

2. 本研究の背景と経緯

2.1 津波来襲時の船舶の対応

港湾への津波の来襲が予想される場合、港長は港内の船舶に危険の防止の円滑な実施のために必要な措置を講ずるよう勧告する（設備障害等で伝達ができない場合も有り得るため、気象庁からの津波警報等の発表を持って勧告が发出されたとみなす場合もある。）。

危険の防止の円滑な実施のために必要な措置とは、プレジャーボート等の陸揚げできる小型船を除く船舶について、航行中の場合は港外への緊急避難、係留中の場合は避難に要する十分な時間が有れば港外への緊急避難、避難に要する十分な時間が見込めない場合は係留の継続である。

この避難に要する時間には、回頭や港外への航行の所要時間のほか、船員招集やエンジン始動、荷役機械の切り離し、タグボートの確保等の出港準備に要する時間も含まれる。船長が、避難に要する十分な時間があるかを判断し緊急避難と係留強化どちらにするかを決定する。

地震発生時の対応については船長判断ではあるが、各港湾において災害に対するリスク評価や港湾BCPの改訂等の

事前対応を行う上で、港湾管理者等が緊急避難についての一定の知見を有しておくことが有益である。

2.2 本研究の経緯

今後各地で実施される緊急避難円滑化をはじめとした取り組みの参考情報を提供することを目的に安部・篠永は、東日本大震災発生時の船舶の緊急避難の実態についてのAISデータによる分析、津波予測データに関する分析、船舶運航の関係者が実施した既存の検討資料の収集・整理（表-2.1）、専門家へのヒアリングを行い、水域施設に関連したリスク評価等の今後の取り組みにおける視点を検討した²⁾。この研究の結論の一部を以下に示す。

- ・東日本大震災発生時の船舶の避難実態について、苫小牧港では一定時間内で船舶は一定の間隔を空けて避難できていた。東京湾諸港は多くの船舶が避難した一方で、係留を継続した船舶も見られたが漂流には至らなかった。鹿島港では船舶の多くが漂流した。各港の一定規模以上の船舶の緊急避難時間については、タグボートの確保までの時間が一要因となっている。津波来襲までにタグボートの間に合わず、一時的に津波が収まった際にタグボートの支援により避難する船舶も多数確認された。
 - ・東日本大震災を受け、船舶運航側も係留維持の可能性、自力での離棧・回頭の実行可能性、入船係留（出航時に回頭が必要となる係留形態）から出船係留（出航時に回頭を要しない係留形態）への転換可能性といった津波発生時の緊急避難の可能性を問題意識とした検討を実施している。
 - ・津波の規模が一定程度を超えた場合、来襲までの時間が短くなり確実な緊急避難が困難となり得るため、検討の際は緊急避難が現実的に対応可能な津波を対象とすべきである。また水域の整備・運用の両面から対策を考慮し緊急避難と係留継続を適切に使い分けるべきである。
- 港湾管理者による水域の整備とともに船舶運航の関係者による運用の両面から対策を考慮し、緊急避難と係留継続を適切に使い分けるため、さらに緊急避難についての分析を実施することが重要である。緊急避難においては、まず迅速に船舶が離棧・回頭した上で、航路内で安全かつ円滑に航行できることが必要である。通常時には一定規模以上の船舶はタグボート支援により離棧・回頭するが非常時にはタグボートの確保は確実で無いことから、自力で離棧・回頭できるかの検証が必要である。また、出港時に回頭を必要としない出船係留が緊急避難に有利との指摘があるが、入港時に船舶が重い状態で回頭を行わなければならないこの実行可能性については議論があるところである。航路内の航行についても、船舶輻輳等の影響も想定されるが緊急避

表-2.1 船舶運航関係者等による既往の検討^{3) 4) 5) 6) 7) 8) 9) 10)}

文献名	対象施設	主な結論と指摘事項
久保(2021)「津波が船舶を被害者・加害者に変える」絆 津波からいのちを守るために 国際津波・沿岸防災技術啓発事業組織委員会(編集) P63	全般	・津波発生時に港湾内では波高が高くなりリスクが高くなり得るため、港湾外への避難が必要。 ・津波襲来時の緊急出航のための方策について指摘。 ①出船係留への転換 ②単一港口を二港口に転換 ③防波堤と岸壁の間の水域について十分な距離を確保し回頭を支援 ④泊地の増深による入港時の回頭(出船係留への転換)の支援
榊原ら(2017)「東日本大震災における津波観測および港内係留船舶の被災実態調査に基づく係留限界津波高さの推定」日本航海学会論文集No.136	全般	○東日本大震災発生時の津波特性、係留・避難の行動を分析し以下の指摘を行っている。 ・津波高さが4m以上の場合には係留継続は不可、2m未満なら一定の安全性が確保できると推定されるが、港湾内の津波特性等についてさらなる検討が必要。 ・震源から300km以内の港湾では60分位で津波が到達する。 ・10,000GT以上の船は係留保持の場合が多く、また港湾外へ避難した船舶は出船係留が多いという特徴があった。
榊原ら(2012)「東北方太平洋沖地震津波来襲時の係留VLCCの挙動再現について」日本航海学会第126回講演会	航路水深	○係留船 (VLCC) について船体動揺を評価。 ・津波発生時の船体動揺のシミュレーションを行い、船体のピッチング角が最大約2度になるという結果を得ている。
邦船社 (2012) によるガイドライン	全般	○東日本大震災の状況を踏まえ、津波来襲の情報を入手した場合の対応を検討している。 ・係留限界の目安は津波高さ 3 m。 ・コンテナ船について、緊急出航の可能性を風向・風速を変えて評価している。入船左舷付の場合にはスラスターのみで出航可能。出船右舷付の場合、操船時に防舷材への接触がある。同様の評価を P C C について実施。バルカーはスラスターがないため、タグボートがなければ、向岸風の状況では出航が困難。 ・沖合においてはピッチングによる船体運動に配慮し、安全水深を設定する必要がある。
日本海難防止協会「海と安全」2012年春号 No. 552 P67	全般	○緊急避難できる条件について整理している：時間的余裕、人員確保、荷役状態、船体の状態（トリム、貨物の固縛状況）、給油状態、タグボートの確保、安全な水域までの距離・避難見通し、停電の有無、天候
日本航海学会 「東日本大震災検討会講演資料集」 2011年～2013年に 3 回実施された講演会資料集	全般	【講演会全体を通じての結論】 ・リスクが高い危険物船の避難のため、タグを常時待機させるか、スラスターの装備を考える必要がある。 ・貨物船について、自力での離れについて緊急時の操船方法により可能性があるが、限界となる条件がある。 ・一般的大型船について係留の限界は、津浪高さ3m、流速3ノット程度までが目安となる。 ・港湾内で適切な水域があれば避泊できる可能性がある。
	泊地	【東京海洋大学 矢吹らによる検討（2013年11月）】 ○自力での避難のための操船方法について検討するとともにその実行可能性・条件をMMG型操縦モデルに基づくシミュレーションで評価。風速を与え、潮流は考慮していない。 ・パナマックスバルカー、コンテナ船、PCCについて後退しながらの自力離岸操船は有効。一定程度の風速下で可能。 - 本研究では、パナマックスバルカーについては54,000DWT (Loa=209m)、コンテナ船については4,000TEUクラス (Loa=290m)、6,000台積 P C C (Loa=200m) を対象にシミュレーションで検証。いずれもバウスラスターの利用が有効。 ・L N G 船 (Loa=283m) については、警戒船（タグ）1隻による支援の下での検証を実施。一定程度の風速下で緊急避難が可能。 ・上記の操船を行う際には、一定の広さの水域が必要。
	泊地	【東京電力による検討（2013年11月）】 ○東京湾を対象にLNG船の緊急避難について検討。 ・岸壁から一定距離離れた後に回頭させる方式とし、警戒船（タグボート）による支援（1～2隻）を前提とする。 - 一定の風速を与える。 ・シミュレーターにより、操船可能性を検証。ブイ通過まで30～45分要する。
	泊地	【中部電力による検討（2013年11月）】 ○伊勢湾を対象にLNG船の緊急避難について操船ガイドラインを検討。 ・警戒船（タグボート）支援（1隻）の下でのキック操船とする。一定風速を与える。 ・シミュレーターにより操船可能性と所要時間を検証。緊急離れ準備に約40分、離れ・回頭に約20分を要する。
	泊地・航路	【日本海洋科学 中村らによる検討（2011年5月）】 ○L N G 船の緊急避難に関する検討を行っている。 ・緊急避難時の操船性確保の条件として、速力は津波の流速より2ノット以上大きくすること、斜行角は30度を超えないことが必要。 ・出船係留への変更については、着岸時の操船の困難化、係留索配置変更、着陸時の所要時間増大（約15分）が課題。
日本海難防止協会（2014）「大地震及び大津波来襲時の航行安全対策に関する調査研究」	泊地	○操船シミュレーションを実施し以下ケースについて緊急離れの可能性を確認。 ・LNG船 (Loa=300m)、大型タンカー (Loa=337m) について、津波来襲前を対象に一定の風向・風速下で評価。入船・出船、タグ支援の有無、スラスター有無を条件として与え、防舷材への反力（損傷）、避難の所要時間等を評価。 ・コンテナ船 (Loa=300m)、貨物船 (Loa= 90m, 60m) について津波来襲中の緊急離れの可能性を評価。第二波の引き波以降を対象とした。津波による流向・流速を可変としている。条件によっては港湾外への避難ができない場合がある。
松田・富田（2012）「鹿島港における津波来襲時の船舶避難行動分析」日本船舶海洋工学会講演会論文集 第15号	全般	○東日本大震災発生時の鹿島港での船舶動向をAISで分析している。 ・鹿島港においては津波痕跡高が港外の海岸で約 5 m であった。 ・10,000GT以上の船舶について、港外避難が少なく大半が漂流している。 ・上記の他、避難に要した時間、漂流時の操船有無について分析。

難時の航路内の航行実態について分析された事例が無い現状にある。

以上を踏まえ、通常タグボートを使用する船舶の自力での離棧・回頭の実行可能性、入船係留から出船係留への転換可能性、緊急避難の際の回頭に要した時間の分析のため大型船の回頭能力を検証する。また、緊急避難時を想定した船舶航行に関する理解と、防波堤の外に出るまでの港湾内での船速等も踏まえた所要時間の評価のため、東日本大震災時の船舶が緊急避難する際の港湾内船速を分析する。

3. 大型船の回頭能力に関する検証

3.1 回頭実態の把握と検証対象の抽出

(1) AIS データによる分析

大型船の回頭能力に関する検証のために、通常は出港時にタグボートの支援により回頭を行っているが、緊急時に自力で回頭できる可能性のある船舶(以下、「検証対象船舶」とする)を抽出するため、AIS データにより船舶が緊急避

難する場合の港湾内での回頭実態について分析した。東日本大震災で津波が来襲した東日本太平洋沿岸域を対象に、地震発生以後の AIS データが存在していること、多くの船舶による港湾外への緊急避難が確認されること等の条件から苫小牧港(西港区)、東京港、千葉港(千葉中央地区)の3港湾を抽出し、港湾外への緊急避難のための回頭実態について分析した。なお、回頭離棧距離についての分析は、連続的な航跡が確認可能な入船係留の船舶のみ行った。

各港の地震発生時の船舶の位置情報を図-3.1～図-3.3、分析例を図-3.4～図-3.6、整理した結果を表-3.1 に示す。コンテナ船9隻、RO/RO 船・PCC11隻、貨物船(一般貨物船・バルク船)22隻、タンカー9隻、その他6隻を分析対象としたが、各船種とも、大型の場合にタグボートの支援により回頭する傾向があったことが確認できた。回頭離棧距離については、航路・泊地の広さに余裕のあるケース(苫小牧港-3、東京港-6、東京港-7)を除き、概ね 2L (L は船の全長) 以下であった(苫小牧港-9 は 2.1L)。

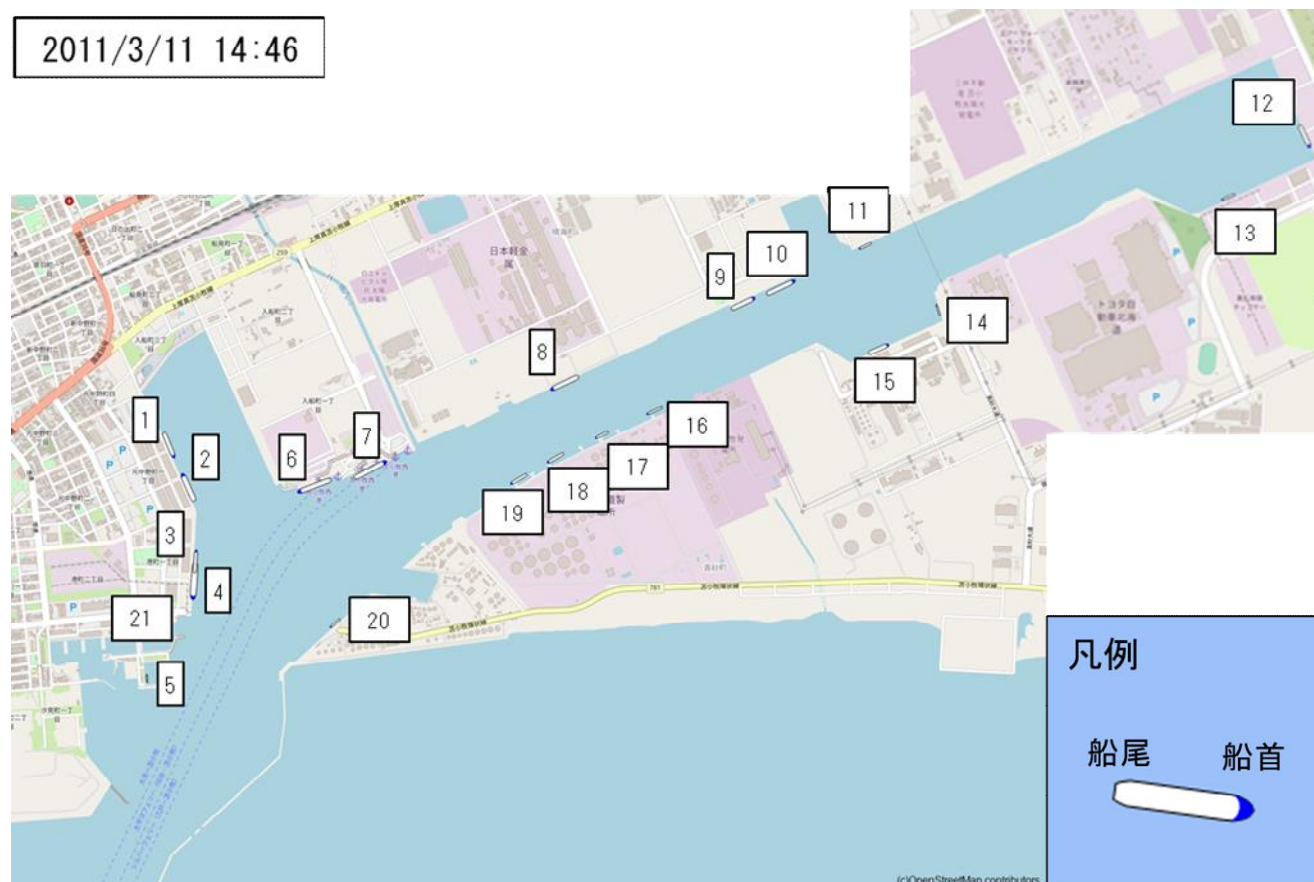


図-3.1 地震発生時点での港内船舶状況(苫小牧港)

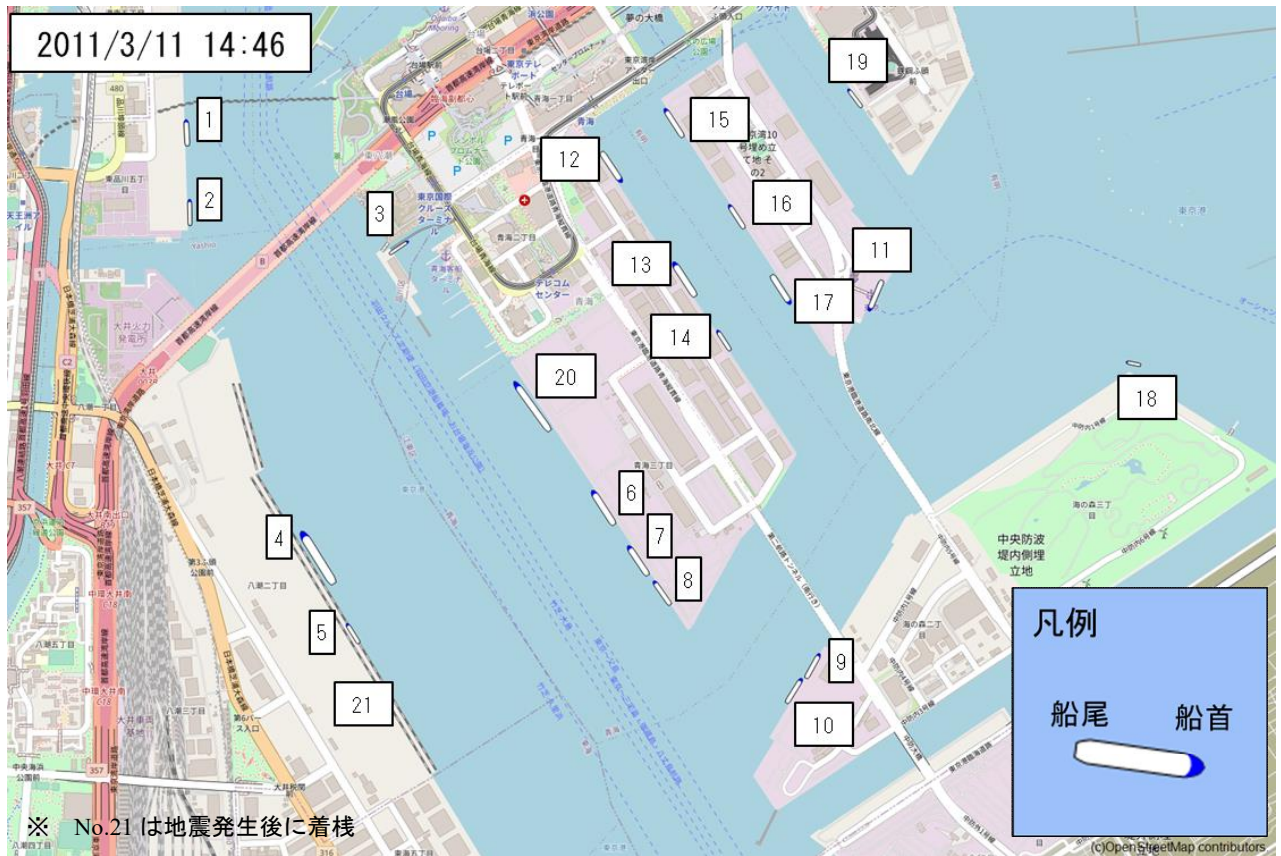


図-3.2 地震発生時点での港内船舶状況（東京港）

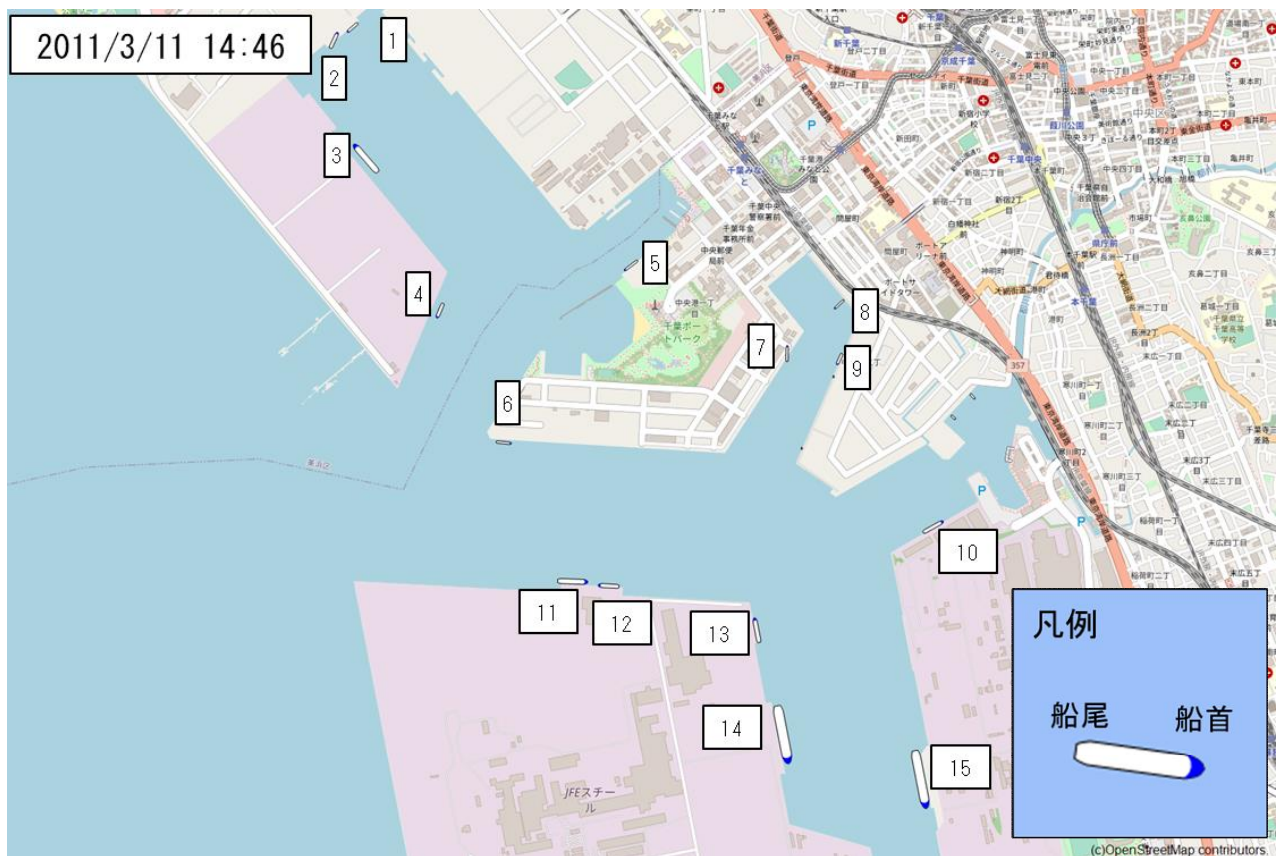


図-3.3 地震発生時点での港内船舶状況（千葉港）

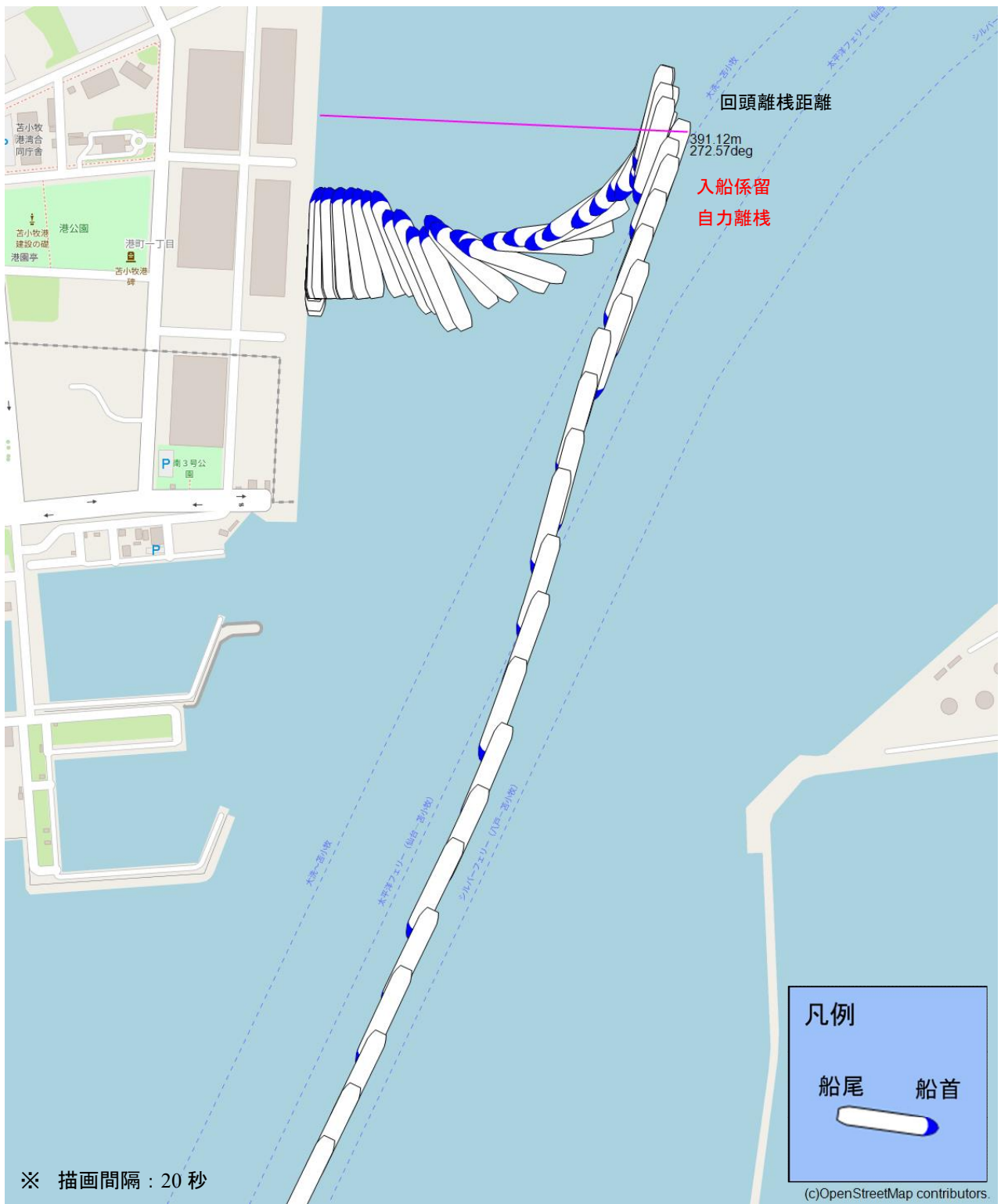


図-3.4 苫小牧港-3 を用いた分析例

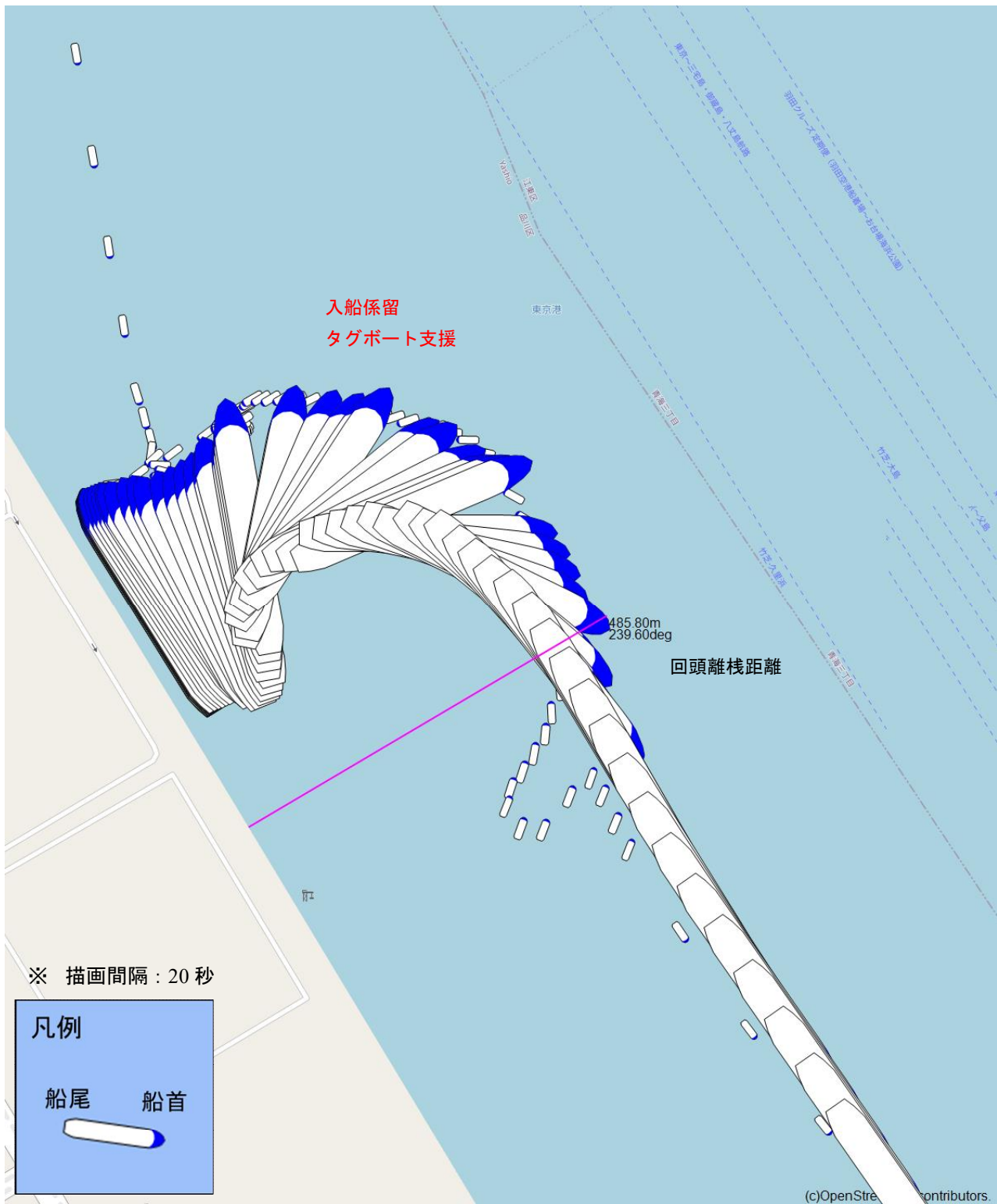


図-3.5 東京港-4 を用いた分析例



図-3.6 千葉港-9 を用いた分析例

表-3.1 AIS データによる分析結果

	港 No.	総トン数	載貨重量 トン数	L : 全長	A : 回頭 離岸距離	A/L	全幅	喫水	係留状態	避難形態
コンテナ船										
1	東京港	4	78,316GT	79,433DWT	302m	486m	1.6	42m	14.2m	入船係留 タグボート支援
2	東京港	21	53,833GT	67,680DWT	294m	573m	1.9	32m	13.5m	入船係留 タグボート支援
3	東京港	20	53,359GT	57,904DWT	294m	-	-	32m	12.6m	入船係留 タグボート支援
4	東京港	7	16,488GT	22,027DWT	172m	400m	2.3	27m	9.5m	入船係留 タグボート支援
5	東京港	9	8,917GT	9,294DWT	138m	-	-	22m	7.8m	出船係留 自力離棧
6	東京港	8	8,250GT	12,400DWT	140m	-	-	23m	8.7m	入船係留 自力離棧
7	東京港	2	7,401GT	9,157DWT	127m	-	-	20m	7.4m	入船係留 係留継続
8	東京港	1	7,197GT	9,677DWT	125m	188m	1.5	20m	7.8m	入船係留 自力離棧
9	東京港	5	4,822GT	6,816DWT	113m	-	-	20m	6.5m	入船係留 自力離棧
RO/RO船・PCC										
1	東京港	12	38,062GT	13,898DWT	178m	-	-	29m	9.1m	出船係留 タグボート支援
2	苫小牧港	7	15,795GT	7,042DWT	200m	-	-	26m	6.7m	入船係留 自力離棧
3	苫小牧港	6	13,654GT	6,511DWT	192m	-	-	26m	6.7m	出船係留 自力離棧
4	苫小牧港	2	13,089GT	7,078DWT	160m	-	-	26m	7.0m	入船係留 自力離棧
5	東京港	11	11,114GT	4,700DWT	155m	-	-	25m	6.3m	入船係留 自力離棧
6	東京港	17	10,470GT	6,202DWT	166m	-	-	27m	6.6m	出船係留 自力離棧
7	東京港	15	10,185GT	6,890DWT	168m	272m	1.6	26m	6.7m	入船係留 自力離棧
8	苫小牧港	8	8,608GT	5,952DWT	167m	-	-	24m	7.0m	出船係留 自力離棧
9	苫小牧港	3	8,359GT	8,421DWT	118m	391m	3.3	20m	7.5m	入船係留 自力離棧
10	苫小牧港	1	5,411GT	4,979DWT	148m	-	-	20m	6.7m	出船係留 自力離棧
11	東京港	16	5,310GT	5,506DWT	139m	235m	1.7	22m	6.3m	入船係留 自力離棧
貨物船（一般貨物船・バルク船）										
1	千葉港	14	87,803GT	171,978DWT	289m	-	-	45m	17.7m	入船係留 係留継続
2	千葉港	15	84,507GT	170,473DWT	289m	-	-	45m	17.6m	入船係留 係留継続
3	苫小牧港	4	40,399GT	49,724DWT	199m	-	-	32m	11.5m	出船係留 係留継続
4	東京港	6	32,551GT	48,000DWT	199m	601m	3.0	31m	11.5m	入船係留 タグボート支援
5	東京港	13	32,551GT	45,851DWT	199m	-	-	31m	11.5m	入船係留 自力離棧
6	千葉港	30	20,238GT	32,000DWT	177m	333m	1.9	28m	10.0m	入船係留 タグ支援
7	苫小牧港	10	18,096GT	28,766DWT	169m	-	-	26m	9.8m	入船係留 タグ支援
8	苫小牧港	9	13,694GT	19,949DWT	149m	318m	2.1	24m	9.6m	入船係留 自力離棧
9	千葉港	11	11,115GT	14,913DWT	149m	-	-	22m	9.1m	入船係留 係留継続
10	千葉港	13	9,593GT	12,909DWT	119m	-	-	21m	8.8m	出船係留 係留継続
11	東京港	10	9,083GT	10,837DWT	144m	-	-	22m	9.0m	出船係留 タグボート支援
12	東京港	14	7,823GT	10,292DWT	115m	211m	1.8	20m	8.2m	入船係留 タグボート支援
13	苫小牧港	12	7,754GT	4,120DWT	132m	-	-	22m	6.2m	入船係留 自力離棧
14	千葉港	12	6,049GT	10,304DWT	100m	-	-	19m	7.9m	出船係留 係留継続
15	千葉港	10	4,825GT	6,991DWT	108m	-	-	18m	6.8m	入船係留 係留継続
16	千葉港	7	1,582GT	1,867DWT	76m	-	-	12m	4.6m	入船係留 係留継続
17	千葉港	6	1,433GT	1,580DWT	74m	-	-	12m	4.0m	入船係留 係留継続
18	千葉港	2	749GT	2,000DWT	83m	-	-	14m	4.4m	出船係留 自力離棧
19	苫小牧港	13	695GT	2,000DWT	91m	-	-	12m	-	出船係留 自力離棧
20	苫小牧港	11	573GT	1,699DWT	77m	-	-	12m	4.1m	出船係留 自力離棧
21	苫小牧港	14	370GT	1,250DWT	68m	-	-	10m	6.3m	出船係留 自力離棧
22	千葉港	1	-	-	68m	-	-	11m	-	出船係留 自力離棧
タンカー										
1	苫小牧港	15	6,716GT	10,000DWT	119m	-	-	20m	7.7m	入船係留 タグボート支援
2	苫小牧港	18	3,790GT	5,583DWT	103m	-	-	16m	6.6m	出船係留 自力離棧
3	苫小牧港	19	3,377GT	4,999DWT	104m	-	-	14m	6.3m	出船係留 自力離棧
4	苫小牧港	16	2,283GT	2,999DWT	92m	-	-	14m	5.5m	出船係留 自力離棧
5	千葉港	5	1,066GT	2,305DWT	80m	-	-	12m	5.3m	出船係留 係留継続
6	苫小牧港	17	995GT	2,308DWT	79m	-	-	12m	5.1m	出船係留 自力離棧
7	千葉港	9	752GT	752DWT	57m	-	-	10m	3.6m	出船係留 自力離棧
8	千葉港	4	749GT	1,850DWT	69m	-	-	12m	4.6m	出船係留 自力離棧
9	千葉港	8	499GT	1,200DWT	64m	-	-	10m	4.2m	出船係留 自力離棧
その他										
1	東京港	19	2,891GT	1,456DWT	110m	-	-	14m	6.6m	入船係留 タグボート支援
2	東京港	3	2,879GT	1,425DWT	110m	-	-	14m	6.6m	入船係留 自力離棧
3	苫小牧港	20	999GT	1,128DWT	69m	-	-	10m	4.3m	出船係留 自力離棧
4	東京港	18	697GT	2,050DWT	74m	-	-	14m	4.5m	入船係留 自力離棧
5	苫小牧港	5	234GT	-	43m	-	-	8m	-	-
6	苫小牧港	21	-	-	34m	-	-	10m	-	-

(2) 文献・論文の収集整理

検証対象船舶抽出のための AIS による分析を補足するため、既往の文献・論文の中から自力離棧・回頭に関して実施されたシミュレーション結果を収集した（表-3.2）。

「船舶の津波対策シンポジウム講演資料集」においては、津波に関する予報、警報を受けて自力離棧を決断した場合を想定しバルク船（パナマックス）、コンテナ船、PCC について数学モデルによる操船シミュレーション実験を実施し、5m/s 程度の向岸風下で自力離棧が可能と判断している。さらに、バウスラスターを装備しているコンテナ船、PCC では操船所要時間の短縮化、8m/s 程度の向岸風下での自力離棧の可能性を評価している¹¹⁾。

「大地震及び大津波来襲時の航行安全対策に関する調査研究」においては、津波来襲前の緊急離棧を想定し、大型危険物船（VLCC 等）のタグボートの支援の有無並びに船舶の係留形態（出船係留、入船係留）による離棧可能性、必要操船水域等についてシミュレーション実験により検証している。この結果 VLCC においてもタグボート無しで自力離棧自体は可能であるものの、操船者心理等から自力離棧は困難であるとの評価が示されている⁹⁾。

(3) 検証対象船舶の抽出

a) 抽出の基本的な考え方

(1) 及び (2) の結果を踏まえ検証対象船舶を船種ごとに抽出する。LNG 船・LPG 船はバウスラスターに加えてタグボートの支援を受けることが望ましいとの結論が既往の文献・論文等で示されていることから抽出の対象外とした。

b) コンテナ船

AIS データの分析結果（表-3.1）から、1 万 GT 以下のコンテナ船では概ね自力離棧、1 万 GT～8 万 GT のコンテナ船ではタグボートの支援により離棧していることが確認される。一方で、シミュレーション結果（表-3.2）では、5 万 GT 級のコンテナ船が、バウスラスター使用・未使用の双方で自力離棧可能との結果が示されている。これらの結果を踏まえて、5 万 GT よりも大型のコンテナ船（バウスラ

スター使用）をコンテナ船での検証対象船舶とする。

c) RO/RO 船・PCC

AIS データの分析結果（表-3.1）から、2 万 GT 以下の RO/RO 船では入船係留、出船係留に拘わらず自力離棧、4 万 GT 級の PCC（出船係留）ではタグボートの支援により離棧していることが確認される。一方で、シミュレーション結果（表-3.2）では、6 万 GT 級の PCC が、バウスラスター使用・未使用の双方で自力離棧可能との結果を示している。これらの結果を踏まえて、6 万 GT よりも大型の RO/RO 船（バウスラスター使用）あるいは PCC（バウスラスター使用）を RO/RO 船・PCC での検証対象船舶とする。

d) 貨物船（一般貨物船・バルク船）

AIS データの分析結果（表-3.1）から、最大 3 万 GT 級の貨物船（一般貨物船／入船係留）が自力離棧していることが確認される。一方で、シミュレーション結果（表-3.2）では、4 万 GT 級の貨物船（バルク船／バウスラスター無し）が自力離棧可能であるとの結果を示している。

これらの結果を踏まえて、4 万 GT 程度から、主要な船型（パナマックス、ケーブサイズ）を考慮し段階的に大型化させた複数の貨物船を検証対象船舶とする。なお、貨物船は積載条件により排水量、喫水、風圧面積等が大きく変わるため、積載条件と風速条件を考慮して検証の条件を設定する。

e) タンカー

AIS データの分析結果（表-3.1）から、5 千 GT 級以下のタンカーは自力離棧していることが確認される。

一方で、シミュレーション結果（表-3.2）では、VLCC（16 万 GT 級）がタグボート無しで自力離棧自体は可能であるものの、操船者心理等から自力離棧は困難であるとの評価が示されている。これらの結果を踏まえて、VLCC よりも小型のタンカーを検証対象船舶とする。なお、タンカーは積載条件により排水量、喫水、風圧面積等が大きく変わるため、積載条件と風速条件を考慮して検証の条件を設定する。

表-3.2 既往の文献・論文でのシミュレーション結果

文献	船種	総トン数	全長	全幅	喫水	バウスラスター	係留状態	避難形態	結果
船舶の津波対策 シンポジウム 講演資料集	コンテナ船	51,754GT	289.5m	32.2m	10.5m	使用	入船係留	自力離棧	離棧可能
	コンテナ船	51,754GT	289.5m	32.2m	10.5m	未使用	入船係留	自力離棧	離棧可能
	PCC	58,000GT	199.9m	32.2m	8.5m	使用	入船係留	自力離棧	離棧可能
	PCC	58,000GT	199.9m	32.2m	8.5m	未使用	入船係留	自力離棧	離棧可能
	バルク船	43,000GT	209.0m	32.2m	9.5m	無し	入船係留	自力離棧	離棧可能
大地震及び 大津波来襲時の 航行安全対策に 関する調査研究	VLCC	160,000GT	333.0m	60.0m	20.5m	無し	入船係留	自力離棧	離棧可能*注)
	VLCC	160,000GT	333.0m	60.0m	20.5m	無し	出船係留	自力離棧	離棧可能*注)
	VLCC	160,000GT	333.0m	60.0m	20.5m	無し	入船係留	タグボート支援	離棧可能
	VLCC	160,000GT	333.0m	60.0m	20.5m	無し	出船係留	タグボート支援	離棧可能

注) 自力離棧自体は可能であるが、操船者心理等から自力離棧は困難であるとの判断が示されている。

3.2 検証の方法

(1) 操船シミュレーションの概要

本検証においては、検証対象船舶について、緊急避難時等の操船方法の設定に配慮し、船舶挙動を再現できる鳥観図操船シミュレーション手法により回頭能力を評価する。

回頭能力には、自力回頭の実施可能性の他、回頭に要する時間、回頭に必要な水域面積を含み、回頭能力評価においては異なる航行条件（風速条件等）に配慮した。

シミュレーションは、航海情報の表示及び操作を行うモニター画面と港湾形状及び船舶の動きを表示するモニター画面を有するものであり、大型船舶長経験者である操船者は画面上に表示された航海情報と船舶の動きを平面的に見ながら操船する。シミュレーション上の船舶は、操船指令に応じ、数学モデルによって組み込まれている船舶の運動性能に従って動作するため、操船者は、実際の船舶を操船するのと同様の感覚で操船することになる。

本研究では、このようなシミュレーション手法により、2つの検証（入船自力離棧の検証、出船着棧における水深影響の検証）を行った。

(2) 入船自力離棧の検証

緊急避難時にタグボートが使えない場合の離棧から航行開始まで入船自力離棧の可能性を検証した。検証対象船舶を対象とし、これらの船舶の主要目を表-3.3に示す。船体運動数学モデルにより、実船と同等の運動性能を再現できるものとした。

操船手段について、主機回転数は実船の資料を基に段階的に設定し、所要の船速が得られるよう調整した（表-3.4）。舵は一般舵を用い、最大舵角を両舷35度とした。コンテナ船及びRORO船はバウスラスターを利用可能とした（表-3.5）。錨は使用しない。

非空載である場合の積載条件（半載、満載）は、入港実績を反映して設定した。風はある場合、既往の研究に合わせ向岸風風速5m/secのダベンボートの風速スペクトルを使用した変動風とし、波及び潮流は津波来襲前を想定した検証であるため設定しないこととした。

シミュレーションケースについて表-3.6示す。操船水域及び開始から終了までの船舶動静例は図-3.7と図-3.8に示すとおりである。

表-3.3 対象船舶の主要目

		コンテナ船		RORO船		貨物船A		貨物船B		貨物船C		タンカー									
総トン数		93,496GT		75,251GT		36,551GT		60,873GT		84,022GT		28,460GT									
載貨重量トン数		110,000DWT		43,878DWT		70,257DWT		97,114DWT		159,000DWT		49,780DWT									
全長		352.3m		265.0m		225.0m		239.9m		280.0m		183.1m									
垂線間長		336.4m		250.0m		217.0m		234.5m		271.0m		175.3m									
型幅		42.8m		32.3m		32.3m		43.0m		47.0m		32.2m									
型深		24.1m		upper deck:33.22m main deck:15.20m		18.3m		20.5m		24.0m		19.1m									
スラスター		バウスラスター 24.0tf		バウスラスター 24.5tf		無し		無し		無し		無し									
舵		通常舵×1		通常舵×1		通常舵×1		通常舵×1		通常舵×1		通常舵×1									
主機		63,000kw×1		ディーゼル×1 最大出力 (MCR) 20,100kw×95.0rpm 常用出力 (NCR) 18,090kw×91.7rpm		ディーゼル×1 最大出力 (MCR) 9,414kw×123.0rpm 常用出力 (NCR) 8,002kw×116.5rpm		ディーゼル×1 最大出力 (MCR) 9,680kw×90.0rpm 常用出力 (NCR) 8,225kw×85.2rpm		ディーゼル×1 最大出力 (MCR) 14,220kw×84.0rpm 常用出力 (NCR) 9,050kw×72.3rpm		ディーゼル×1 10,462kw									
プロペラ		FPP×1		FPP×1		FPP×1		FPP×1		FPP×1		FPP×1									
載貨状態		半 載 (水深4.4mに 対し脚きり) F:12.72m A:12.72m (Mean 12.72m) 121,588MT 9,302㎡ 4,303㎡ 1,643㎡ 534㎡		半 載 (水深12mに 対し脚きり)		空 載		半 載 (水深12mに 対し脚きり)		空 載		半 載 (水深4.4mに 対し脚きり)		空 載		満 載		空 載		半 載	
喫水				F:10.90m A:10.90m (Mean 10.90m)		F:7.37m A:7.97m (Mean 7.67m)		F:10.90m A:10.90m (Mean 10.90m)		F:5.41m A:7.59m (Mean 6.50m)		F:12.72m A:12.72m (Mean 12.72m)		F:7.43m A:8.26m (Mean 7.80m)		F:16.30m A:16.30m (Mean 16.30m)		F:7.15m A:7.43m (Mean 7.29m)		F:10.50m A:10.50m (Mean 10.50m)	
排水量				59,701MT		44,081MT		64,062MT		54,007MT		110,526MT		80,086MT		181,034MT		30,019MT		44,355MT	
投 影 面 積	側面受風面積			6,984㎡		3,037㎡		2,329㎡		4,212㎡		2,776㎡		5,916㎡		3,572㎡		3,178㎡		2,599㎡	
	側面流圧面積			2,776㎡		1,680㎡		2,398㎡		4,484㎡		2,920㎡		2,139㎡		4,483㎡		1,291㎡		1,869㎡	
正面受風面積		1,028㎡		751㎡		656㎡		1,086㎡		820㎡		1,308㎡		930㎡		855㎡		747㎡			
正面流圧面積		348㎡		256㎡		351㎡		279㎡		545㎡		386㎡		764㎡		228㎡		336㎡			

表-3.4 モデル船のスピードテーブル

エンジン オーダー	コンテナ船			RORO船			貨物船A			貨物船B			貨物船C			タンカー		
	機関 回転数 (RPM)	速力 (kt)		機関 回転数 (RPM)	速力 (kt)		機関 回転数 (RPM)	速力 (kt)		機関 回転数 (RPM)	速力 (kt)		機関 回転数 (RPM)	速力 (kt)		機関 回転数 (RPM)	速力 (kt)	
		空 載	半 載		空 載	半 載		空 載	半 載		空 載	半 載		空 載	満 載		空 載	半 載
Full Sea Ahead	100		25	91.7		20.3	123	15.9	15.4	94	15.7	15.3	72.3	14.5	14	82.7	15.1	14.1
Full Ahead	65		16.6	55		12	83	11.2	10.7	65	11.8	11.2	58	11.8	11.4	65	11.8	11.1
Half Ahead	50		12.8	48		10.5	70	9.4	9	50	9.3	8.7	50	10.1	9.9	45	8.2	7.8
Slow Ahead	35		9	40		8.5	58	7.7	7.4	42	7.7	7.3	35	7	7	34	6.2	6
Dead Slow Ahead	25		6.4	25		5.5	39	5.3	5	35	6.3	5.7	27	5.4	5.4	26	4.8	4.6
STOP	0		0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dead Slow Astern	-25		-3.8	-25		-3.3	-39	-3.2	-3	-35	-4.4	-4	-27	-3.2	-3.2	-26	-1.9	-1.8
Slow Astern	-35		-5.4	-40		-5.1	-58	-4.6	-4.4	-42	-5.4	-5.1	-35	-4.2	-4.2	-34	-2.5	-2.4
Half Astern	-50		-7.7	-48		-6.3	-70	-5.6	-5.4	-50	-6.5	-6.1	-50	-6.1	-5.9	-45	-3.3	-3.1
Full Astern	-65		-10	-55		-7.2	-83	-6.7	-6.4	-65	-8.3	-7.8	-58	-7.1	-6.8	-65	-4.7	-4.5

表-3.5 バウスラスターの推力の設定

	コンテナ船	RORO船
Full (100%)	24tf	24.5tf
Half (75%)	18tf	18.3tf
Slow (50%)	12tf	12.2tf
Dead Slow (25%)	6tf	6.1tf

表-3.6 シミュレーションケース（入船自力離棧）

検証項目	入 出 港	着 棧 舷	ケース No.	対象船舶	総トン数	載貨重量 トン数	全長	型幅	載荷状態	喫水F	喫水A	喫水 平均	排水量	バウスター (Full)	タグボート	航路泊地 水深	風
自力離棧の検証 (バウスターあり)	離 棧 出 港	入 船 左 舷 着 け	A1	コンテナ船	93,496GT	110,000DWT	352.3m	42.8m	半載(水深14mに 対し脚きり)	12.72m	12.72m	12.72m	121,588MT	24.0tf		14.00m	向岸風5m/sec
			A2	RORO船	75,251GT	43,878DWT	265.0m	32.3m	半載(水深12mに 対し脚きり)	10.90m	10.90m	10.90m	59,701MT	24.5tf		12.00m	向岸風5m/sec
B1			貨物船A	36,551GT	70,257DWT	225.0m	32.3m	空載	7.37m	7.97m	7.67m	44,081MT		12.00m		向岸風5m/sec	
								半載(水深12mに 対し脚きり)	10.90m	10.90m	10.90m	64,062MT					
自力離棧の検証 (バウスター無し)			B2	貨物船B	60,873GT	97,114DWT	239.9m	43.0m	空載	5.41m	7.59m	6.50m	54,007MT			14.00m	向岸風5m/sec
									半載(水深14mに 対し脚きり)	12.72m	12.72m	12.72m	110,526MT				
			B3	貨物船C	84,022GT	159,000DWT	280.0m	47.0m	空載	7.34m	8.26m	7.80m	80,086MT			18.00m	向岸風5m/sec
									満載	16.30m	16.30m	16.30m	181,034MT				無風
									満載	16.30m	16.30m	16.30m	181,034MT				向岸風5m/sec
			B4	タンカー	28,460GT	49,780DWT	183.1m	32.2m	空載	7.15m	7.43m	7.29m	30,019MT			11.55m	向岸風5m/sec
									半載	10.50m	10.50m	10.50m	44,355MT				無風
									半載	10.50m	10.50m	10.50m	44,355MT				向岸風5m/sec

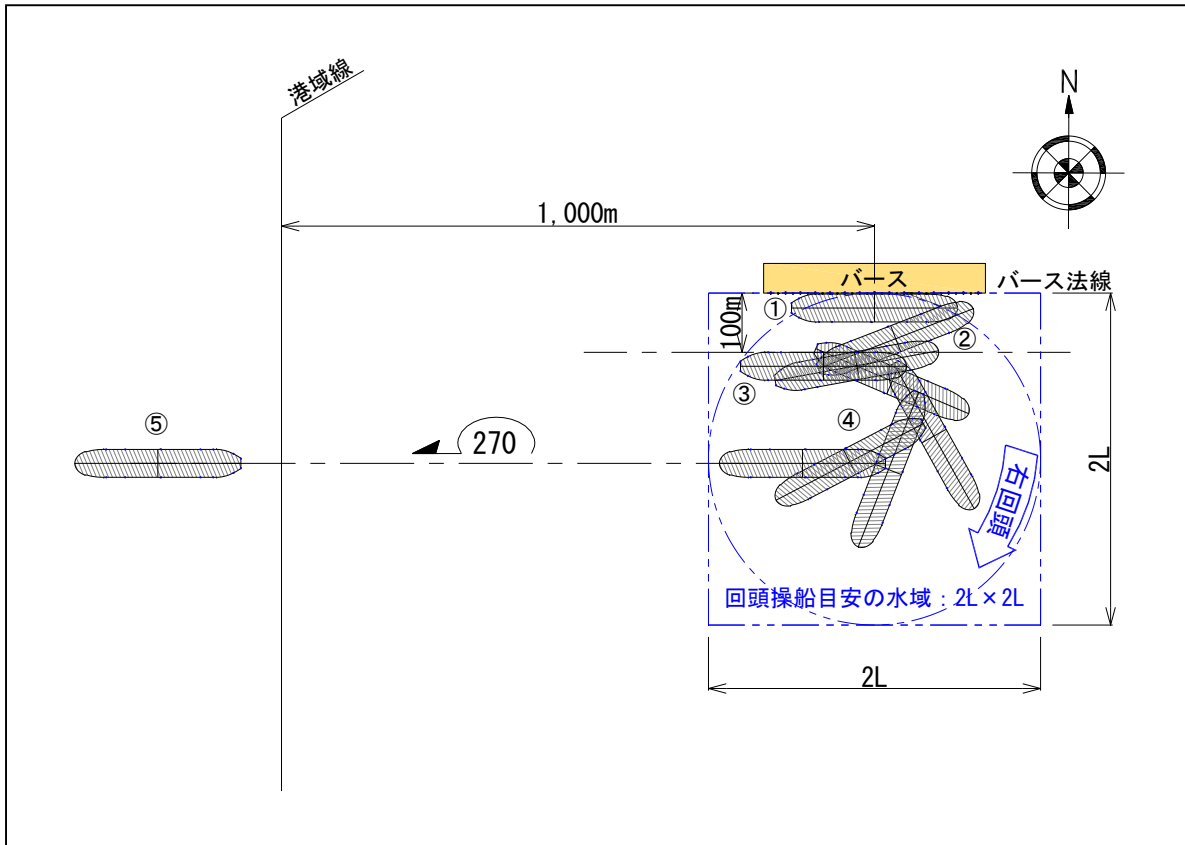


図-3.7 操船例図【入船左舷着け離棧出港操船(バウスラスターあり)】

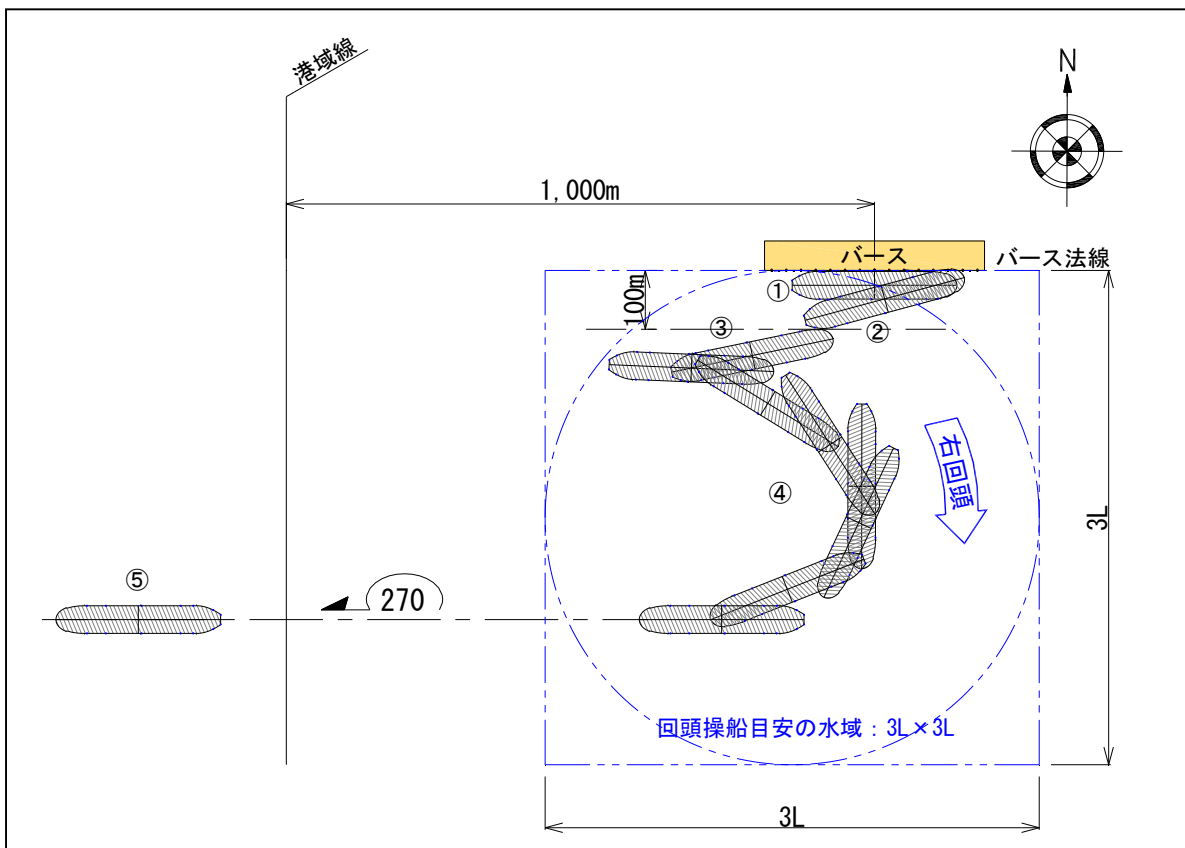


図-3.8 操船例図【入船左舷着け離棧出港操船(バウスラスター無し)】

(3) 出船着棧における水深影響の検証

船舶が入船係留する理由の一つは、積荷が多いため船舶の重量が重くまた操船性が悪いことから、その状態で回頭を行うのは非効率的であるためである。一方、船舶の喫水に対して水深が深い場合は、余裕水深が大きく浅水影響が小さくなるため、操船性が向上する。緊急避難が比較的容易な出船係留を促進する観点から、タグボートの支援により出船着棧する場合の岸壁前面泊地の水深増進効果を検証する。

検証の対象とした船舶は、入船自力離棧の検証にて最大の貨物船Cとした（表-3.3）。船速や舵の設定（表-3.4）、錨、波及び潮流を設定しない設定は上記と同様である。積載条件と風速条件は満載、向岸風風速 5m/sec の場合とした。タグボートは 3,600 馬力×3 隻とし、それらの曳引力は表-3.7 のとおりとした。

シミュレーションケースについて表-3.8に示す。操船水域及び開始から終了までの船舶動静例は図-3.9に示すとおりである。

表-3.7 タグボートの曳引力の設定

	3,600馬力	
	押 し	引 き
Full (100%)	43.2tf	34.5tf
Half (75%)	32.4tf	25.9tf
Slow (50%)	21.6tf	17.2tf
Dead Slow (25%)	10.8tf	8.6tf

※ 推進効率の低下について、「押し」はZペラ換算率を考慮した最大曳引力(1.5tf/100PS)の0.8倍、「引き」は「押し」の0.8倍(最大発生曳引力の0.64倍)とした。

表-3.8 シミュレーションケース（出船着棧）

検証項目	入出港	着棧舷	ケースNo.	対象船舶	総トン数	載貨重量トン数	全長	型幅	載荷状態	喫水F	喫水A	喫水平均	排水量	ハウスター(Full)	タグボート	航路泊地水深	風
出船着棧における水深影響の検証	入港着棧	出船左舷着け	-1	貨物船C	84,022GT	159,000DWT	280.0m	47.0m	満載	16.30m	16.30m	16.30m	181,034MT		3,600馬力×3隻	18.00m	向岸風5m/sec
			-2												3,600馬力×3隻	20.00m	
			-3												3,600馬力×3隻	22.00m	

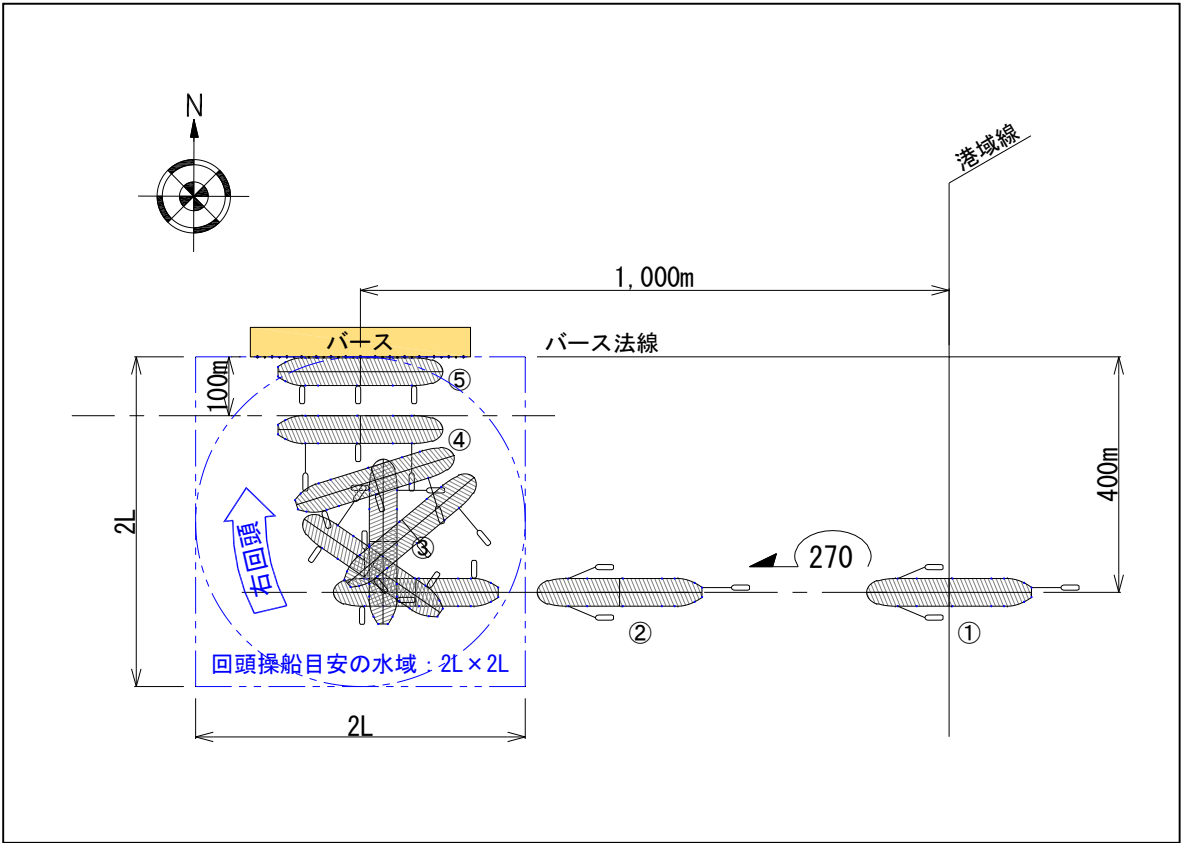


図-3.9 操船例図【出船左舷着け入港着棧操船】

3.3 入船自力離棧の検証結果

自力離棧の検証として、操船シミュレーション制御量及び船舶の状態量を表-3.9、所要時間を図-3.10に示す。

全てのケースで、船首スプリングラインを利用したキック操船により船尾を20度程度振り出すという操船により、自力離棧することは可能であった。

実験開始から後進操船を開始してスプリングラインを取り込むまで（離棧開始～離棧終了）の時間は、4.5～13分程度であった。相対的に大きな船舶が時間を要した。風の条件別で見ると、無風よりも向岸風5m/secの方が時間を要した。

離棧開始から180度回頭するまでの操船水域の広さは、横距離462～835m、縦距離511～888mであり、L換算すると横距離1.78～4.56L、縦距離1.64～3.34Lであった。

バウスラウター装備船は2L×2L、バウスラスターを装備しない船舶は3L×3Lの泊地水域内で180度回頭することを念頭に操船を行ったため、B2-1及びB3-3以外のケースでは、回頭操船中に一旦、機関後進により減速し回頭位置を調整した。B1-2は3L×3Lの水域内での回頭が困難と判断されたため、300m程度後進した後、切り返して出港針路に向首した。

離棧開始から180度回頭するまでの所要時間は23～53分であり、相対的に大きな船舶が時間を要した。各ケースとも空載よりも半載（満載）の方が時間を要した。排水量の差と浅水影響による操船性の違いと思われる。また、風の条件別で見ると、無風よりも向岸風5m/secの方が時間を要した。

離棧開始から港域線を船尾が通過するまでの所要時間は、28.6～60.9分であった。泊地規模が3Lの範囲を超えたケースもあるが、全てのケースで予定していたシミュレーションの終了までの操船が実施可能であった。ただし操船者は、コンテナ船及び貨物船Cについて向岸風の中では、船尾を振り出した後の後進中に船尾が風下に落とされて岸壁に近づくことからリスクが大きく、実際には自力離棧は困難であると判定した。

また、今回の評価結果の緊急避難への適用については以下も認識しておく必要がある。

- ・自力離棧そのものが可能であっても、地震発生後離棧を開始するまでの時間、航行開始後港外到達するまでの時間を勘案すると、条件によっては押し波が来襲するまでに避難できないことも想定する必要がある。
- ・元々今回の対象船舶は通常はタグボートの支援を受けているので、回頭泊地の計画では泊地は回頭円2Lで計画されているため、回頭円3Lの規模の泊地が確保できるかが必要条件となる。

なお、本検証において船舶が要した水域規模が3Lを超えたケースもあるが、以下からこのことが現行基準が不適であることを意味するものではない。

- ・検証対象とした船舶は通常自力離棧を行っていない規模の船舶である。
- ・操船シミュレーションはなるべく速やかに避難するという操船条件のもと一度限りで行っており、同じ条件で再度回頭すれば、3Lで回頭できる可能性がある。

		A1	A2	B1-1	B1-2	B2-1	B2-2	B3-1	B3-2	B3-3	B4-1	B4-2	B4-3
船種		コンテナ船	RORO船	貨物船A		貨物船B		貨物船C			タンカー		
載貨状態		半載	半載	空載	半載	空載	半載	空載		満載	空載		半載
風		向岸風 5m/sec	向岸風 5m/sec	向岸風 5m/sec	向岸風 5m/sec	向岸風 5m/sec	向岸風 5m/sec	向岸風 5m/sec	無風	向岸風 5m/sec	向岸風 5m/sec	無風	向岸風 5m/sec
舵使用時間割合	15度未満	6.3%	15.2%	2.3%	7.7%	1.2%	2.5%	5.2%	9.4%	6.7%	7.9%	7.5%	9.5%
	15度以上	62.7%	58.7%	57.1%	57.2%	66.4%	62.6%	60.8%	58.2%	75.3%	54.3%	52.5%	54.1%
最大機関出力	前進	Slow	Half	Half	Half	Half	Half	Slow	Slow	Slow	Half	Half	Half
	後進	Slow	Slow	Slow	Slow	Slow	Slow	Slow	Slow	Slow	Slow	Slow	Slow
スラスタ 使用時間割合	Full	45.8%	55.5%										
	Half	0.0%	0.0%										
	Slow	0.0%	0.6%										
	Dead Slow	0.0%	0.0%										
離棧から180度 回頭するまでの 操船水域	横距離	629m (1.78L)	623m (2.35L)	571m (2.53L)	703m (3.12L)	496m (2.06L)	462m (1.92L)	683m (2.43L)	623m (2.22L)	644m (2.30L)	835m (4.56L)	493m (2.69L)	489m (2.67L)
	縦距離	578m (1.64L)	511m (1.92L)	627m (2.78L)	640m (2.84L)	739m (3.08L)	655m (2.73L)	703m (2.51L)	888m (3.17L)	776m (2.77L)	582m (3.17L)	612m (3.34L)	606m (3.31L)
回頭操船中における バースとの最接近距離		70m	40m	60m	100m	40m	60m	20m	130m	20m	20m	40m	20m
所要時間	離棧開始～離棧終了	9.0分	6.5分	5.5分	6.5分	5.0分	7.0分	13.0分	8.0分	10.0分	5.5分	4.5分	5.5分
	離棧開始～180度回頭終了	32.0分	35.0分	25.0分	40.0分	25.0分	40.0分	45.0分	41.0分	51.0分	26.0分	23.0分	31.0分
	離棧開始～港域線通過	38.8分	41.5分	31.0分	47.2分	32.0分	50.6分	55.2分	50.9分	60.9分	29.9分	28.6分	37.6分

表-3.9 制御量及び状態量の一覧（入船自力離棧）

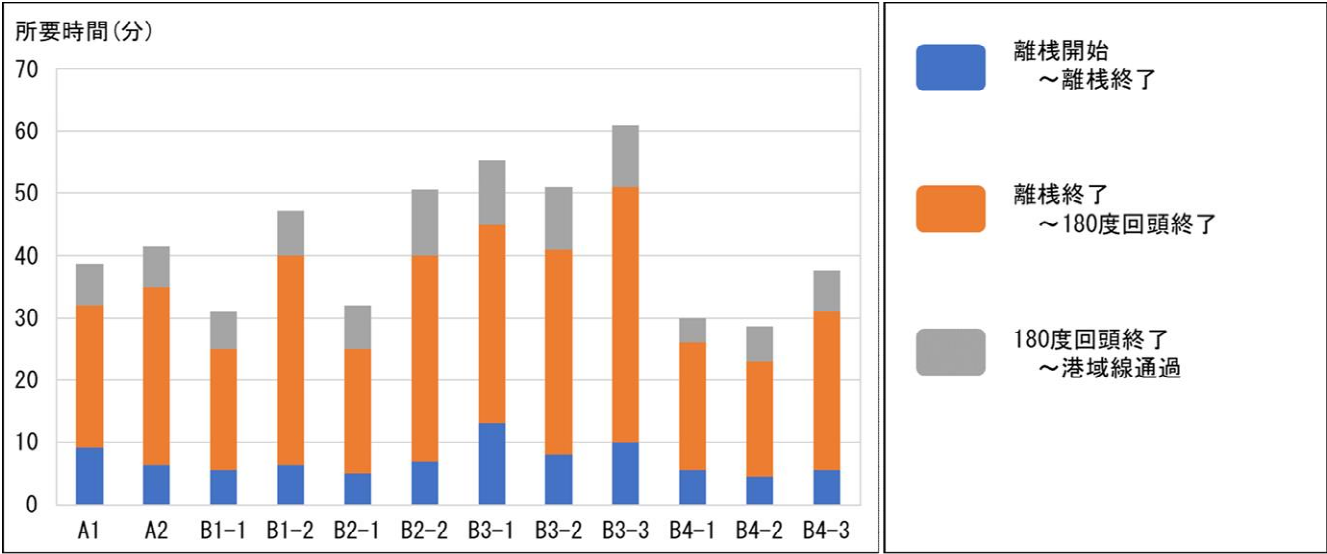


図-3.10 所要時間（入船自力離棧）

3.4 出船着栈における水深影響の検証結果

出船着栈における水深影響の検証として、操船シミュレーション制御量及び船舶の状態量を表-3.10、所要時間を図-3.11に示す。

回頭水域までに至るアプローチ操船局面の舵については、全てのケースで左舷横方向からの風速 5m/sec の向岸風による船首の風上への切り上がりに抗するため右舵角一杯（35度）により保針制御し、対象バース前面水域に進入している。アプローチ操船局面における定常舵角 15 度以上の使用時間割合は H/d の小さいケース C-1 が最も高く 20.0%であり、H/d が大きくなるにつれ低くなっている。

速力については、全てのケースで実験開始後、すぐに機関 Stop とするとともに、タグボート 3 隻を後方引きに使用して速力を徐々に低減した。ケース毎の顕著な違いは無かったが、ケース C-1 (H/d≒1.1) は前進行き脚を制御する際、機関 Slow Astern（後進微速）としたとともに、船尾のタグボートを後方引きに使用した。

回頭については、全てのケースでタグボート 3 隻により回頭することが可能であった。回頭開始から終了までの回頭円の直径は 315m (1.19L) ～339m (1.22L) であり、概ねその場で回頭した。回頭開始から終了までの所要時間は、11.0～14.2分であり、H/d の小さいケースほど時間を要した。

着栈操船局面の船体姿勢制御については、全てのケースでタグボート 3 隻により船体がバース法線と平行になるよう船体姿勢を制御することは可能であった。バース前面 270 ～300m 沖で概ね船体をバース法線と平行とし、横移動を開始した。回頭終了から着栈までの所要時間は、20.0～25.1分であり、H/d の小さいケースほど時間を要した。

最終横移動速力は、着栈時 7.7～9.2cm/sec であり、向岸風 5m/sec の風に抗して船首尾のタグボートを使用し、船体姿勢を制御しながら横移動速力を制御し、10cm/sec 以下にコントロールすることが可能であった。

回頭開始から着栈するまでの操船水域の広さは、横距離 327m (1.17L) ～373m (1.34L)、縦距離 466m (1.67L) ～487m (1.74L) であった。

実験開始から着栈するまでの所要時間は、48.2～56.0 分であり、H/d の小さいケースほど時間を要した。ただし、ケース C-1 とケース C-2 の所要時間の差は 6.5 分なのに対して、ケース C-2 とケース C-3 の所要時間の差は 1.3 分と大きな差はなかった。

ケース C-1 とケース C-2 における制動力の比較を表-3.11に示す。アプローチ操船局面及び回頭操船局面における力積【(本船後進推力+タグボート推力)×時間】は H/d の小さいケース C-1 の方が大きかったにも関わらず所要時間はケース C-1 の方が大きくなり浅水影響により減速、回頭が

しづらかったものと考えられる。

着栈操船局面における力積は横移動及び横移動制御ともにケース C-2 の方が大きく、強い力で押しさらに強い力で引いていた。所要時間はケース C-1 の方が 4.6 分長くなっている。要因として着栈の際には岸壁への衝突を避けるため特に慎重な操船が必要であるが、浅水影響が大きければ船が止まりにくいことから、ケース C-1 の方が相対的に小さい力とせざるを得なかったものと考えられる。

操船者の意見を以下に示す。

- ・アプローチ操船局面の最後期において、ケース C-1 では残速を低減するため主機を Dead Slow Astern（後進極微速）、さらに回頭開始直後には Slow Astern を要したのに対し、ケース C-2 では回頭開始準備のためのタグボート後方引き解除に伴う制動力減少を補うための短時間の主機 Dead Slow Astern のみで足りたこと、回頭及び着栈操船局面においてもケース C-1 では移動速度が上がりすぎると浅水影響により船体のコントロールがしにくいという意識があったため操船支援力を使用しなかったことも加わりケース C-2 に比して所要時間が長くなった。以上から、ケース C-1 とケース C-2 では操船性に明らかな違いがあるように感じた。
- ・ケース C-2 とケース C-3 では優位な差は感じなかった。
- ・いずれのケースにおいても操船上の不安は無かったが、満載状態での回頭操船及びその後の着栈操船に要する時間が長いという印象を強く感じた。

以上により水深を増進する効果について、以下のように考察される。

第一に、出船での着栈に要する所要時間を短縮できる。今回の貨物船の場合、1.2d より大きな水深とすれば 5 分所要時間を短縮できた。

第二に、水深が 1.1d の場合、浅水影響が大きく操船性が低い船体のコントロールがしにくく、出力を上げて船速が一旦上がった場合に減速が行いづらく、注意深く速度をコントロール必要がある。他方 1.2d より大きな水深がある場合には浅水影響が小さくなり操船性が上がるため、出力を柔軟にコントロールできる。船舶が輻輳している場合など急ぐ必要がある場合には出力を上げて所要時間を短縮する対応が可能となる一方、急ぐ必要がない場合にはゆっくり回頭することで必要以上の出力の利用を避けることもできる。

表-3.10 制御量及び状態量の一覧（出船着栈）

			C-1	C-2	C-3	
船種/載貨状態/風			貨物船C/満載/向岸風5m/sec			
水深			18.0m(H/d≒1.1)	20.0m(H/d≒1.2)	22.0m(H/d≒1.3)	
アプローチ 操船局面	所要時間		16.7分	16.0分	17.2分	
	舵使用時間割合	15度未満	0.7%	0.6%	0.5%	
		15度以上	20.0%	14.2%	11.3%	
	最大機関出力	前進	Dead Slow	Dead Slow	Dead Slow	
		後進	Dead Slow	Dead Slow	Slow	
	タグポート 使用時間 割合	No.1 タグポート	Full	0.0%	0.0%	0.0%
			Half	0.0%	0.0%	0.0%
			Slow	28.8%	29.6%	25.1%
			Dead Slow	19.9%	21.9%	42.7%
		No.2 タグポート	Full	0.0%	0.0%	0.0%
			Half	0.0%	0.0%	0.0%
			Slow	28.6%	39.9%	24.5%
			Dead Slow	19.8%	21.9%	42.7%
		No.3 タグポート	Full	0.0%	0.0%	0.0%
			Half	0.0%	0.0%	0.0%
Slow			28.2%	34.6%	17.5%	
Dead Slow			19.7%	22.9%	49.8%	
回頭 操船局面	所要時間		14.2分	13.0分	11.0分	
	舵使用時間割合		使用せず	使用せず	使用せず	
	最大機関出力	前進	Slow	使用せず	使用せず	
		後進	Slow	Slow	Slow	
	回頭円の直径		331m(1.19L) 右回頭	339m(1.22L) 右回頭	315m(1.13L) 右回頭	
	タグポート 使用時間 割合	No.1 タグポート	Full	0.0%	0.0%	0.0%
			Half	54.8%	73.7%	76.1%
			Slow	8.1%	19.2%	7.0%
			Dead Slow	29.3%	1.2%	0.2%
		No.2 タグポート	Full	0.0%	0.0%	0.0%
			Half	66.0%	62.9%	68.3%
			Slow	8.6%	14.8%	6.2%
			Dead Slow	2.7%	0.0%	0.0%
		No.3 タグポート	Full	0.0%	0.0%	0.0%
			Half	91.0%	86.1%	92.5%
Slow			9.0%	12.5%	2.7%	
Dead Slow			0.0%	0.0%	4.7%	
着棧 操船局面	所要時間		25.1分	20.5分	20.0分	
	舵使用時間割合		使用せず	使用せず	使用せず	
	最大機関出力	前進	Slow	Dead Slow	Slow	
		後進	Dead Slow	Dead Slow	Dead Slow	
	タグポート 使用時間 割合	No.1 タグポート	Full	9.6%	31.4%	27.6%
			Half	27.3%	36.3%	20.1%
			Slow	3.8%	7.2%	9.1%
			Dead Slow	4.4%	6.3%	9.2%
		No.2 タグポート	Full	0.0%	0.0%	0.0%
			Half	55.1%	66.1%	54.4%
			Slow	0.0%	0.0%	0.3%
			Dead Slow	11.8%	8.0%	6.2%
		No.3 タグポート	Full	0.0%	2.1%	5.6%
			Half	7.8%	52.7%	19.9%
			Slow	30.8%	11.4%	30.1%
			Dead Slow	19.7%	9.5%	6.7%
	最終着棧速度		船首側 7.7cm/sec	9.2cm/sec	8.0cm/sec	
			船尾側 8.3cm/sec	8.3cm/sec	9.0cm/sec	
	回頭開始から着棧 するまでの操船水域		横距離	327m(1.17L)	373m(1.34L)	330m(1.18L)
縦距離			487m(1.74L)	486m(1.74L)	466m(1.67L)	
全体所要時間			56.0分	49.5分	48.2分	

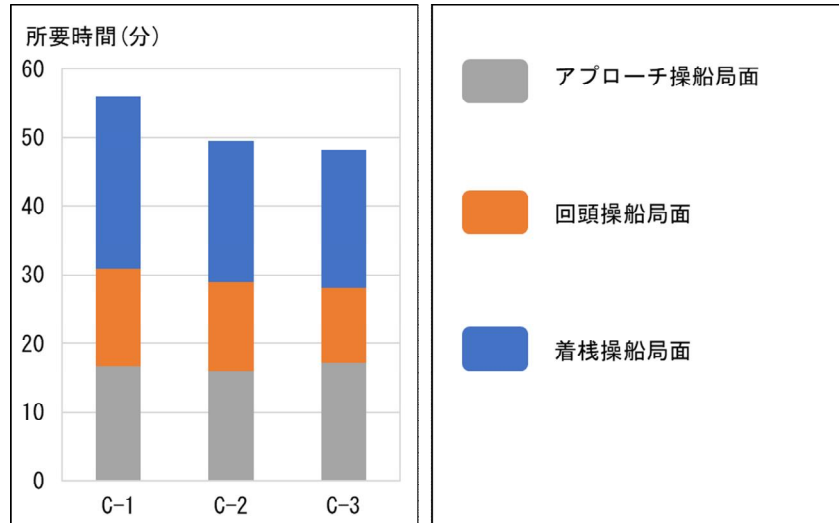


図-3.11 所要時間（出船着岸）

表-3.11 C-1 と C-2 における制動力の比較

			C-1	C-2	備考
水深			18m (H/d≒1.1)	20m (H/d≒1.2)	
ア プ ロ ー チ 操 船 局 面	所要時間		16.7分	16.0分	C-1の方が時間を要した。
	力積	本船後進	7,099tf・s	2,629tf・s	No.1～No.3タグボートの各力積(後方引きの推力×時間)はC-2の方が大きかったものの、主機による力積(後進推力×時間)はC-1の方が2.7倍大きく、ア プ ロ ー チ 操 船 局 面 全 体 に お い て、前進行き脚を制御する際の力積の合計はC-1の方が大きかった。
		No.1タグポート	6,693tf・s	6,730tf・s	
		No.2タグポート	6,694tf・s	8,445tf・s	
		No.3タグポート	6,772tf・s	7,782tf・s	
		合計	27,258tf・s	25,586tf・s	
回 頭 操 船 局 面	所要時間		14.2分	13.0分	C-1の方が時間を要した。
	力積	No.1タグポート	15,259tf・s	17,303tf・s	タグポート3隻で押し引きしたが、回頭開始から終了までの各タグボートの力積を見ると、No.1タグポート(右舷船首：右舷方向引き)はC-2の方が大きかったものの、No.2タグポート(左舷船首：右舷方向押し)及びNo.3タグポート(船尾：左舷方向引き)はC-1の方が大きく回頭操船局面全体において、本船を180度回頭させる際の力積の合計はC-1の方が大きかった。
		No.2タグポート	19,170tf・s	17,868tf・s	
		No.3タグポート	20,802tf・s	18,316tf・s	
		合計	55,231tf・s	53,487tf・s	
		合計	55,231tf・s	53,487tf・s	
着 岸 操 船 局 面	所要時間		25.1分	20.5分	C-1の方が時間を要した。
	力積	No.1タグポート	20,987tf・s	29,862tf・s	回頭終了後、270～280m程度横移動した際、タグポート3隻を押しに使用したが、No.2タグポートを除くNo.1タグポート及びNo.3タグボートの力積はC-2の方が大きく、横移動(左舷方向押し)の力積の合計はC-2の方が大きかった。また、バースに接近した際、向岸風に抗して横移動速力を制御するため、No.1タグポート及びNo.3タグポートを右舷方向引きに使用したが、その際の力積の合計もC-2の方が大きかった。
		【横移動】No.2タグポート	28,807tf・s	27,402tf・s	
		No.3タグポート	16,156tf・s	21,867tf・s	
		合計	65,950tf・s	79,131tf・s	
	力積	No.1タグポート	1,047tf・s	3,272tf・s	
		【横移動制御】No.2タグポート	—	—	
		No.3タグポート	2,397tf・s	3,620tf・s	
		合計	3,444tf・s	6,892tf・s	
全 体	所要時間		56.0分	49.5分	C-1の方が時間を要した。
	力積	本船後進	7,099tf・s	2,629tf・s	
		No.1タグポート	43,986tf・s	57,167tf・s	
		No.2タグポート	54,671tf・s	53,715tf・s	
		No.3タグポート	46,127tf・s	51,585tf・s	
		合計	151,883tf・s	165,096tf・s	

※ 力積(推力×時間=FΔt)

4. 東日本大震災時の船舶が緊急避難する際の港湾内船速に関する分析

4.1 分析の方法

東日本大震災発生後に、各港湾で緊急避難を試みた船舶があり、この際の船舶行動ならびに港湾利用状況について、AISデータにより各船舶の動静を詳細に追うことで分析した。対象港は、掘り込み港の苫小牧港（西港区）、鹿島港、埋め立てにより整備された川崎港であり、いずれの港も岸壁から港外まで一定の距離があり、東日本大震災発生後は大津波警報または津波警報が発令され、津波が観測されたほか多くの船舶が避難した港である。なお、東日本大震災発生時直後の停電により、仙台塩釜港（仙台区）等の震源に近い港湾でのデータは分析対象外とした。

AISデータによる分析では以下に留意が必要である。第一にAISの搭載義務は一定規模以上の船舶のみにあるため、小型の船舶は捕捉されない場合が多い。ただし小型船は水深等の港湾内での航行に関する制約は少なく航路外の航行が可能であり、比較的緊急避難は容易かつ本分析の対象とした船舶への影響は限定的であったと推察される。第二にタグボート等が捕捉されている例があるが、全数とは限らない。第三にAISデータの捕捉は受信状況にもよるため、全ての船舶の航跡が得られるわけではなく、以下は取得できた情報に基づく分析結果である。

各港、地震発生後の主要航路外側の防波堤先端付近通過を港外到達とし、その順にグループ分けした。なお、タグボート等の小型の船舶は、通常の避難している船舶と動静が異なるため別のグループとした。タグボートの支援の有無並びに船舶の係留形態（出船係留、入船係留）と港外到達時刻との関係性を分析した。

4.2 各港の概要

(1) 苫小牧港

苫小牧港では、当初津波注意報が発令（14:49）されたのち、津波警報（15:14）、大津波警報（15:30）に変更された。図-4.1に津波の影響による潮位変動を示す。16時過ぎに最初の押し波が観測され、その後引き波 2m（17:00）、押し波 2m（17:30）と来襲を受けている。図-4.2に地震発生時（14:46）の船舶分布状況、図-4.3に港外到達時刻を示す。地震発生時には 21 隻の船舶が港湾内に停泊しておりうち 20 隻が港外に避難した。掘り込み港のため港外に出る航路は一つである。

港外到達 1～5 隻目の船舶（第 1 グループ）の避難航行開始は津波警報発令（15:14）前後である。全長には幅があり 5 隻とも港外に近い位置から避難し船種はフェリーや危険物船であり出船自力離棧が多い。港外到達 7～12 隻目の船舶（第 2 グループ）の避難航行開始は津波警報発令（15:14）後大津波警報発令（15:30）前である。全長は比較的小型であり概ね港外に近い順に避難した。船種は危険物船と貨物船、6 隻とも出船自力離棧である。

港外到達 13～17 隻目の船舶（第 3 グループ）の離棧開始時刻は 12 隻目までと間があるが港外到達時刻は第 2 グループと間を空けていない。係留位置は港内全域であり、船種はコンテナ船や危険物船、入船自力離棧が多い。港外到達 18,19 隻目の船舶（第 4 グループ）の避難航行開始は、第一波収束（16:40 頃）後である。避難航行開始、港外到達ともに 17 隻目までとは一定の時間がある。全長は比較的大きく船種は貨物船、入船自力離棧とタグボートの支援による離棧である。19 隻目は防波堤付近で漂流したとみられる航跡となっていた。

港内に留まり続けた船舶は 1 隻あり係留を継続した。この全長は 200m、船種はチップ運搬船である。

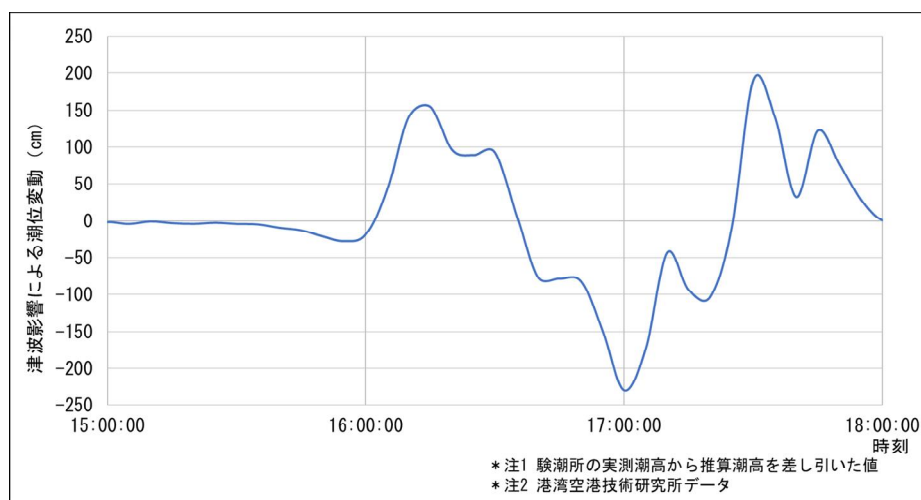


図-4.1 津波による潮位変動（苫小牧港）

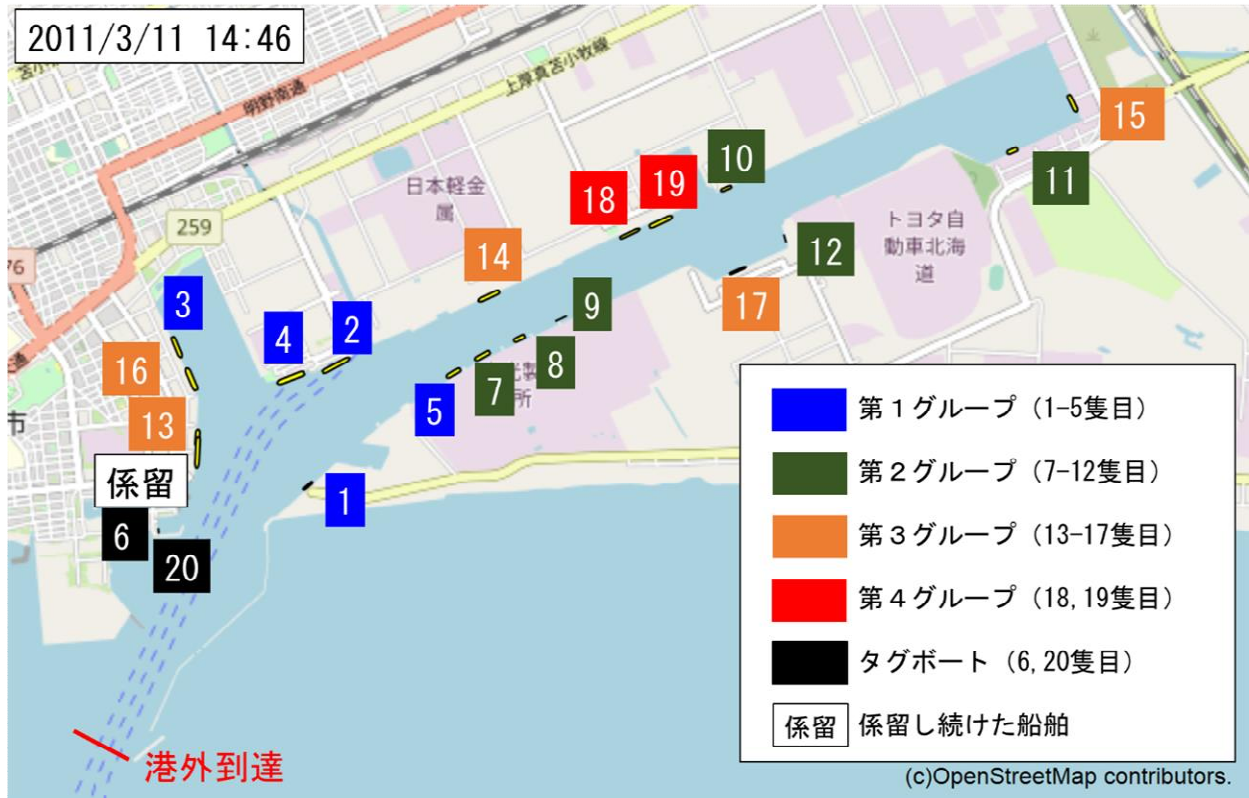


図-4.2 船舶分布（苫小牧港）

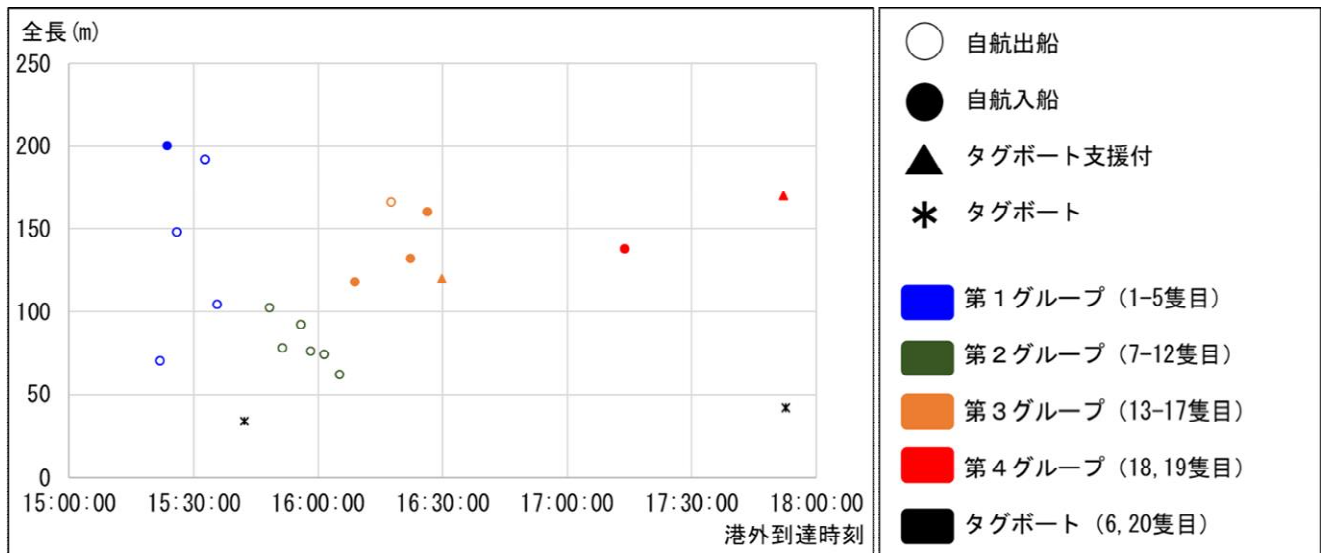


図-4.3 港外到達時刻（苫小牧港）

(2) 川崎港

川崎港では津波注意報（15:14）の後に津波警報（15:30）が発令された。図-4.4に隣接する横浜港の津波の影響による潮位変動を示す。16時過ぎに最初の押し波が観測され、その後引き波 1m（17:00）、押し波 1.5m（17:30）が観測された。図-4.5に地震発生時（14:46）の船舶分布状況、図-4.6に港外到達時刻を示す。地震発生時には36隻の船舶が港湾内におり、地震発生後港内に入港した3隻（うち1隻は着桟）を含む27隻が港外に避難した。南西、西から出た船舶は、タグボート等を除くと当初から出航予定であったとみられる船舶2隻と、津波注意報発令後直ちに避難航行開始し港外へ出た2隻である。本分析はこれら以外の南東から避難した船舶を中心に考察する。

港外到達1隻目の船舶（第1グループ）は地震発生時に港外へ向けて航行中であった船舶である。港外到達2隻目の船舶（第2グループ）は地震発生してすぐに離桟しており、当初から港外に出る予定であったとみられる。

港外到達3～9,11,12隻目の船舶（第3グループ）は津波警報発令前後に避難航行開始し、一斉に港外へ出た船舶である。船種は危険物船、出船自力離桟が多い。7,8隻目は航路内を通常時は禁止されている並列で航行していた。港外到達13,15,16,18,19隻目の船舶（第4グループ）は第一波到達以降に避難航行開始し、まばらに港外へ避難した。全長は比較的大きく、船種は危険物船が多くタグボートの支援による離桟が多い。タグボートの支援については、同一のタグボートが順番に支援しているケースもあった。

港内に留まり続けた船舶は12隻と避難した船舶の半数であった。全長にはばらつきがあり、船種は貨物船が多い。

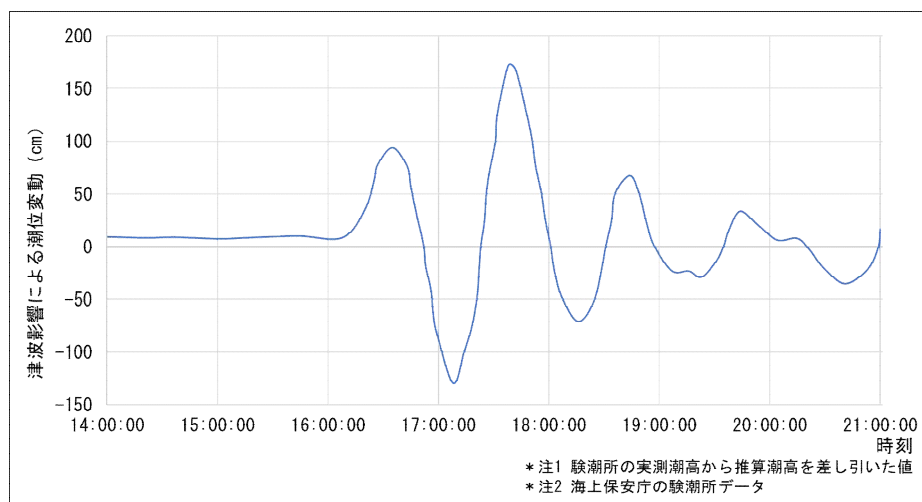


図-4.4 津波による潮位変動（横浜港）

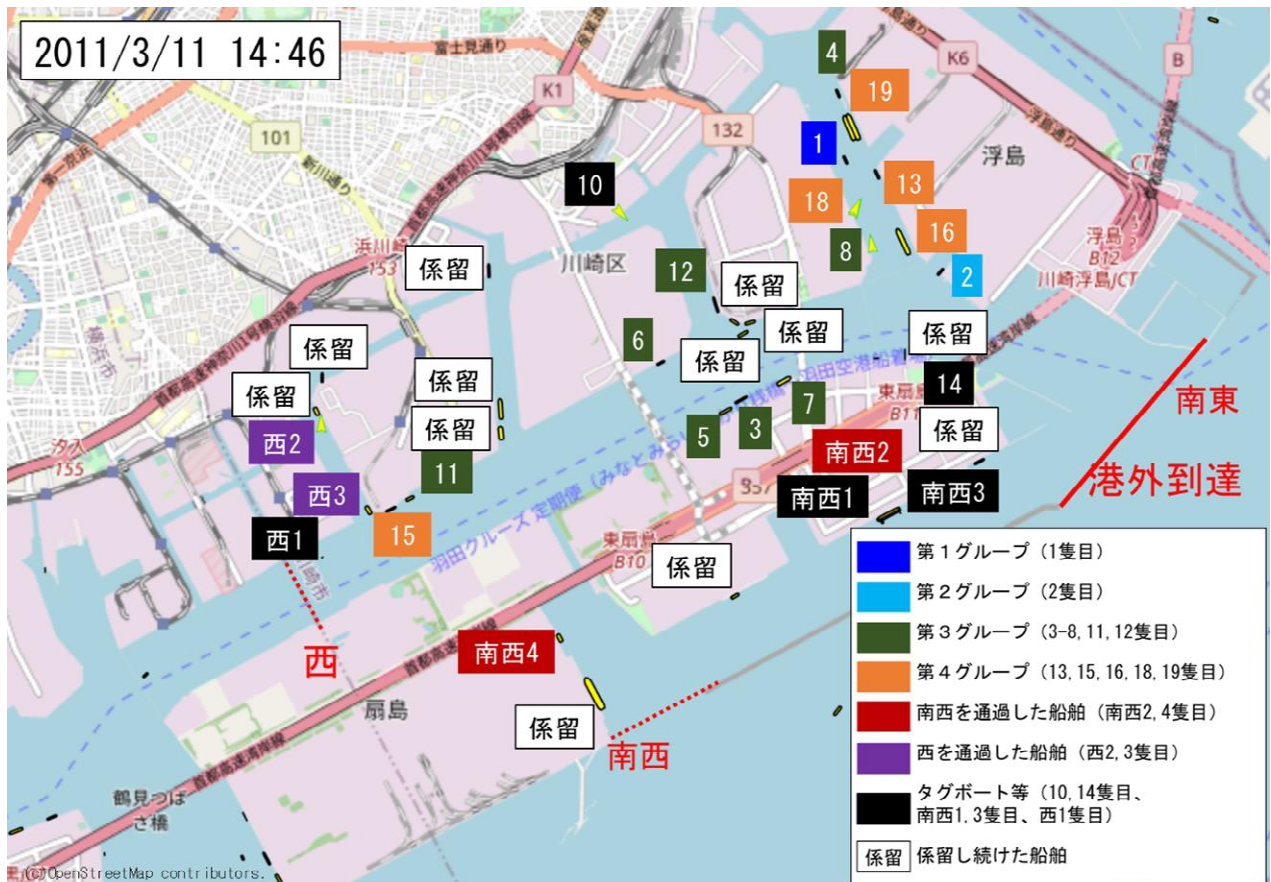


図4.5 船舶分布（川崎港）

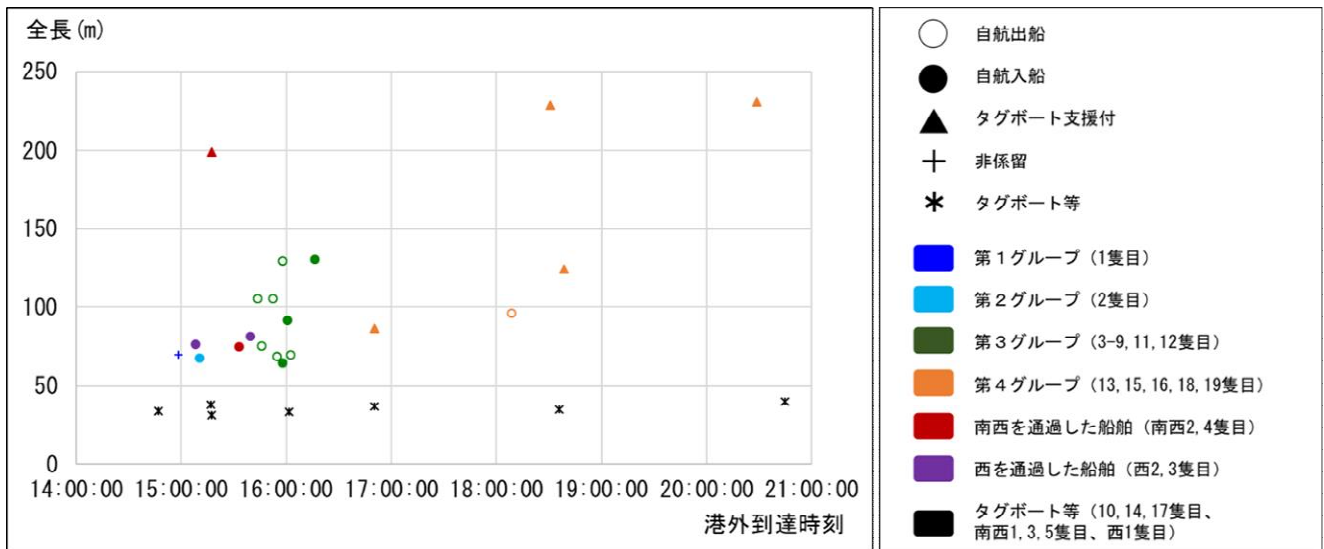


図4.6 港外到達時刻（川崎港）

(3) 鹿島港

鹿島港では津波警報（14:49）の後に大津波警報（15:14）が発令された。鹿島港は験潮記録が無いが、15:32に第一波の押し波 1.5m が観測されたほか、16:40には最大波の押し波約 3m が観測された。図-4.7に地震発生時（14:46）の船舶分布状況、図-4.8に港外到達時刻を示す。地震発生時には 36 隻の船舶が港内におり、うち 24 隻が港外避難した。掘り込み港のため港外に出る航路は一つである。

港外到達 1～3 隻目の船舶（第 1 グループ）は地震発生時に港外へ向けて航行中であつた船舶である。港外到達 4～6 隻目の船舶（第 2 グループ）は地震発生時に錨泊または港内へ向けて航行中であつた船舶であり錨泊または港内へ向けての航行を止め港外へ避難した。

港外到達 7～9 隻目（第 3 グループ）は地震発生後に岸壁から避難航行開始した船舶である。全長は比較的小型で船種は危険物船であり、出船自力離棧が多い。港外到達 10～12, 17～19 隻目の船舶（第 4 グループ）は地震発生後に岸壁から避難航行開始した船舶である。港外へ出る直前の区間で速い船速で避難しているがこれは津波到達までの時間的余裕が無かつたことによるものとみられる。

港外到達 22～24 隻目（第 5 グループ）は津波到達前の避難に失敗し港内を漂流した後、避難した船舶である。全長は大きい（187-333m）。漂流時に押し波・引き波によるものとみられる往復の航跡が確認された。

上記以外（12 隻）は港外避難を行わずうち 3 隻は係留継続した。全長は比較的小さく船種は貨物船である。他の 9 隻は航跡から津波の流れにより漂流したと判断され、これには全長 299m の大型船も含まれ船種は危険物船や貨物船である。第 5 グループと港内に留まり続けた船舶合計 15 隻については規模の大きい船舶が漂流する傾向にあった。

(4) 本節のまとめ

各港とも津波規模や到達時刻は異なるが、緊急避難開始が集中する時間帯がある。緊急避難が集中する時間帯は、通常みられない頻度で次々に船舶が港外へ出ていく特殊な状況である。比較的津波規模が小さいと予想された川崎港では係留で対応できた船舶も複数見られる。津波来襲が予想される場合、比較的規模の小さい船舶や出船係留が可能な船舶については防波堤の外に出るまでの所要時間が短く緊急避難が比較的容易であるが、比較的規模の大きい船舶や出船係留実施が難しい船舶については、防波堤の外に出るまでの所要時間が長いもしくは自力で離棧不可能で、予想される津波来襲までに防波堤の外に出られず避難途中で津波により漂流すると判断されるため、敢えて避難せず係留を強化するという対策の検討が必要と考察される。鹿島港のように津波規模が大きい場合には係留を強化しても漂流する可能性があるため、一定程度の係留強度確保に向けた対応も検討に値する。



図-4.7 船舶分布 (鹿島港)

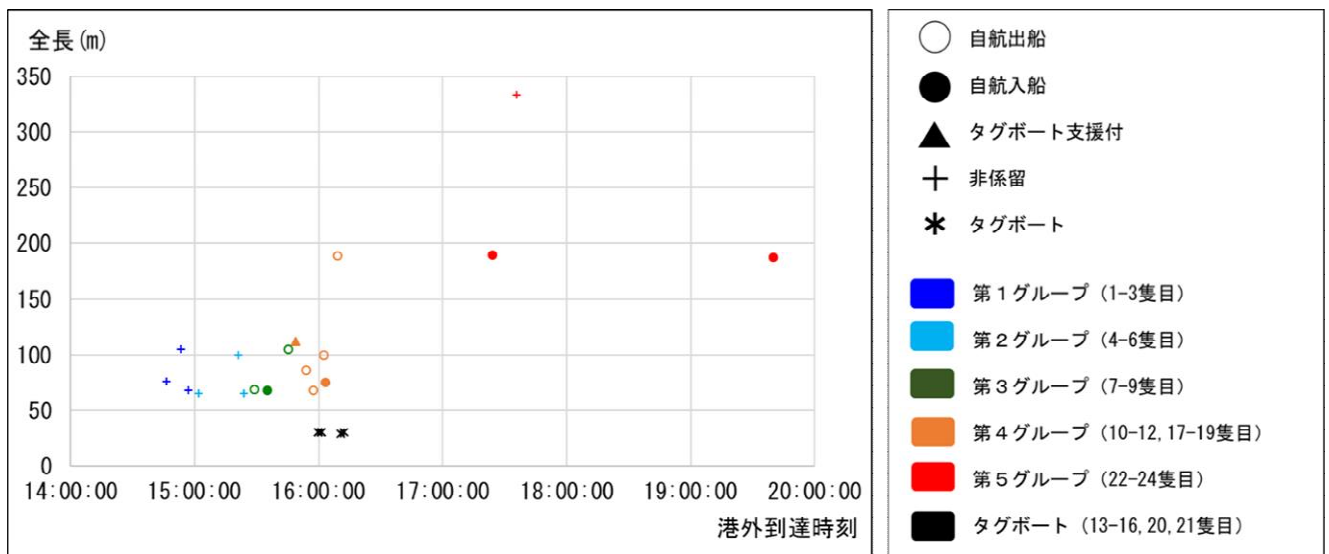


図-4.8 港外到達時刻 (鹿島港)

4.3 港湾内船速についての分析

各港で船舶が離棧・回頭してから港外まで避難するまでの船速を分析した。瞬間船速（AIS データで観測された船速）、平均船速（離棧・回頭してから港外までの航行距離と避難に要した時間による船速）を分析し、データが得られる場合は通常時の船速（東日本大震災以外の日で当該船舶が同じ係留場所から港外に出る際の船速）との比較を行っ

た。また船速の変動の要因については分析対象船舶の航跡も用いて考察した。図-4.9、図-4.10 は、苫小牧港での避難事例である。離棧後徐々に船速を上げていくが通常時と比較して避難時の船速に変動が見られ、この要因として同じように避難しようとする他船舶の存在や津波による流れの影響があるものとみられる。



図-4.9 15 隻目の航跡（苫小牧港）を用いた分析例

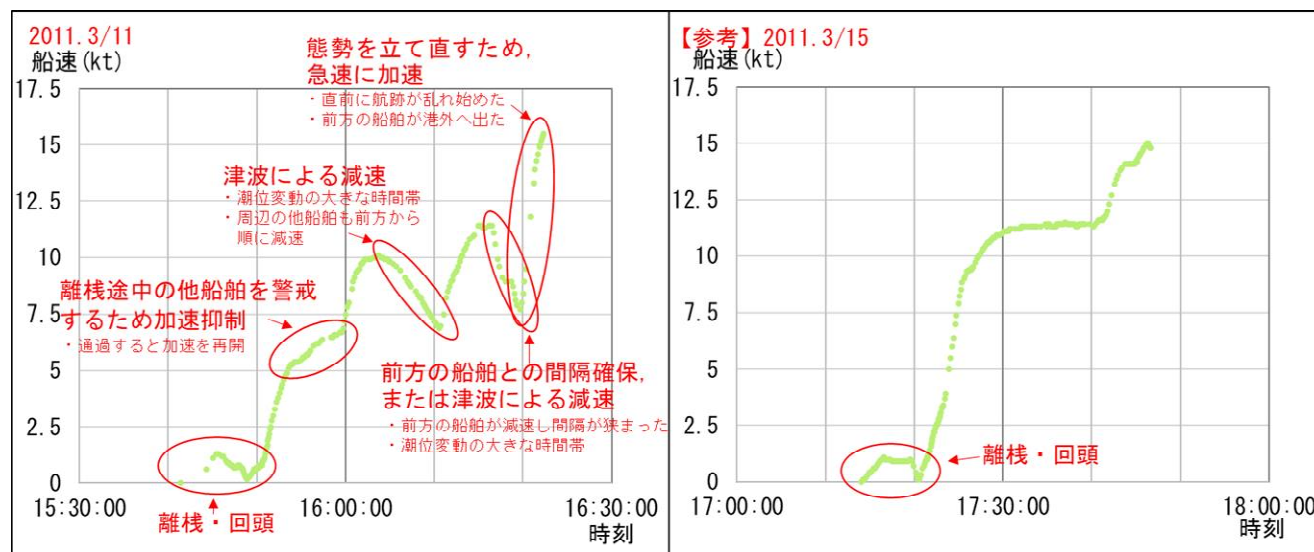


図-4.10 15 隻目の船速変動（苫小牧港）を用いた分析例

各港での時刻と離棧・回頭から港外到達までの瞬間船速の関係を図-4.11～図-4.13に示す。緊急避難における船速の全般的な傾向として、以下の点が考察される。

第一に防波堤に差し掛かった時等、潮流が変わりやすいとみられる場所で、加速を中止または減速する船舶が確認される。

第二に複数の避難船舶が見られた苫小牧港第1～3グループ、鹿島港第3、4グループ、川崎港第3グループについては、他船舶に配慮し減速する船舶が確認される。船列を形成する場合は他船舶との間隔を空けるため、減速する船舶が見られる。船列の形成後は先頭の船舶の船速と他船舶の船速は同一となる。

第三に津波によるものとみられる影響について潮位が変動した時間帯に減速する船舶が見られた。明確な理由は不明であるが、津波の影響とみられる流速内により航行に影響が及んだ場合、船速を上げることで体勢を立て直そうとしたとみられる船舶が複数見られたため、津波の影響に対応するための船速の変動もあったとみられる。

港湾別に特徴をみると、苫小牧港（図-4.11）については第2、3グループにおいて他船舶や津波によるものと思われる船速の変動が多く見られる。19隻目の船舶については

避難途中に津波により漂流したとみられる 17:20 以降変動が大きい。

川崎港（図-4.12）については第3グループにおいて船速の変動が多く見られる。第4グループについてはタグボートの支援を受ける大きな船舶が多く、それらは離棧後広い泊地に移動してから回頭したため、離棧後しばらくしてから船速が一時的に0ktとなっている。

鹿島港（図-4.13）については第4グループにおいて15:45を境に20ktを超える船舶が確認できる。15:45以前のこれらの船舶や、通常時の最高船速は、12.5kt程度であった。15:45は、第一波到達後、最大波前の引き波があった時間帯である。迅速な港湾外への避難を試みた一方避難開始できた他船舶が少なく、このような航行が可能であったためとみられる。鹿島港第5グループについて漂流時の最高船速は10kt程度、港外へ避難する際も10kt程度であった。避難時の船速が他のグループより遅い原因は津波の影響のほか、漂流物や漂流船舶がすでに存在しこれらに警戒しながら航行したためと考えられる。

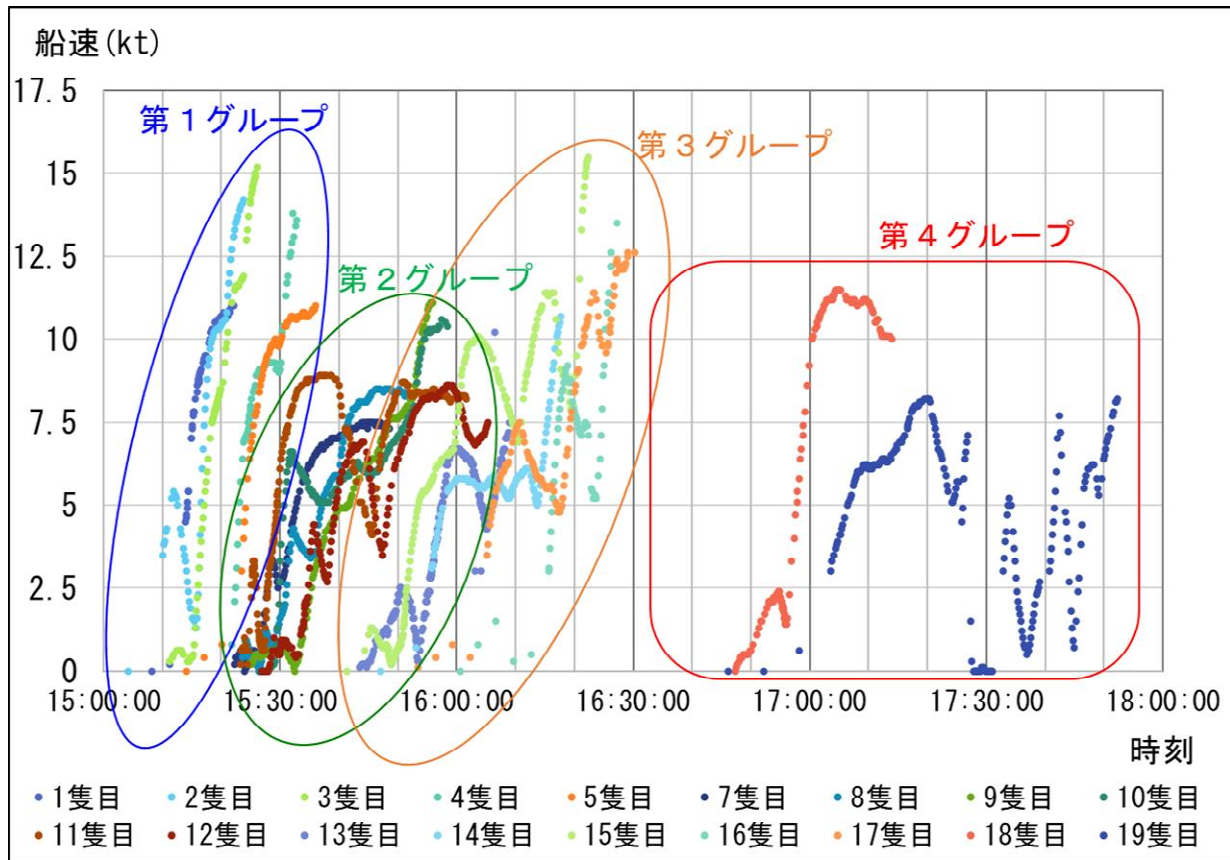


図-4.11 各船舶の船速変動（苫小牧港）

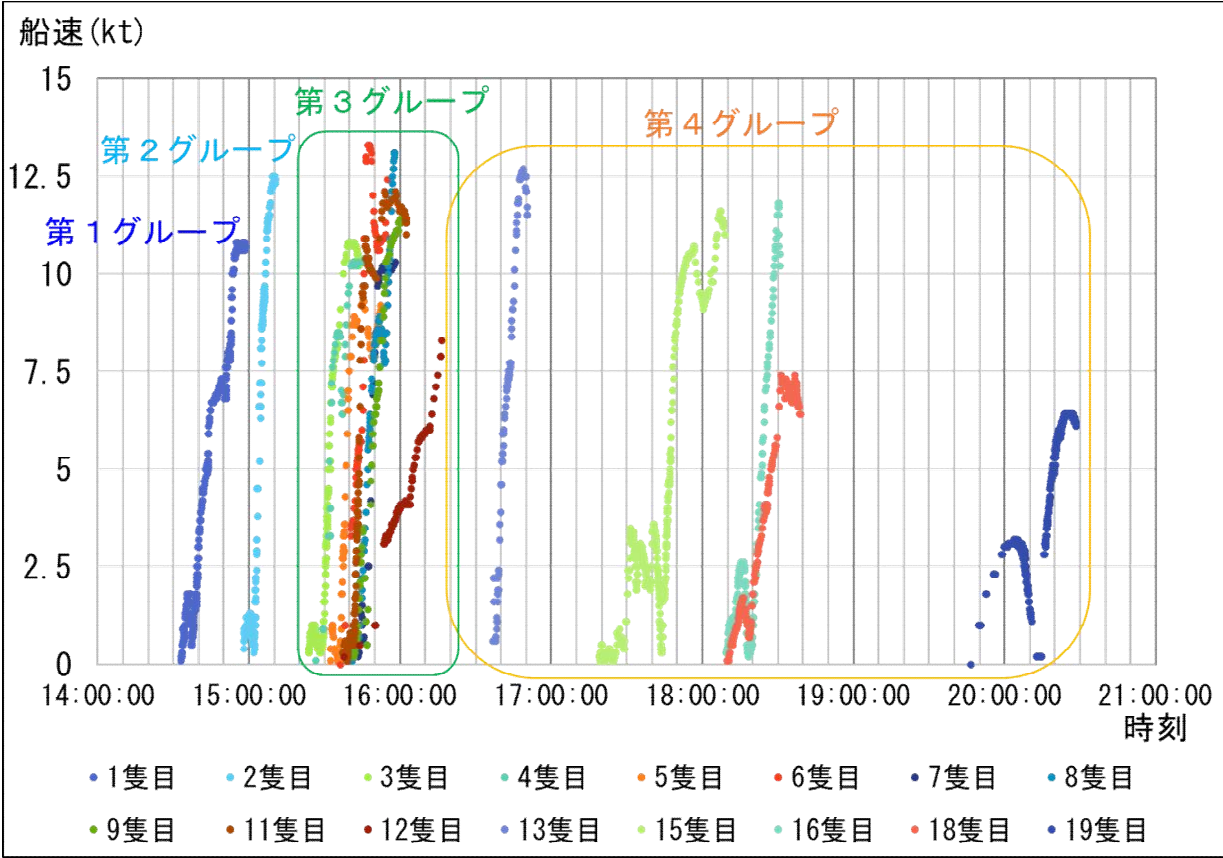


図-4.12 各船舶の船速変動（川崎港）

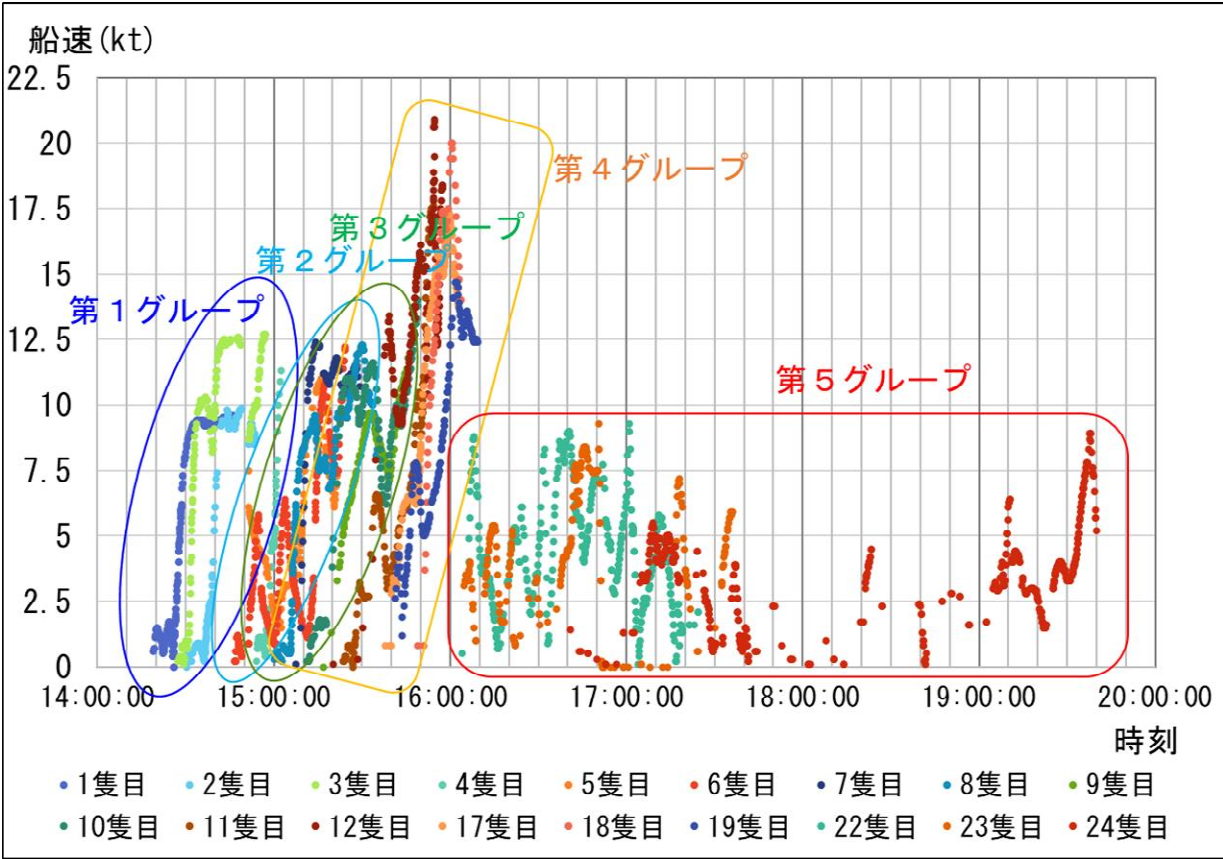


図-4.13 各船舶の船速変動（鹿島港）

次に、各港の各船舶の通常時の平均船速に対する地震発生時の平均船速の割合を図-4.14～図-4.16に示す。

苫小牧港においては、通常時の船速を確認できたほとんどの船舶で通常時より地震発生時の方が平均船速は遅かった。特に避難する船舶の集中による混雑や津波の影響を受けたと思われる第2、3グループは第1グループと比べ差が明確である。地震発生時の平均船速は通常時の80%程度であった。

川崎港においては、船舶が一斉に避難した第3グループは、地震発生時の平均船速が通常時の90%程度であった。第4グループは、避難しようとした船舶は少ないが、通常時より平均船速が速い場合と遅い場合にわかれており傾向は明確ではない。

鹿島港においては、第1、3グループ、第4グループのうち早めに港外到達した船舶、それぞれ1隻の平均船速は、通常時と同等、やや遅い程度であった。第4グループのうち、大きな津波が差し迫ったとみられる16時港外到達した船舶は、通常時と比べ速い傾向にある。

これらの知見は、今後各港でリスク評価のための避難時の船速の想定を行う際に参考になるものと考えられる。例えば一定程度避難船舶の集中の可能性がある場合には、通常時と同程度の船速は見込めず、80%～90%程度に設定することも検討が必要であろう。

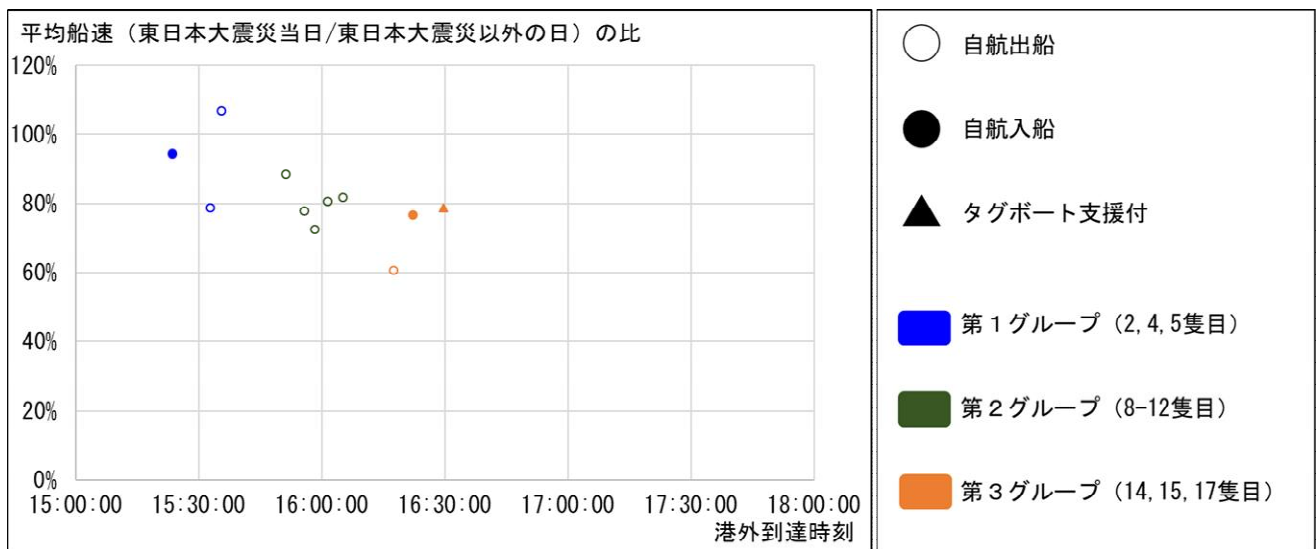


図-4.14 港外到達時刻と平均船速（東日本大震災当日/東日本大震災以外の日）の割合（苫小牧港）

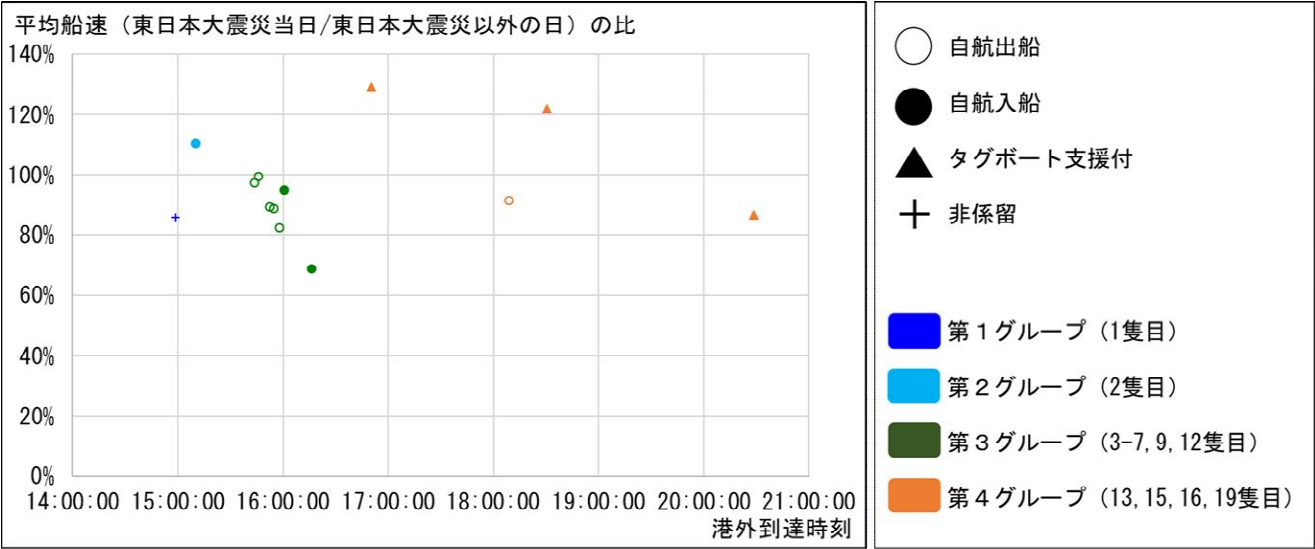


図-4.15 港外到達時刻と平均船速（東日本大震災当日/東日本大震災以外の日）の割合（川崎港）

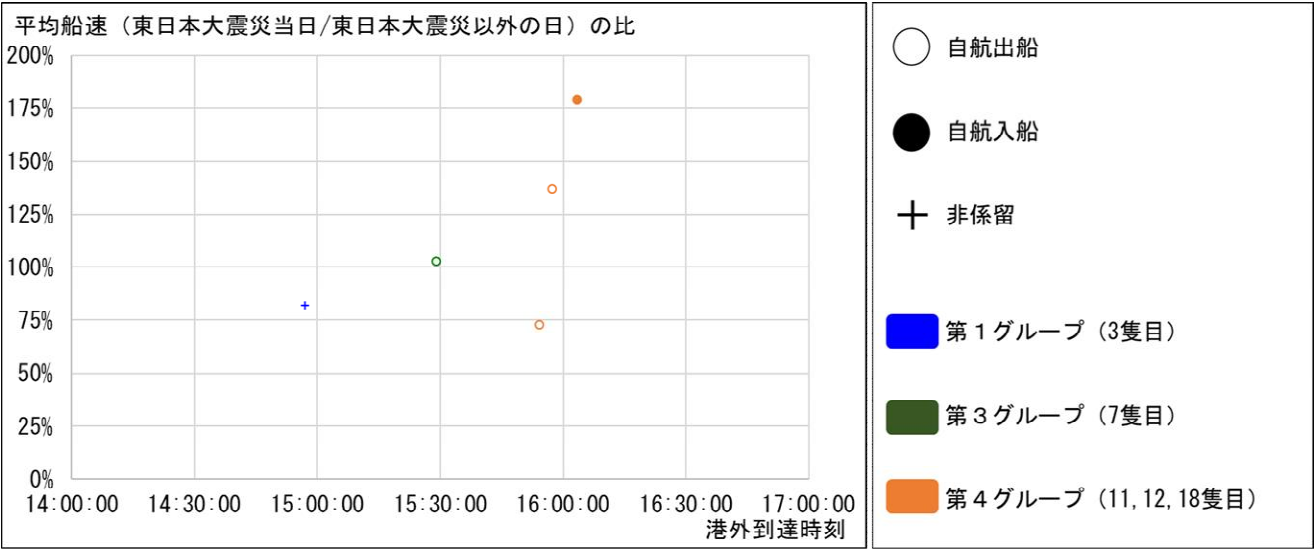


図-4.16 港外到達時刻と平均船速（東日本大震災当日/東日本大震災以外の日）の割合（鹿島港）

4.4 船舶の間隔についての分析

避難する際の船舶輻輳度を把握するため、船間の間隔を分析した。各港の自船舶の全長とタグボートを除く前方の船舶との間隔（前方の船舶と自船舶の平均全長換算）の関係を図-4.17～図-4.19に、平均全長換算の計算例を図-4.20に示す。なお、前方の船舶との間隔が測定できなかった船舶は分析対象としていない。また、図-4.20では概ね一定の間隔を空けて各船舶が航行する様子が確認できるが、分析の条件を揃えるために、港外到達直前の位置で船舶の間隔を測定した。

苫小牧港の最小値は5.5Lであるが多くの船舶が前方の船舶と8L程度の距離を保ち避難している。川崎港の最小値は8.0Lであった。多くの船舶が前方の船舶と8Lよりやや広い

距離を空けて避難している。鹿島港は5L程度の船舶が2隻いた以外は、10L以上距離を空けて避難している。「海上交通工学」によると、船舶の後方閉塞領域は8Lとされており¹²⁾、苫小牧港と川崎港では避難時の航行であってもこの程度の距離は最低限保とうとしていたものと考えられる。

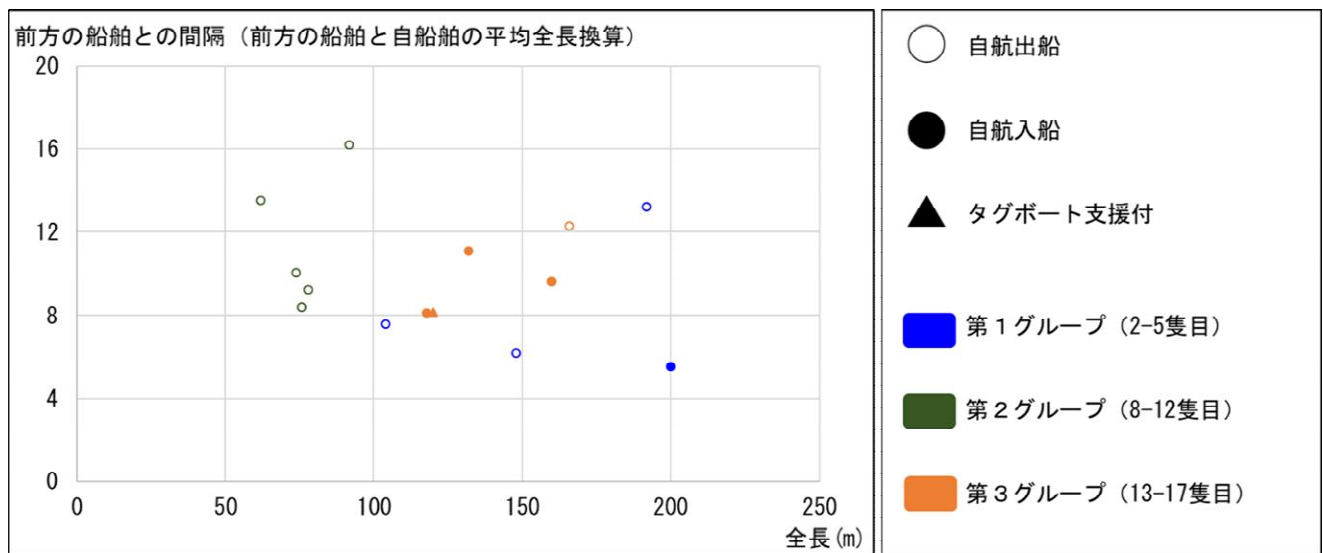


図-4.17 全長と前方の船舶との間隔（前方の船舶と自船舶の平均全長換算）（苫小牧港）

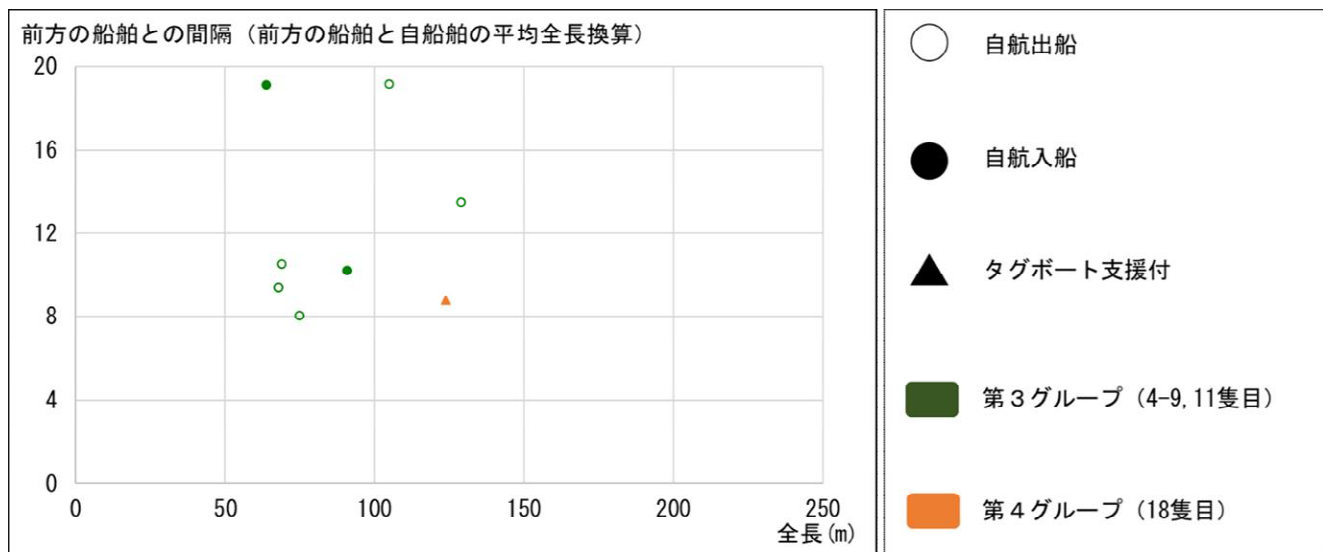


図-4.18 全長と前方の船舶との間隔（前方の船舶と自船舶の平均全長換算）（川崎港）

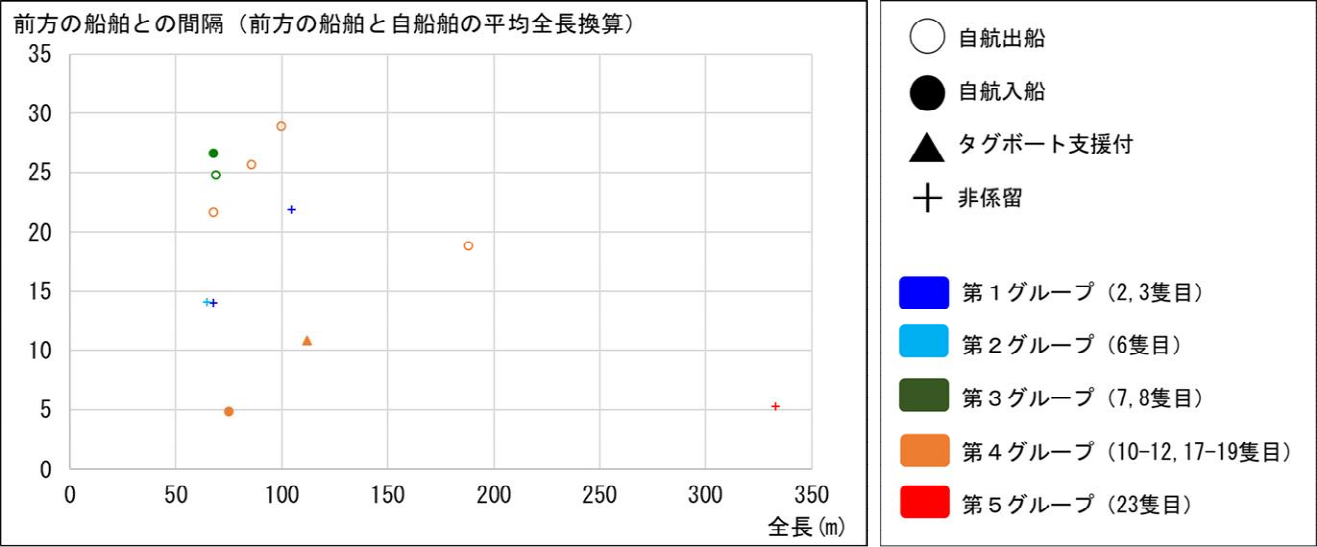


図-4.19 全長と前方の船舶との間隔（前方の船舶と自船舶の平均全長換算）（鹿島港）



図-4.20 平均全長換算の計算例

4.5 各港の比較

避難時の船舶航行実態の比較として各港で避難、係留及び漂流した隻数と、避難する船舶が集中していた苫小牧港第1～3グループ、川崎港第3グループ、鹿島港第3、4グループについての比較を表-4.1に示す。平均間隔については、対象グループの最初と最後の船舶の港外到達時間、対象船舶数、対象船舶の港外到達時の平均瞬間船速・平均全長から計算している。

川崎港は、苫小牧港より平均間隔（時間）、平均間隔（距離）は小さいが、平均間隔（平均全長換算）は大きく通常時に対する平均船速の低下割合も大きい。苫小牧港の方が川崎港より輻輳度が高かったとみられる。川崎港は震源から遠く地震直後でなく津波注意報後に船舶が一斉に避難開始したため一時的な混雑が発生したと思われる。

鹿島港について平均間隔は他港と比べ大きく輻輳度も低かった。一定数の船舶が津波到達までに港外避難不可能と判断し係留継続したことがこの要因と考えられる。船速が大きくなっているのは、津波来襲が切迫したことが要因と考えられる。

以上のことから、苫小牧港は早い段階から津波警報が発令された中で、船舶が迅速に一定の秩序下で避難を行った例であると考えられる。

表-4.1 各港の混雑時の比較

	苫小牧港	川崎港	鹿島港
避難した船舶	20隻	27隻	24隻
係留し続けた船舶	1隻	12隻	3隻
漂流し続けた船舶	0隻	0隻	9隻
対象船舶	1～17隻目	3～12隻目	7～19隻目
タグボート等を除く対象船舶数	16隻	9隻	9隻
港外到達時刻	15:21:57 - 16:29:47	15:43:42 - 16:16:32	15:29:16 - 16:09:17
離岸・回頭終了から港外到達までの平均航行距離	4,327m	3,946m	7,256m
港外到達時の平均瞬間船速	11.1kt	10.7kt	13.4kt
平均間隔（時間）	4分31秒	4分6秒	5分0秒
平均船舶間隔（距離）	1,548m	1,354m	2,068m
平均全長	118m	93m	97m
平均船舶間隔（平均全長換算）	13.1L	14.6L	21.3L
最小間隔（平均全長換算）	5.5L	8.0L	4.8L
通常時に対する地震発生時の平均船速の割合	82%	89%	126%

5. まとめ

本研究では、津波発生時の船舶避難を円滑化する観点から、操船シミュレーションを用いた大型船の回頭能力検証と、AIS データを用いた東日本大震災時の船舶緊急避難における港湾内船速の分析を行った。主要な結論を以下に示す。

第一に入船からの自力離棧の可能性について、既往の検討よりやや大型の船舶を中心に操船シミュレーションで検証した。検討対象とした船舶については概ね自力離棧可能であったが、11 万 DWT 級のコンテナ船と 16 万 DWT 級の貨物船は、向岸風がある場合に自力離棧は難しいと操船者から判定された。また、離棧から港域線を船尾が通過するまでの所要時間は、28.6～60.9 分であった。自力離棧可能であっても押し波が来襲するまでに避難できないことも想定する必要がある。

第二に出船着棧について、泊地水深が深いと浅水影響が小さくなり操船性が上がるため、着棧までの所要時間を短くすることが可能である。泊地水深を 1.2d より深くすれば、一定程度の操船支援となり、大型船を出船係留させることへの支援となりえる。

第三に東日本大震災発生時の船舶の避難実態について、以下の状況を把握した。

- ・ 苫小牧港では地震発生約25分後から多くの船舶が一定時間内に概ね一定の間隔を空けて通常時より遅い平均船速で避難した。係留を継続した船舶も見られたが、漂流には至らなかった。川崎港では津波注意報が発令後の一定の時間帯に避難する船舶の集中が見られた。係留を継続した船舶も一定数見られたが、漂流には至らなかった。鹿島港では港内に留まった船舶の多くは津波により漂流した。
- ・ 船舶が避難する際、通常時と比べ平均船速が8割程度となるケースが確認され、またこの際に船舶は概ね8L以上の距離を保ち避難しようとしていた。鹿島港においては一定の時間帯で通常時の1.5倍程の船速による避難が見られたほか、津波による漂流後に港外へ避難した船舶が見られた。

本研究は災害時の、船舶緊急避難に関する知見をまとめたものであり、港湾計画、港湾 BCP、広域防災 BCP 策定の参考情報となるものである。本研究に関して今後の課題等を以下に示す。

第一に主要な船種・船型について離棧条件設定の考え方と標準的な離棧・回頭の所要時間を整理するとともに、港湾内航行の際の船速設定の考え方の整理を行う必要がある。

第二に緊急避難時に船舶が輻輳すれば船速が低下するが、

その定量的な評価方法については港湾内での交通流シミュレーション等を行うなどさらに検討を深める必要がある。

第三に引き波時に水深が大きく低下した場合や、押し波時の強い流速を受けた場合の航行可能性の評価を行うことで、多様な状況下での緊急避難可能性評価を支援することが望ましい。

第四に泊地水深を深くすれば入港時に出船着棧を行おうとする際の着棧までの所要時間を短くすることが可能となり、船舶の出船係留への転換に対する支援となることが示されている。具体的な対応の実施の可否については個々のケースごとに検討が必要である。

今後も本課題に関する検討を継続することで、大規模地震発生時の船舶緊急避難に関するリスクの評価方法の充実、また船舶緊急避難を容易にするための航路・泊地に関する施設計画の策定等に貢献してゆきたい。

本資料は国総研のホームページでカラー版 PDF がダウンロード可能である。

(2024年2月14日受付)

謝辞

本研究においては、操船や造船関係の学識者の皆様、船長経験者の皆様から、貴重なご意見を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：海・船の視点からみた港湾強靱化 Ver.1, 2021年,
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001396703.pdf> (2024年2月14日アクセス)。
- 2) 安部智久・篠永龍毅：津波発生時の船舶航行実態分析と緊急避難円滑化に向けた視点, 国土技術政策総合研究所資料, No.1217, 2022年。
- 3) 久保雅義：津波が船舶を被害者・加害者に変える, 絆 津波からいのちを守るために, ウェイツ, 2021年, pp.63-67.
- 4) 榊原繁樹・阿部郁男・久保雅義・津金正典：東日本大震災における津波観測および港内係留船の被災実態調査に基づく係留限界津波高さの推定, 日本航海学会論文集 No.136, 2017年, pp.33-43.
- 5) 榊原繁樹・阿部郁男・津金正典・久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時の係留 VLCC の挙動再現について, 日本航海学会論文集 No.127, 2012 年, pp.57-68.
- 6) 邦船社が作成した停泊中船舶の津波対応ガイドライン。同社の HP から 2012 年にアクセス。
- 7) 日本海難防止協会：海と安全 2012 年春号, No.552, 2012 年。

- 8) 日本航海学会：東日本大震災検討会講演資料集．同学会から入手可能．
- 9) 公益社団法人 日本海難防止協会：大地震及び大津波来襲時の航行安全対策に関する調査研究，2014 年，
https://nikkaibo.or.jp/pdf/25_09.pdf（2024 年 2 月 14 日アクセス）．
- 10) 松田信彦，富田孝史：鹿島港における津波来襲時の船舶避難行動分析，日本船舶海洋工学会講演会論文集第 15 号，2012 年，pp.109 -112．
- 11) 矢吹英雄・井上一規・岡崎忠胤・榎野純：自力離栈の限界と操船法の提案，船舶の津波対策シンポジウム講演資料集（第 3 回東日本大震災検討会），公益社団法人 日本航海学会，2013 年，pp.61-79．
- 12) 藤井弥平・巻島勉・原潔：海上交通工学，海文堂出版，1981 年，pp.123．

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1276

March 2024

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

