

港湾内における作業船の津波被害低減 に関する研究

平成27年9月

大野正人

港湾内における作業船の津波被害低減に関する研究

目次

第 1 章 緒論-----	1
1. 1 研究の背景	
1. 2 研究の目的	
1. 3 研究の構成と主な検討事項	
第 2 章 作業船の実態と津波来襲時における作業船被害低減対策の必要性-----	6
2. 1 東日本大震災時に作業船が果たした役割	
2. 2 我が国の作業船の現状	
2. 3 東日本大震災に伴う津波による船舶の被災実態と作業船の被害実態	
2. 4 津波来襲時に作業船が取るべき行動	
2. 5 作業船の津波被害低減対策の課題	
第 3 章 係留船舶津波ハザードマップの開発と作業船の係留場所 選定手法の提案-----	37
3. 1 作業船の港内係留場所の実態と課題	
3. 2 港湾内の係留船舶津波ハザードマップと係留場所選定手法提案	
3. 3 木更津港における作業船の係留場所選定手法の適用	
3. 4 清水港における作業船の係留場所選定手法の適用	
3. 5 作業船の係留場所選定手法のまとめ	
第 4 章 津波被害を低減するための作業船係留方法の提案-----	71
4. 1 作業船の係留方法の実態と課題	
4. 2 浮体式棧橋による係留索張力低減効果等の分析	
4. 3 岸壁海側アンカーによる乗揚げ防止効果の分析	

4. 4 作業船の係留方法の考え方のまとめ

第5章 作業船の津波被害低減対策ガイドラインの提案-----104

5. 1 「津波来襲に対する作業船の安全確保に関するガイドライン」の分析

5. 2 作業船の津波被害低減対策ガイドラインの提案

第6章 作業船の津波被害低減対策ガイドラインの効果と課題-----122

6. 1 ガイドラインの効果

6. 2 ガイドラインの課題

第7章 結論及び謝辞-----127

7. 1 結論

7. 2 謝辞

【参考文献】-----129

<図表集>

- 図-1.1 第3章の記述内容
- 図-1.2 第4章の記述内容
- 図-1.3 本研究の全体構成
- 図-2.1.1 石巻港の瓦礫の状況
- 図-2.1.2 東日本大震災時の作業船の調達
- 図-2.1.3 航路啓開の状況3) (宮古港<左>、仙台塩釜港<右>)
- 図-2.1.4 浮遊障害物の状況3) (石巻港)
- 図-2.1.5 シルプロによる浮遊障害物の封じ込め
- 図-2.1.6 起重機船団と潜水士船等の関係
- 図-2.1.7 起重機船を用いた吊り上げ方式
- 図-2.1.8 ガット船を用いた掴み上げ方式
- 図-2.1.9 投入船団数と調査異常点数
- 図-2.1.10 投入船団数と港湾区域面積
- 図-2.1.11 啓開に従事した起重機船基地港
- 図-2.2.1 作業船の種類
- 図-2.2.2 起重機船 (第78栄進)
- 図-2.2.3 ガット船 (第12勝栄丸)
- 図-2.2.4 ケーソン製作船 (FD)
- 図-2.2.5 地盤改良船
- 図-2.2.6 作業船の建造年度 (全船種)
- 図-2.2.7 船種別現有作業船と隻数 (現有作業船一覧2007年)
- 図-2.3.1 津波来襲時のマリンゲート塩釜の浮体式棧橋に係留している観光遊覧船
- 図-2.3.2 漂流作業船の曳航状況
- 図-2.3.3 FDの被災
- 図-2.3.4 土運船の被災
- 図-3.1.2 東京港12号地作業船係船場 (旧水面貯木場)
- 図-3.1.3 尼崎西宮芦屋港の西宮防波堤内側での作業船係留状況
- 図-3.2.1 係留船舶津波ハザードマップ作成の手順
- 図-3.2.2 The conceptual diagram of DEM
- 図-3.2.3 初期水位算定の際の地形データ
- 図-3.2.4 Spring 切断に至る安全限界
- 図-3.2.5 被害発生の概略判定基準
- 図-3.2.6 係留場所の評価の考え方
- 図-3.3.1 計算領域と対象地域

- 図-3.3.2 係留索諸元と係留船舶に関する概念図
- 図-3.3.3 津波伝播シミュレーションによる Area A の津波高と津波流速
- 図-3.3.4 津波伝播シミュレーションによる Area B の津波高と津波流速
- 図-3.3.5 木更港の最大津波高（上）及び最大浸水深（下）
- 図-3.3.6 木更津港の津波最大流速図
- 図-3.3.7 係留索張力の評価
- 図-3.4.1 ネスティング対象領域の比較
- 図-3.4.2 The conceptual diagram of mooring lines
- 図-3.4.3 清水港の最大津波高 a) 及び最大浸水深 b)
- 図-3.4.4 最大津波流速
- 図-3.4.5 津波到達時間
- 図-3.4.6 係留状況モデル化概念図
- 図-3.4.7 最大津波高
- 図-3.4.8 最大浸水深
- 図-3.4.9 最大津波流速図
- 図-3.4.10 最大係留策張力評価
- 図-3.4.11 係留船舶津波ハザードマップ
- 図-3.5.1 作業船の係留場所選定手法のまとめ
- 図-4.1.1 平行係留の例千葉港船橋
- 図-4.1.2 垂直係留の例横須賀港新港地区
- 図-4.1.3 杭を使った係留方法（東京港中央防波堤内側水域）
- 図-4.1.4 アンカーリングによる水域での係留事例（東京港 12 号地作業船係留水域）
- 図-4.2.1 マリンゲート塩釜の浮桟橋への係留状況と固定式護岸での被災状況
- 図-4.2.2 マリンゲート塩釜の浮桟橋連結部及び係留杭の構造と手すりの被害
- 図-4.2.3 各次元における係留索のモデル化
- 図-4.2.4 通知計算に用いたモデルの概要
- 図-4.2.5 波高ごとの入射波形
- 図-4.2.6 固定桟橋と浮体式桟橋に係留した船舶の張力の比較（ $H=3.4\text{m}$, 入射方向 0 度）
- 図-4.2.7 固定桟橋と浮体式桟橋に係留した船舶の張力の比較（ $H=6.4\text{m}$, 入射方向 0 度）
- 図-4.2.8 計算可視化結果（ $H=6.5\text{m}$ 、入射方向 0 度）
- 図-4.2.9 固定桟橋と浮体式桟橋に係留した船舶の張力の比較（ $H=3.4\text{m}$, 入射方向 90 度）
- 図-4.2.10 固定桟橋と浮体式桟橋に係留した船舶の張力の比較（ $H=6.4\text{m}$, 入射方向 90 度）
- 図-4.2.11 計算可視化結果（ $H=6.4\text{m}$, 入射方向 90 度）
- 図-4.2.12 数値計算概要図（断面図）
- 図-4.2.14 数値計算概要図（平面図, 入射方向 0°）
- 図-4.2.15 数値計算概要図（平面図, 入射方向 90°）

- 図-4.2.16 津波入射方向 0° における浮体船舶比
- 図-4.2.17 津波入射方向 90° における浮体船舶比
- 図-4.2.18 浮体船舶比ごとの係留索張力の低減効果（入射方向 0°）
- 図-4.2.19 浮体船舶比ごとの係留索張力の低減効果（入射方向 90°）
- 図-4.2.20 浮体船舶比ごとの相対的な水平方向変化量（入射方向 0°）
- 図-4.2.21 浮体船舶比ごとの相対的な水平方向変化量（入射方向 90°）
- 図-4.3.1 沖側アンカーシミュレーションの係留条件
- 図-4.3.2 津波による船舶の岸壁直角方向の変位計算結果
- 図-4.3.3 船舶の挙動シミュレーション結果のビジュアル化
- 図-4.3.4 離岸距離シミュレーションモデル
- 図-4.3.5 浮体の水平方向重心位置の軌跡
- 図-4.3.6 離岸距離別の係留索張力の変化
- 図-5.2.1 ガイドラインの対象範囲
- 図-5.2.2 平常時の津波被害低減対策の概要
- 図-5.2.3 作業船係留場所の選定のフロー
- 図-5.2.4 被害低減対策と係留方法の関係
- 図-5.2.5 係留索をクロスさせた事例東京港中央防波堤内側の FD
- 図-6.1.1 南海トラフ巨大地震の津波高分布予測
- 図-6.1.2 東京湾における緊急確保航路等
- 図-6.1.3 伊勢湾『くまで』作戦（イメージ）

- 表-2.1.1 航路等の被災実態
- 表-2.1.2 港湾等別啓開用作業船の種類と投入量
- 表-2.1.3 調査及び啓開作業日数
- 表-2.1.4 啓開開始日と第一船入港日
- 表-2.1.5 震災前後の作業船の在港隻数の変化
- 表-2.2.1 作業船の規格別大きさと隻数
- 表-2.2.2 主な作業船の稼働状況
- 表-2.5.1 本論の対象とする事象の整理
- 表-3.1.1 作業船の係留場所
- 表-3.2.1 断層パラメータ概要
- 表-3.3.1 津波伝播計算諸元
- 表-3.3.2 対象船舶諸元
- 表-3.3.3 シミュレーション上の船舶諸元
- 表-3.4.1 津波伝播・遡上計算設定条件
- 表-3.4.2 ネスティング設定条件

- 表-3.4.3 船舶応答シミュレーションの船舶の条件
- 表-3.4.4 係留索の条件
- 表-4.1.1 作業船の係留方法の実態
- 表-4.2.1 数値計算諸元（係留索諸元）
- 表-4.2.2 係留索諸元
- 表-4.2.3 検証項目数
- 表-4.2.4 津波による船舶係留力合計の倍率（MPS シミュレーション結果）
- 表-4.3.1 離岸距離の検討ケース
- 表-4.3.2 計算条件詳細
- 表-4.3.3 係留索諸元
- 表-5.1.1 津波来襲時の人員および船舶対応
- 表-5.2.1 作業船の被害低減対策関係者の役割分担
- 表-5.2.2 係留船舶津波ハザードマップ作成時の着目要素と特徴
- 表-5.2.3 被害発生の概略判断基準と対策の留意点
- 表-5.2.4 係留候補地の評価表

第1章 緒論

1. 1 研究の背景

四面環海の我が国は港湾と漁港を合わせて 5,000 弱の港を有する世界有数の港大国であり、作業船はこれらの港の建設工事や改良・修繕、あるいは震災後の啓開作業などに欠かせない基盤的な機材である。

作業船は海上工事に従事する船舶で、我が国は現在約 7,000 隻を保有している。その種類は多岐に分かれている。主なものとしては、海上で重量物を引き揚げたり、設置したりする起重機機能をもつ「起重機船」、海底の土砂を浚渫する「浚渫船」、海中の調査や工事の潜水作業を支援する「潜水土船」、作業船の活動を支援する「揚錨船」や「押船」、土砂や資材を運搬する「台船」「土運船」「ガット船」などがある。災害復旧工事をはじめ様々な海上工事は、これらの作業船を組み合わせて船団を構成することにより行われる。

先般の東日本大震災は、戦後我が国が経験した最大規模の地震とそれに伴う大災害であり、地震後に東北地方の太平洋側及び北関東の沿岸を襲った津波は、広域な沿岸地域に大きな人的・物的被害をもたらした。多くの港湾が被災し、その機能が失われた。陸上交通網も大きく被災したことから、被災地への食糧や医療品などの緊急物資の輸送や陸上での輸送活動に欠かせないガソリンや備蓄の少なかった家畜用飼料などの海上輸送への要請は高かった。

震災直後、直ちに必要となった港湾の復旧工事は、これまで我が国では体験しなかった広範囲で大規模な、かつ、急速な施工を要するものであった。多くの港湾では、岸壁や防波堤の被災とともに大量の津波漂流物で船舶の航路が塞がれた。早急に船舶の入港を可能とするため、航路や泊地を塞いだ海上の浮遊障害物や海底堆積物を除去する航路・泊地の啓開作業を行う必要が生じた。

このため、被災各港には多くの作業船団を緊急に集結させることが必要になった。これらの作業船は、大津波が来襲した地域以外から応援に駆け付けたものと、津波来襲地域内で被災から免れたものの双方が中心になっていた。津波来襲地域内の作業船の中には、津波による被害等のため、早期の航路啓開や災害復旧に参加できなかったものもあり、震災初期の活動では被災地域外からの船を頼りにせざるを得ない状況も生じた。

筆者は、長年、港湾行政に携わり、近年は一般財団法人港湾空港総合技術センターにおいて、我が国の港湾工事の現場管理の総括を指導的な立場で勤めている。この間、東日本大震災の港湾復旧工事の指導も行ってきた。ここで得た知見として、作業船は我が国の海上工事を実施する中核的な機能を果たしていること、特に津波を伴う大震災発生後直ちに必要となる港湾物流機能復旧にとって、船団としての作業船の活動が必要不可欠であることを痛感した。しかし、作業に不可欠な作業船自体への被害低減への対応は体系的な検討がなされていない実情が明らかとなった。

東海地震、東南海地震、南海地震など南海トラフで発生する大津波を伴う新たな大規模

地震（以下「南海トラフ巨大地震」という。）の発生が予想され、これへの対応が各分野で検討されている。この中で被災直後の緊急物資輸送は大きなテーマとなっている。特に、三大湾など我が国の産業や経済の中心となる地域での港湾機能の復旧は重要な国家的課題となっている。これに伴い、大規模で広範な港湾機能の早期回復のための航路啓開や災害復旧作業が必要とされ、多数の作業船団が被災後直ちに稼働することが求められている。このため、作業船が地震直後から直ちに活動できるように常日頃から十分な備えを整えておくことが必要である。

本研究は、津波を伴う大規模地震被災後、直ちに必要となる航路啓開作業やその後の港湾施設の災害復旧など港湾機能の早期回復作業をより充実させるため、関係者が共有する情報として①震災後直ちに必要となる作業船の活動内容を明らかにし、次いで②作業船の津波被害低減対策の要素方策を分析し、事前に関係者が取るべき対応策等をガイドラインとして取りまとめ、提言している。

これにより、港湾機能の早期回復が図られ、地域経済の核となっている臨海部の企業の活動の継続が可能になろう。

1. 2 研究の目的

本研究は、大規模震災時等の津波による作業船の被害低減を図ることを目的としたものである。航路啓開や港湾の災害復旧に不可欠な作業船の津波被害低減対策を総合的に検討し、作業船の津波被害低減対策をガイドラインとして提案している。これにより、震災後速やかに港湾機能の早期回復が図られ、港湾を利用した緊急物資の輸送や臨海部の企業活動の活発化に資するものである。

研究は主として以下の4つの内容からなっている。

- ①作業船の津波被害低減の必要性と課題
- ②係留船舶津波ハザードマップを応用した作業船の係留場所の選定手法の提案
- ③津波被害低減のための作業船の係留方法の提案
- ④作業船の津波被害低減対策の指針であるガイドラインの提案

1. 3 研究の構成と主な検討事項

本研究では、7章で構成している。

第1章及び第2章では、本研究の必要性と課題について記述している。必要性については、東日本大震災時の航路啓開作業における作業船団の活動実態等を分析することにより、大津波を伴う震災後の航路啓開や災害復旧において早期に作業船が活動できるように平常時から準備しておくこと及び、このために作業船の津波被害低減対策が必要であることを明らかにしている。また、作業船の津波被害低減対策の課題としては、多種多様な作業船が存在する中で、喫水が比較的浅い船が多いことや非自航式の船が多く船員不在で係留されている不稼働期間が長いことなどの特性を分析し、被害を低減できる係留場所の選定と

係留方法の工夫が必要であることを明らかにする。

第3章では、津波被害を低減するための課題の一つである作業船の係留場所について記述している。ここでは、作業船の係留場所の実態等を整理した上で、津波伝播・遡上シミュレーションと船舶応答シミュレーションにより計算される最大津波高図、最大浸水深図、最大津波流速図及び最大係留索張力評価図の4つの図からなる係留船舶津波ハザードマップを開発する。また、作業船の係留場所における被害発生の可能性を判断するための概略判断基準を設定する。係留船舶津波ハザードマップを用いて作業船の係留候補地を概略判断基準により絞り込むという、作業船の係留場所選定手法を提案する。さらに木更津港及び清水港を事例として、この係留場所選定手法の適用性を確認する。これをフローで示すと図-1.1のとおりである。

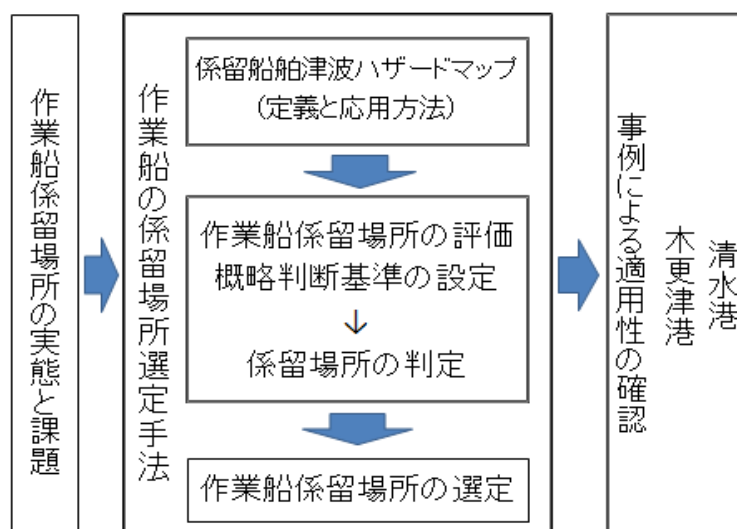


図-1.1 第3章の記述内容

第4章では、津波被害を低減するための今一つの課題である作業船の係留方法について記述している。ここでは、まず作業船の係留方法の実態等を整理する。次に、マリゲート塩釜の浮体式栈橋に係留されていた観光旅客船が津波による被害を免れたことを踏まえて、浮体式栈橋の津波被害低減効果をMPS法により分析し、その有効性を検証する。さらに、作業船の係留方法としても良く用いられている沖側アンカーについて、津波時の岸壁への乗り上げ被害防止効果をMPS法により分析し、その有効性を検証する。これらの結果を踏まえて、作業船の津波被害低減に有用な係留方法を明らかにする。これをフローで示すと図-1.2のとおりである。

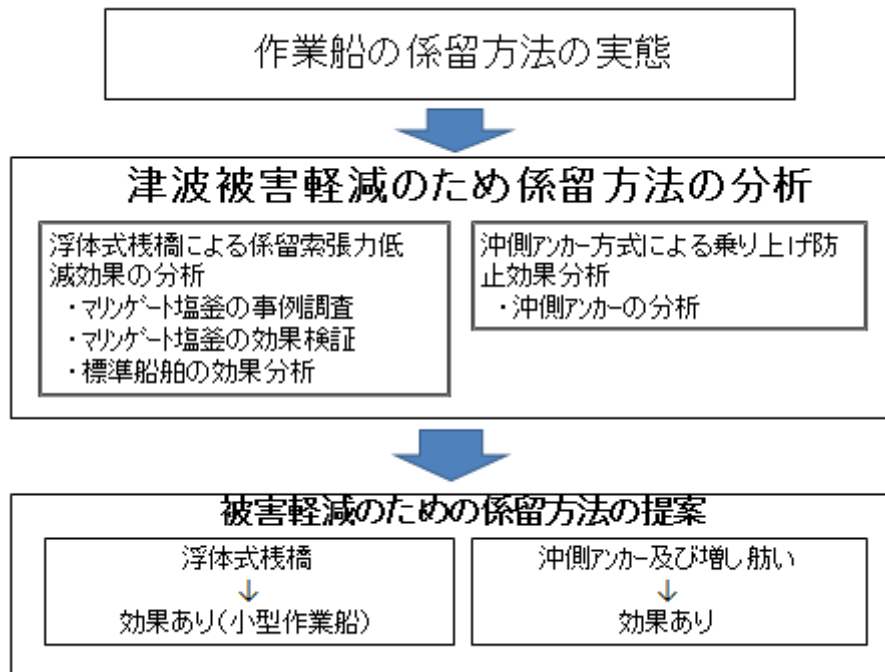


図-1.2 第4章の記述内容

第5章では、第2章～第4章の成果を基にして、作業船の津波被害低減対策ガイドラインについて記述している。このガイドラインは、作業船の津波被害低減対策の指針であり、今後の作業船の係留計画や係留マニュアルを策定するにあたり基本的考え方や基礎的な情報等を取りまとめたものである。ガイドラインにおいて、第3章で提案した作業船の係留場所の選定手法及び、第4章で提案した係留方法の改善等の方策を取りまとめるとともに、これを実行するために、作業船の船員や作業船の運航者（所有者）は勿論であるが、震災時に作業船を早期に必要とする港湾管理者や国の港湾整備関係部局も含めた関係者の役割分担について取りまとめる。

第6章では、作業船の津波被害低減対策ガイドラインの有効性と今後の課題について記述している。有効性については、ガイドラインを策定することにより、津波被害低減対策の実効性が向上すること、これにより南海トラフの巨大地震等の大規模地震対策に対する準備がより整えられること、及び主要な港湾において策定されている港湾BCPがより充実したものになることを示す。

第7章では、本研究の結論を取りまとめる。

以上、本研究の全体構成をフローチャートによりまとめると、図-1.3のとおりである。

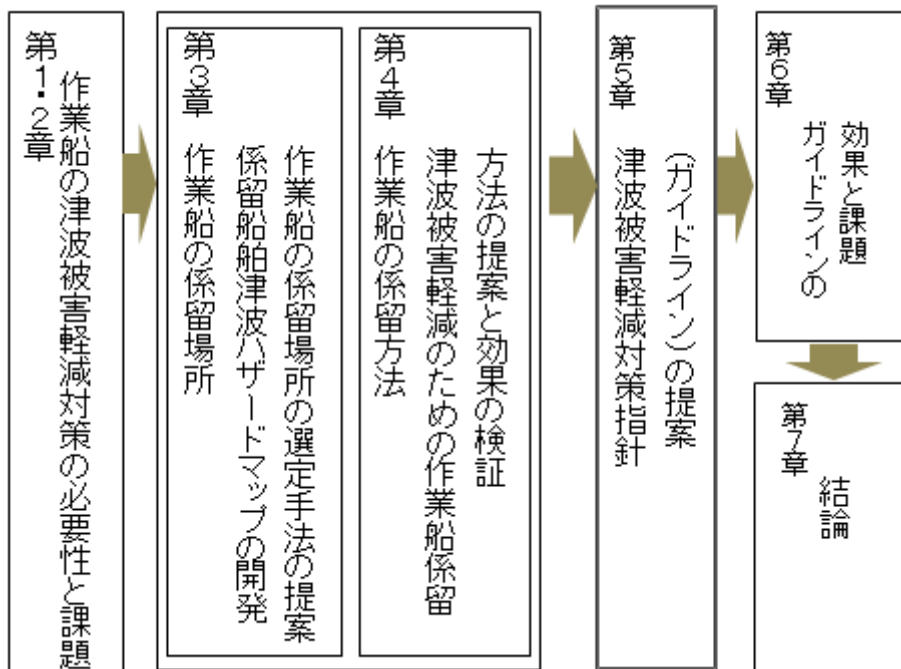


図-1.3 本研究の全体構成

第2章 作業船の実態と津波来襲時における作業船被害低減対策の必要性

2. 1 東日本大震災時に作業船が果たした役割

本節では、東日本大震災時の津波により被災を受けた東北地方の港湾において、航路啓開を行う際の作業船の活動実態などを明らかにすることにより、作業船が果たした役割を分析することとする。また、今後発生が予想されている東海、東南海、南海トラフ地震など津波を伴う大規模な地震発生後に、作業船がその役割を果たすためには、何が重要であるかを合わせて分析する。

2.1.1 東日本大震災の被害概要と港湾機能の早期回復の必要性

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震は、東日本の太平洋側を中心に甚大な地震と津波の被害をもたらした。太平洋三陸沖を震源としてM9.0の海溝型巨大地震であったため、大きな津波が発生し、特に東北地方の太平洋沿岸を中心に死者15,890人、行方不明者2,590人¹⁾となっているなど多くの人々の命を奪い、家屋の全壊約12万7829戸、半壊275,785戸など多くの家屋や様々な施設を破壊した。死者の9割以上が溺死²⁾であったことから大規模な津波型震災であったことが分かる。また、津波により流出した家屋や自動車、コンテナ、



図-2.1.1 石巻港の瓦礫の状況³⁾

木材等は瓦礫となり、陸域・海域双方の障害になるなど、津波による被害が中心となる大震災であった。(図-2.1.1)

港湾における被害³⁾も甚大であった。高橋重雄、戸田和彦らによる調査速報⁴⁾によると、岸壁やエプロンの陥没、沈下、防波堤のみならず、コンテナ・完成車のふ頭用地への散乱、荷役機械の倒壊、上屋・倉庫の損壊、臨港道路を含む背後交通網の瓦礫による寸断などが発生している。これらにより、被災直後から港湾機能は失われ、関東圏まで含む広範囲にわたり生活物資が欠乏し、ガソリン等が逼迫するなど、市民生活も脅かされた。

また、被災地域の港湾貨物も大幅に減少した。被災地域に所在する税関支署及びその出張所を通じた輸出状況を見ても平成23年4月の輸出額が対前年同月と比し▲71.7%となっており⁵⁾、全国の輸出額でも4月は対前年▲12.4%と大幅に減少した。この要因の一つは、製造製品に用いられる部品等の供給ができない、いわゆるサプライチェーンの寸断が発生

したためであると考えられるが、いずれにしても沿岸部・内陸部を含めた産業活動の停止・停滞を余儀なくされる状況になった。

こうした中で、海上ルートを使って緊急物資の搬入を行う上でも、また、地域の生活や経済活動を早期に取り戻すためにも、港湾機能の早期回復が喫急の課題となっていた。

2.1.2 地震発生直後からの航路啓開作業と作業船の調達

東日本大震災の発生直後からの国の取り組みとしては、同日に直ちに災害対策本部を設置し、災害協定に基づき埋立浚渫協会の会員企業を招集し会議を開催し、被害状況の把握や航路啓開等のための作業船の調達などの議論を始めた。

3月13日17時58分の、津波警報・注意報の解除を受け、翌14日には、緊急物資輸送のための航路等の啓開、作業船・台船等の動員、油供給、テント設置、国土交通省所有の災害支援船の対応などを行い、地震発生から約2週間で、津波により被災した港湾の岸壁一部供用開始を実現し、その後さらに復旧・復興に向けた活動を進めている。

このような中で、港湾機能回復の生命線ともいえる航路啓開作業が国土交通省（港湾部局）と海上保安庁が中心となり、埋立浚渫協会の会員企業の協力を得て行われた。ここで活躍したのが作業船である。

震災発生直後は地元建設会社と連絡がつかなかったことや、地元建設会社の社員の被災、作業船自体の被害などにより作業船の調達が難しかったため、全国各地から作業船を調達した。3月15日時点で稼働した作業船24隻の内、地元建設会社のものは4隻であった。また、震災後の航路啓開で作業船が最も多く稼働した日は3月30日で50隻の作業船が投入されたが、その内地元建設会社の作業船は

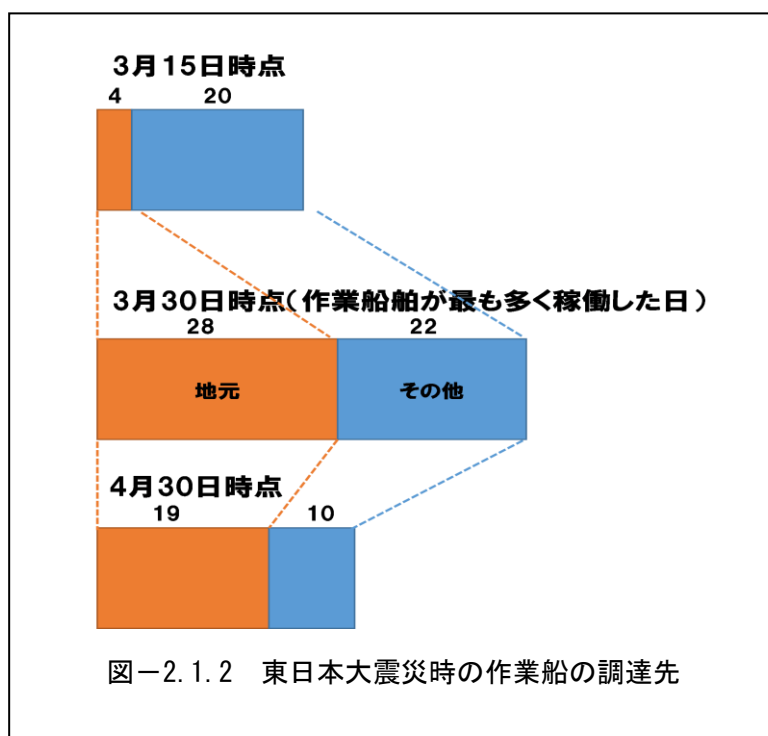


図-2.1.2 東日本大震災時の作業船の調達先

22隻で半分にも及ばなかった。その後、経済活動の正常化に伴い全国から調達した作業船が帰港し、作業は地元建設会社主体に移行した（図-2.1.2）。このように、東日本大震災発生直後における作業船は、緊急物資輸送や港湾機能の復旧になくてはならない存在であったが、被災地域内（地元）からは調達が難しく、全国から調達しなければならない状況であった。

2.1.3 航路等の啓開作業の実態と作業船の活動

港湾機能の早期回復のために最初に行う作業は、船が入港できるように津波により航路に流入した多くの障害物を取り除く航路啓開である。

航路啓開作業については、国土交通省東北地方整備局と海上保安庁が連携しつつ、航路内に浮遊又は沈降している障害物の調査や、発見された障害物の撤去（航路啓開）の作業が行われた^{3) 6)}（図－2.1.3）。航路啓開の実態については、著者らによる、大津波被災後の港湾における航路等の啓開作業の方法と必要な機材に関する研究⁷⁾において報告しているが、ここでは、著者らによる研究結果をもとに、東北地方の太平洋側の各港湾において行われた航路等の啓開作業の実態と作業船の活動状況について記述することとする。

なお、ここでいう航路啓開作業は次の一連の作業と定義する。

- ・まず航路等の海域において浮遊障害物を撤去する。
- ・その次に海底障害物の調査を行い、障害物を特定する。
- ・その障害物を撤去する。
- ・障害物の撤去が終わると、海上保安庁が水深の確認を行う。



図－2.1.3 航路啓開の状況³⁾（宮古港<左>、仙台塩釜港<右>）

（1）航路等の被災実態

東日本大震災時に被害を受けた港湾のうち、経済活動等で重要な役割を果たしている重要港湾以上の港湾・港区、すなわち八戸港、久慈港、宮古港、釜石港、大船渡港、仙台塩釜港石巻港区、仙台塩釜港塩釜港区、同港仙台港区、相馬港及び小名浜港の10港湾・港区（以下「港湾等」と記述する。）を対象にして、航路等の被災実態を調べたものが以下のとおりである。

1) 航路等の被災の2つの状況

航路等の被災は2つの状況の混在であった。一つは、水面上に木材や漁網筏、漂流した標識灯などの浮遊障害物がある状況であり、今一つは、海底にコンテナや自動車、小型船、

消波ブロックなどの海底障害物が沈んでいる状況である。

2) 浮遊障害物の状況

浮遊障害物は、港湾内の広い範囲に分布していることが多く、これらの中には、風や潮流などにより移動するものも多くみられた。主要な浮遊障害物について見てみると、木材の取り扱いの多い港である宮古港、石巻港などでは流木などが多く、また、漁業活動が盛んな大船渡港や塩釜港区では、筏や漁網などが多くみられた。(図-2.1.4)



図-2.1.4 浮遊障害物の状況³⁾ (石巻港)

3) 海底障害物の状況

海底障害物としては、コンテナ貨物の取扱量が多い八戸港、仙台港区、小名浜港等では、コンテナが多く、また、背後に工場や居住地が集中しており、津波高も高かった釜石港、大船渡港などは家屋の残骸が多くみられた。また、港湾周辺に車が駐車されていた港は、車が多く沈んでおり、小型船が比較的多い港は小型船の沈船も多くみられた。さらに、建設作業などを中心に行われていた久慈港、相馬港などでは根固めブロックや消波ブロックなどが多くみられた。これらの航路等の被災実態は表-2.1.1に示すとおりであった。

表-2.1.1 航路等の被災実態

港湾等	調査異常点数	主な海底障害物（異常点撤去物）	調査方法等	NMB等の調査面積 ha, ()**
八戸	938	コケテ多数、製品包装紙、古紙束、車両、トバツク、トク屋根、自販機等	NMB (別途深浅測量)	244.3 (3,136)
久慈	40	L型ブロック、自販機、単管パイプ、小型船、鋼板、門扉等	深浅測量	79.9 (1,736)
宮古	134	木材流出多数及び漁網、水産用機械、車両等	音響測深機	92.9 (540)
釜石	54	車両33台、船舶、家屋・建屋の残骸等	NMB	43.6 (842)
大船渡	236	延縄・筏・ブイ等が塊となり点在、木材等流出多数、車両10台以上、トクカレン等*	深浅測量	9.2 (1,033)
石巻	6	原木、木材等多数	深浅測量	141.6 (1,925)
塩釜	66	漁網20t、漁船レジャーボート多数、車、養殖棚等	NMB、音響測深機	139.2 (5,209)
仙台	493	コケテ315個、車27台、コケキヤア等	NMB、音響測深機	408.1 **
相馬	213	六脚ブロック、トバツク、車、小型船等	NMB	202.9 (1,170)
小名浜	208	車両21台、レジャーボート11、六脚ブロック5基等	NMB、音響測深機	552.5 (1,999)

*）大船渡港は湾口防波堤倒壊により風向きにより漂流物の出入りが多く広範囲の啓開が必要だった

**）（ ）は港湾区域面積、なお塩釜の値は仙台を含む

（2）浮遊障害物の撤去及び封じ込め

1) 浮遊障害物の撤去

被災後、最初に行われるのは、海面の浮遊障害物の撤去である。この工事は交通船、調査船の運行に必要であり、被災後の早い段階から実施された。浮遊障害物撤去の主な方法は、フォークアタッチメント付きのバックホウにて陸上から岸壁際のを掴みあげて撤去する方法と、オレンジバケットを装備した起重機船やガット船（オレンジバケットを備え自航できる船）により掴みあげる方法が用いられた。

2) 封じ込め

浮遊障害物は、広い範囲に分布し、潮流や風により移動するものも多いため、回収は簡単ではない。これに対しては、宮古港や石巻港区において行われた、シルプロテクター（以下「シルプロ」とい



浮遊物封じ込め状況

図-2.1.5 シルプロによる浮遊障害物の封じ込め

う。)を展開して封じ込める工法が効率的だった。図-2.1.5 は石巻港の封じ込めの様子である。この工法に必要な資機材は、2 隻の曳船とシルプロ 1 張が一つのセットとなっていた。この際のシルプロの長さは、主要航路幅の 1 倍程度以上が必要とであった。なお、シルプロで集めた浮遊障害物は、陸揚げされるまでの暫くの間、そのまま海上で囲い込まれていることもあった。

(3) 海底障害物の調査

1) 異常点の把握

海底障害物の撤去に当たっては、まず、海底障害物の位置を把握することが不可欠である。海底障害物の位置の把握方法としては、深淺測量の機器を用いていたが、その中でも多数の音響ビームにより一度に広い幅の測深を行うことができるナローマルチビーム測深器(以下「NMB」という。)を用いていた港が 10 港中 6 港あった。NMB は津波後の海水が濁っている状態の中で、海底障害物の可能性が考えられる局所的に浅くなっている異常な点(以下「調査異常点」という。)の分布を短時間で面的に把握する上で有効な方法であった。なお、障害物の分布把握後には、障害物の状況に応じて、潜水士が障害物を一つ一つ特定し、目印を付け、撤去作業ができる状態にしていたものもあった。

2) 調査工における潜水士船の機能

海底障害物の調査資機材の内、潜水士船隻数及び潜水用コンプレッサの機材数(以下「潜水士船隻数等」という。)は、その後行われる海底障害物撤去((4)に後述)の起重機船による吊上げ方式による撤去との関係が深い。起重機船団数と潜水士船隻数等の関係をみると、主として吊上げ作業が行われている起重機船団数とほぼ同数の潜水士船隻数等となっている(図-2.1.6)。これは、吊り上げ方式による障害物の撤去作業時には潜水士が障害物にワイヤーを玉掛けする作業が発生するため潜水士船隻数等と起重機船隻数とは 1 対 1 に近い関係にあること、及び調査工が吊り上げ方式による撤去工に先駆けて一連の作業として行われていることがよくあることによるものと考えられる。このことより潜水士船隻数等と起重機船団数とがほぼ同数になるように事前に準備しておくことが効率的である。

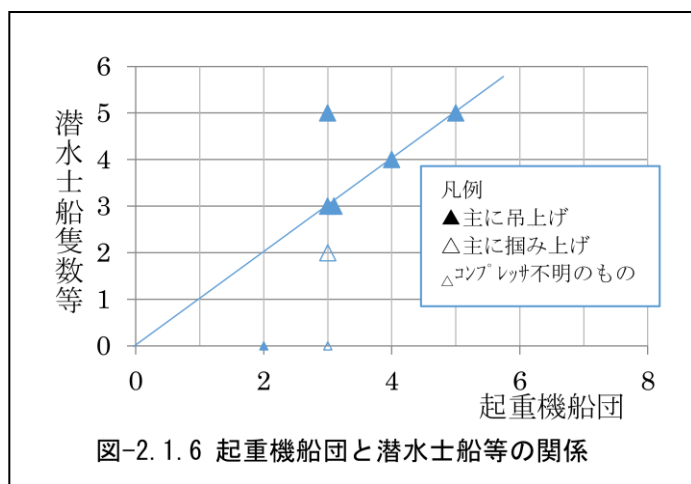


図-2.1.6 起重機船団と潜水士船等の関係

(4) 海底障害物の撤去

1) 作業船団の調達

啓開作業の中心は船団による撤去作業である。各港湾等に投入された啓開作業に用いられた作業船（以下「啓開用作業船」という。）は、一つには起重機船（非自航式）と押船又は曳船が中心となり必要に応じ揚錨船や監視用の作業船等からなる起重機船団である。今一つはガット船団である。潜水士のための潜水士船や、測量船も投入された。その他の支援船としては、作業員が寝泊まりする居住区船、土砂等の輸送が必要となった場合の土運船、起重機船の代用として用いられるクレーン付き台船なども投入されていた。なお、海底障害物及び浮遊障害物の撤去工として、最も多く投入されたのは、起重機船団であった。これらの投入量の全数を港湾別に整理したものを表-2.1.2に示す。

表-2.1.2 港湾等別啓開用作業船の種類と投入量

港湾等	起重船 回数	ガット 船	潜水 士船	測量 船	その他
八戸	5	0	3	2	監視船3
久慈	3	0	2	1	監視船1、交通船1
宮古	3	1	3	0	
釜石	2	1	0	1	監視兼交通船1、曳船兼交通船1、居住船兼給油船、潜水用クブレッサ不明
大船渡	3	1	0	1	潜水用クブレッサ不明
石巻	3	1	3	3	宿泊船1、ガットバージ1
塩釜	7	0	1	0	潜水用クブレッサ不明
仙台	5*	0	0	2	土運船1、居住区船1、潜水用クブレッサ5
相馬	3	0	2	1	潜水用クブレッサ3
小名浜	4**	0	--	1※	居住区船1、潜水用クブレッサ4

*) 塩釜港と2隻重複、**) クレーン付き台船含む、※) 潜水士船と兼ねる、(里立浚渫協会からのヒアリングを元に整理)

2) 海底障害物の撤去方法

撤去方法は、主として2つの方法で行われた。一つは、潜水士が異常点を確認し、障害物を特定し、起重機船を用いて一つ一つの障害物に玉掛け（ワイヤーをしっかりと結び付けること）をして吊上げ撤去する方法（以下「吊上げ方式」という。）で、車、船舶、コンテナ、機械類などが、この方法で撤去された（図-2.1.7）。

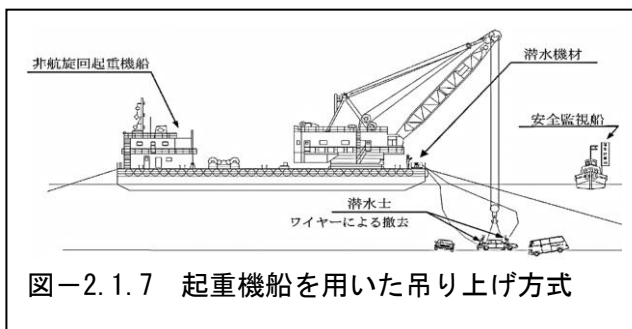


図-2.1.7 起重機船を用いた吊り上げ方式

いま一つは、潜水士が障害物に目印竹などを付けオレンジバケットを装備した起重機船やガット船で掴みあげて撤去する方法（以下「掴み上げ方式」という。）で（図-2.1.8）、沈木

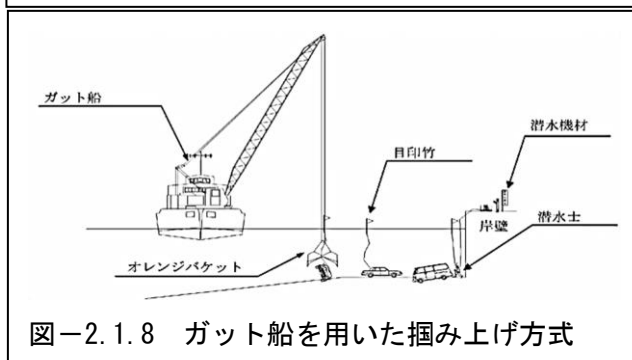


図-2.1.8 ガット船を用いた掴み上げ方式

やコンクリートブロックなど玉掛けが困難なものが、この方法で撤去された。

3) 船団の特性

起重機船団は、吊上げ方式及び掴み上げ方式の両方で利用されており、吊上げ能力も比較的大きく汎用性があるのが特長である。一方でガット船は掴み上げ方式である。しかし、自航(自力での航行)ができるため機動力がある。海底障害物には様々な形状や重量の物があるため、撤去に当たっては、起重機船団での対応を基本とするのが、状況に応じてガット船を有効に活用することも考慮すべきである。

4) 投入船団数と異常点の関係

調査時の異常点数と投入船団数との関係をみると、ここでも、投入船団数と初期調査異常点数との関係には大きなばらつきがあるが、平均では異常点数 57 あたりに 1 船団を投入していた。また、八戸港を除くと、少なくとも異常点数 100 あたり 1 船団は投入していた (図-2.1.9)。

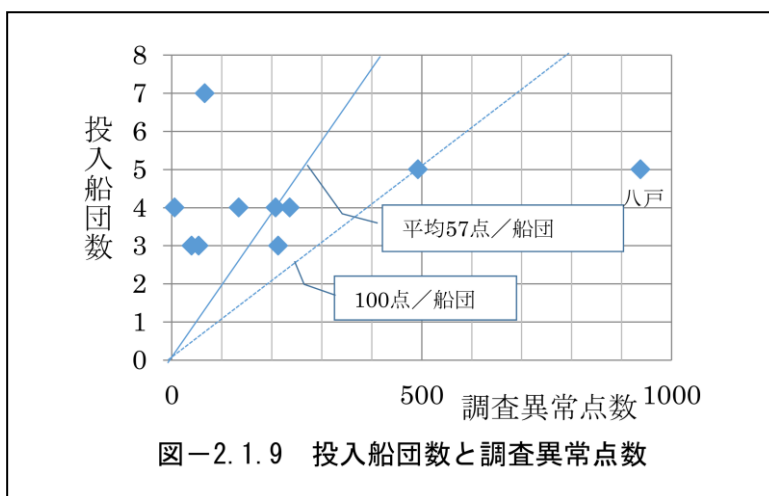


図-2.1.9 投入船団数と調査異常点数

5) 投入船団数と港湾区域面積の関係

港湾区域の面積は浮遊障害物の広がりを表す指標の一つとして考えられるため、投入船団数との関係を調べた。投入船団数と港湾区域の面積とを比較すると、投入船団数と港湾区域面積との関係は港によりばらつきがみられるが、1 船団あたりの平均は 440ha となっている。なお、仙台港区と塩釜港区については、データの関係から合わせたものを用いた。八戸港及び仙台塩釜港が平均値よりも若干広がっているが、概ね 1 船団当たり 500ha 以内になっている。(図-2.1.10)。

これより、投入船団数は少なくとも 500ha 程度あたり 1 船団を想定しておくことが適当であると考えられる。この指標は、他の 2 つの指標 (調査面積及び調査異常点数) に比べ、事前に明らかに分かっている指標であるため、あらかじめ投入船団数を予想するうえで重要な目

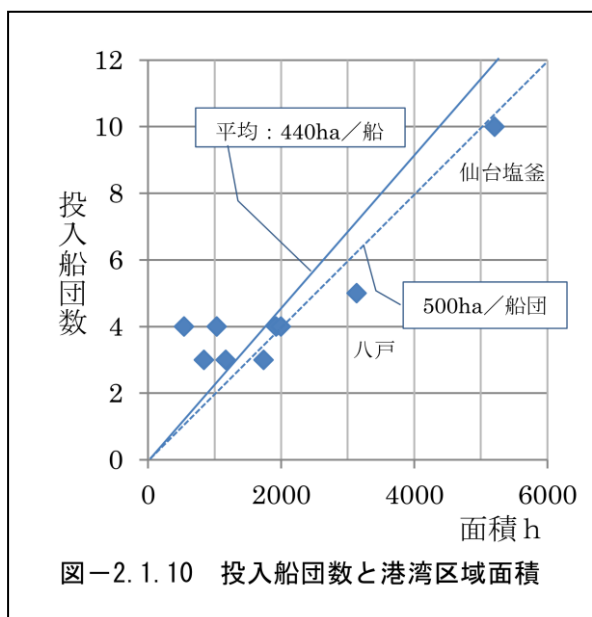


図-2.1.10 投入船団数と港湾区域面積

安となり得る。

(5) 工期（啓開作業開始日と終了日）

発災後 3 ヶ月間における各港湾等の障害物の調査及び啓開作業の日数及びそれぞれの開始日、終了日について調べると、啓開作業の開始は早い港湾では 3 日目であり、大船渡と相馬を除くと 7 日目（1 週間目）には、啓開作業が開始されている（表-2.1.3）。相馬は原子力発電所の事故の影響があったものと考えられ、大船渡は被害が他の港湾よりも大きかったことが考えられる。久慈港を除くと調査開始と啓開作業の開始の間にさほどの期間を要していない。調査と啓開作業は並行的に進められている。また、余震による津波注意報・警報や、天候などの影響により調査・啓開作業が度々行われない日もあり、実調査日数及び啓開作業日数は終了日から開始日を差し引いた日数よりも少なくなっている。また、港湾等の障害物の状況等が異なるため調査日数、啓開作業日数はまちまちであるが、5 港湾が震災後 1 か月以内で作業を終了しており、さらに 3 港湾が 2 か月以内で作業を終了している。

啓開作業終了の時期を、災害の初動段階から復旧・復興段階に入る時期と比較するために、港湾毎の復興会議³⁾（各港湾の災害に対する復旧方針を検討するために地元港湾関係者も参加させて港湾毎に設けた会議）の第一回が開催される時期を同表に整理した。これによると、石巻、仙台塩釜では地震発生後 1 ヶ月以内に開催されているが、開催が遅い港では 2 ヶ月余り経過した後に開催されている。特に早く開催された石巻及び仙台塩釜を除けば、啓開作業終了後に開催されており、啓開作業が終了してはじめて復興作業を本格的に開始した港が多い。

(6) 作業船の調達先（作業船の基地港）

さて、航路啓開に投入された作業船は、東北地方整備局と災害協定を結んでいた社団法人日本埋立浚渫協会の構成会社が、当局の要請に応じて被災地域外から結集したのも多くみられた。しかし、被災地域内で津波被害を免れた作業船も投入されている。実際に啓開作業に投入された起重機船 30 隻の基地港を分析してみると、図-2.1.11 に示すように被

表-2.1.3 調査及び啓開作業日数

港湾等	調査			啓開作業			復興会議第一回
	開始日	終了日	実調査日数	開始日	終了日	啓開作業日数	
八戸	7	33	9	10	59	27	73
久慈	3	19	10	10	20	10	63
宮古	4	31	10	3	27	20	68
釜石	3	17	10	4	17	12	62
大船渡	9	20	8	8	21	14	68
石巻	6	48	25	9	64	43	21
塩釜	5	41	21	6	43	30	22
仙台	3	62	16	4	71	48	22
相馬	16	38	13	18	48	20	41
小名浜	7	27	15	9	28	18	35

注) 開始日および終了日は震災発生日から数えた日数

(東北地方整備局からのヒアリングをもとに整理)

災地域内を基地としている起重機船が6割を占めていた。また、被災地域外からはガット船やガットバージも5隻投入されているが、これを加えても概ね半分の船は被災地域内を基地としている船であった。また、地域外から投入された起重機船の基地港を見ると、北海道や関東、日本海側の北部など、被災地域に比較的近い地域から来た船が多くみられた。これらのことから、特に津波被災後の啓開作業では、ある程度は港についての知識のある船員等が乗っていることが好ましいものと考えられる。このためには、被災地域内及び被災地周辺の作業船の津波による被害を低減することが重要になってくる。

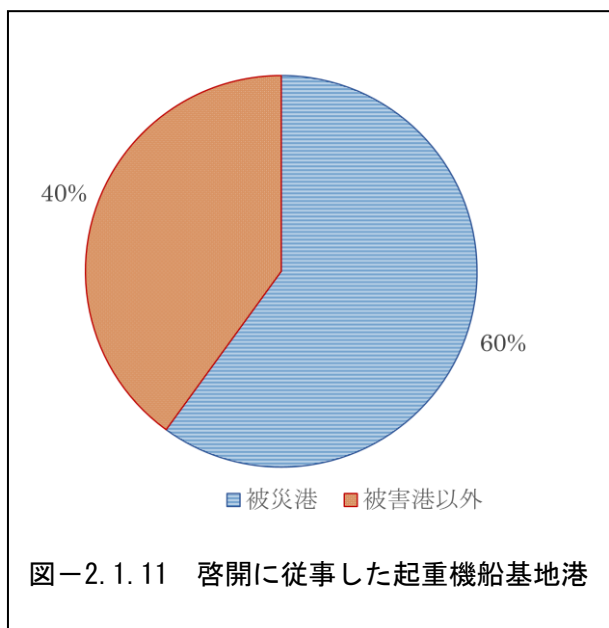


図-2.1.11 啓開に従事した起重機船基地港

(7) 啓開作業のための作業船団の確保

以上のように航路啓開作業の実態と作業船の活動についてみてきたが、航路啓開の作業を行うために、主な作業を行う起重機船やガット船（以下「主作業船」という。）はもちろんであるが、補助的な役割をする潜水土船や調査船など（以下「付属作業船」という。）と船団を構成していた。一連の啓開作業において主作業船だけでなく付属作業船も重要な役割を果たしていることが明らかになった。

また、津波の規模にもよるが、東日本大震災時の津波と同程度の津波が来襲した場合には、港湾区域の広さや津波来襲後の海底障害物の調査で把握した異常点の数などに応じて、航路啓開のための作業船団数を確保することが重要であることが明らかになった。

また、航路啓開作業の開始時期と、震災後の第一船の入港時期との関係を見ると、相馬港を除くと、航路啓開の調査が開始された後に初めて第一船が入港していた（表-2.1.4）。

表-2.1.4 啓開開始日と第一船入港日

港湾等	海上保安庁 調査開始※	啓開		第一船入港			
		調査開始	作業開始	入港日	船名	所属	主な貨物等
八戸	16日	18日	21日	18日	HAO HENG8 第二テトラ丸	— (船富士サルベージ)	ドロマイト鉱
久慈	—	14日	21日	26日	白山	北陸地方整備局	支援物資
宮古	15日	同左	14日	16日	白山	北陸地方整備局	支援物資
釜石	14日	同左	15日	16日	清龍丸	中部地方整備局	発電機・食料
大船渡	20日	同左	19日	23日	清龍丸	中部地方整備局	食料・水・日用品
石巻	23日	17日	20日	23日	第112福一丸	福一漁業(株)	救援物資
塩釜	17日	16日	17日	21日	鶴宏丸	旭タンカー(株)	ガソリン等
仙台	15日	14日	15日	17日	海翔丸	九州地方整備局	緊急物資等
相馬	25日	27日	30日	20日	いず	海上保安庁	重病患者8名
				25日	海翔丸	九州地方整備局	食料、生活用品、水等
小名浜	26日	18日	20日	18日	おおすみ	海上自衛隊	毛布、水、おむつ等

注)国土交通省東北地方整備局からのヒアリングをもとに整理 (調査開始日等はいずれも3月)

※)海上保安庁災害対応水路測量班:海洋情報部研究報告 第49号より

なお、相馬港は航路啓開作業開始前に第一船が入港しているが、海上保安庁の船による人命救助のための緊急輸送であり特別な状況であると考えられる。第一船の多くは、被災地に水や食料、医薬品などの救援物資を届けるための船であり、国土交通省の地方整備局の船や海上保安庁、自衛隊の船などであるが、塩釜にはガソリン等を運ぶ民間の船が入っている。震災直後の被災者の生命や最低限の生活を確保するうえでも啓開作業の早期開始が重要であることが改めて明らかにできた。

さらに、第一回復興会議が先行的に行われた仙台・塩釜・石巻港と、航路啓開に時間を要した相馬港を除くと、第一回の回復興会議の前に啓開作業が終了しており（表-2.1.3）、災害からの復興を本格的に議論する前に航路啓開を終わらせることが重要であると考えられる。このためにも航路啓開のための作業船を確保することが重要である。

なお、航路啓開に活躍した作業船は、起重機船が中心でガット船が補完する形で使われていた。しかし、平成 25 年の港湾法の一部改正により、非常災害時における港湾機能の維持に資するよう、「国土交通大臣が障害物の除去を行うことにより啓開できる航路」を定める制度が創設された。これに伴い、緊急時に必要な場合には、コンテナや車など津波で流出し航路内に沈んだ海底障害物を所有者の許可なく撤去でき、撤去時の破損は保障等により措置できる制度が設けられた。このため、今後、緊急を要する航路啓開時には、グラブにより掴み上げるグラブ浚渫船やガット船が活躍する機会も増えるものと考えられる。

2.1.4 災害復旧活動に伴う作業船の増加

前項 2.1.3 では航路啓開作業における作業船の役割を見てきたが、港湾の災害復旧段階においても、作業船は重要な役割を果たしている。災害復旧段階で投入される作業船の種類や量は、港湾施設などの被災の状況によって異なるため、災害の規模などに応じた作業船の必要投入量を一般的に示すことは難しい。

しかし、東日本大震災前後に被災地域に在港している主要な 13 船種の作業船の隻数の変化をみると、震災前に比べて震災後に大幅に増えており、震災 2 年後には震災前の倍近くになっていた。また、船の種類についても航路啓開作業では起重機船とガット船が主なものであったが、災害復旧段階ではグラブ浚渫船やコンクリートミキサー船、ケーソン製作用作業台船、土運船など多くの船種が投入されていた（表-2.1.5）。

このようなことから、作業船が災害復旧の段階でも重要な役割を果たしていることは明らかである。

表-2.1.5 震災前後の作業船の在港隻数の変化

船種	2011年3月	2012年3月	2013年3月
ポンプ浚渫船	5	1	1
バックホウ浚渫船	0	1	0
クレーン浚渫船	2	6	11
リクレーマ船	0	1	2
起重機船	22	18	40
クレーン付台船	4	6	6
コンクリートミキサー船	2	2	7
ケーソン製作用台船	5	10	12
土運船	6	15	12
杭打船	1	3	0
サトコンパクション船	0	0	1
合計	47	63	92
注1) 東北地方太平洋側及び茨城の港湾等※			
※ 八戸、久慈、宮古、釜石(大槌含む)、大船渡、気仙沼、石巻、仙台塩釜、福島、相馬、小名浜、茨城(那珂、波崎含む)			
注2) 作業船情報提供サービスに登録の13船種の在港隻数			

2.1.5 作業船の役割と津波被害低減対策の重要性

東日本大震災時の実態をみると、震災時には被災地域内の作業船も啓開作業などに投入されていた。今後発生が予想されている東海、東南海、南海トラフなどの大地震時には、大きな津波の来襲が予測されている東海・南海地方の太平洋沿岸の港湾や三大湾内の港湾では作業船の在港隻数が多いことを考えると、これらの作業船の津波による被害を少しでも低減することが重要な課題であるといえる。

前項 2.1.4 では、東日本大震災後の航路啓開や災害復旧の実績の資料を基にして、作業船が災害から港湾機能を回復させるために重要な役割を果たしていることを述べてきた。また、必要な作業船団の確保や、震災後の作業船団の早期投入の必要性についても明らかにし、被災地域内の作業船や被災地域周辺の作業船が活躍している実態を示した。

今後の南海トラフで発生が予想される大規模地震に伴う津波に備えて、作業船がその重責を担うためにも、津波来襲に対する作業船の被害低減対策を早期に確立していく必要がある。

以上を要約すると以下のとおりである。

- ・港湾は津波を伴う大震災後も緊急物資の輸送や地域経済の復興のために重要な役割を果たしている。特に、今後発生が予想されている東海・東南海・南海トラフなどの大規模地震時には被災地の支援はもちろんであるが、我が国の経済の復興のためにも港湾機能の早期回復は重要である。
- ・港湾機能の早期回復には、航路啓開や災害復旧が不可欠であり、一定量の作業船団を確保する必要がある。
- ・東海・東南海・南海トラフなどの大規模地震時に被害が予想される地域は、作業船が

多く在港している地域であり、これらの作業船が航路啓開や災害復旧にとって重要な役割を担うことになるため、作業船の津波被害低減対策を早期に確立する必要がある。

2. 2 我が国の作業船の現状

本節では我が国の作業船の役割や種類を明らかにし、その特徴を取りまとめた。

2.2.1 作業船の役割と公的性格

作業船とは、海上または海中の工事や作業を行うため建設機械等を搭載した船の総称である。

四面を海に囲まれた我が国は、物流や産業を支えている港湾と漁港とを合わせると 4,000 弱の港を有しており、世界有数の港大国である。作業船はこれらの港の建設工事や修繕工事を行う際に用いられる船であり、また、巨大津波を伴う大規模地震後の航路啓開作業や災害復旧工事などにも利用される船である。

近年、港湾・漁港の整備や臨海部での橋梁架設においては、構造物の大型化や、大水深、大波浪、軟弱地盤などの過酷な条件下での工事が求められてきている。また、施工の省力化や海域環境の重視など社会のニーズも多様化している。これに伴い作業船もその能力や機能が多様化してきている。すなわち、重量物の吊り上げ・据え付けや、航路の浚渫、地盤改良、海上での大量のコンクリートの打設、重量物や土砂等の運搬、海上での杭の打設などのため様々な作業船が開発され、港湾の開発や臨海部の橋梁の架設、臨海部の空港の整備、漁港の整備等のために使われてきた。

作業船は、港湾や漁港の開発をはじめとした臨海部の開発に深く関係しており、臨海部の開発にはなくてはならない機材となっている。また、海洋国家である我が国が今後の海洋開発を進める上でも、重要な役割を果たすことが期待される機材でもある。

これらのことより作業船は、港湾や漁港の整備等の公共事業と関係が深く、民間が所有しているものが大部分ではあるが、公的性格の強い船である。

東日本大震災後の航路啓開やその後の災害復旧などで作業船は大いに活躍した。その内容は 2.2 節で後述するが、津波災害発生以後の早い段階で作業船が重要な役割を果たした。作業船の活躍は、最終的には港の利用者や港の恩恵を受けていた企業や住民に便益を与えるものである。また、港の管理を担い、かつ、航路啓開や災害復旧の最前線に立っている港湾管理者にとっても、作業船は必要不可欠な機材であり、港湾管理者の活動を支えている国の港湾整備部局にとっても作業船の調達は最初に行わなければならない最も重要な災害復旧活動の一つである。

つまり作業船は、津波や高潮などの臨海部の大災害が発生した場合には、公的に重要な役割を担う必要不可欠な船である。

このような作業船の役割を十分に理解し、今後の臨海部の開発や海洋開発に支障が無いよう、かつ、いざという津波災害時にもその能力を発揮できるよう、作業船を維持・保全できる体制等を整えることが重要である。通常時と併せて、津波災害時にも作業船の能力が発揮できるように、作業船所有者だけでなく港湾管理者や国の港湾部局等もそれぞれの立場を踏まえ、協力して必要な準備や対策に取り組むべきである。

2.2.2 作業船の種類

日本建設機械要覧¹⁰⁾において作業船は、浚渫埋め立て用作業船、構造物工事用作業船、付属船、調査船、環境整備用作業船、水中作業機械の6種類に大きく分類されている(図-2.2.1)。

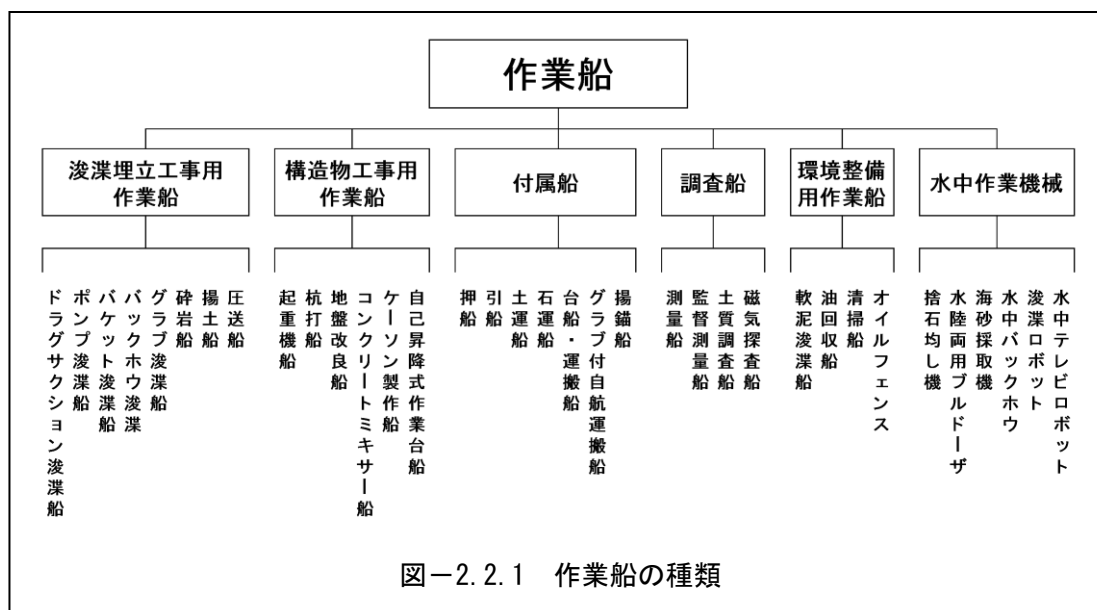


図-2.2.1 作業船の種類

浚渫埋立工事用作業船にはグラブ浚渫船やドラグサクシオン船、ポンプ浚渫船、砕岩船、リクレーマ(揚土)船などがある。構造物工事用作業船は、起重機船、杭打ち船、コンクリートミキサー船、地盤改良船、ケーソン製作用業台船などがある。付属船には押船、引船、土運船、グラブ付自航運搬船(以下「ガット船」という。)、揚錨船などがある。調査船には測量船や土質調査船、磁気探査船などがある。環境整備用作業船には油回収船や清掃船、オイルフェンス展張船などがある。水中作業機械には水中バックホウや浚渫ロボット、水中テレビロボットなどがある。

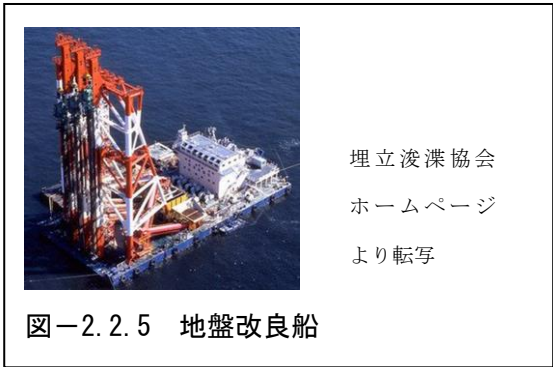
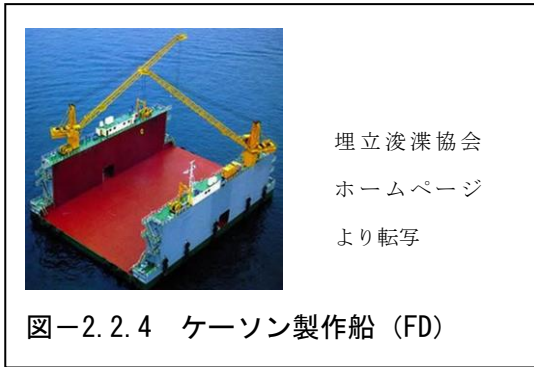
作業船には様々な形状がある。一般の船舶と異なる形状や機能を持つ作業船の幾つかを示す。構造物工事用作業船の中の起重機船を図-2.2.2、グラブ付自航運搬船(以下「ガット船」という。)を図-2.2.3、ケーソン製作船(FD)を図-2.2.4、地盤改良船を図-2.2.5に示す。



図-2.2.2 起重機船 (第78栄進)



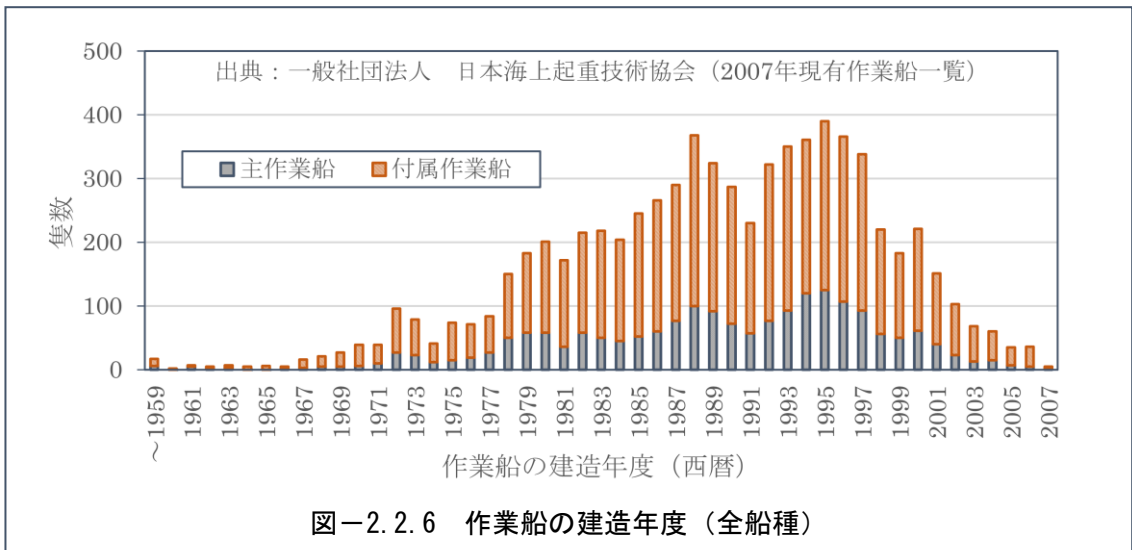
図-2.2.3 ガット船 (第12勝栄丸)



作業船を航行能力で分類すると、自力で航行ができる自航式の船（以下「自航船」という。）と自力では航行ができない非自航式の船（以下「非自航船」という。）とに分けることができる。自航船については、法律に基づき一般の船舶のように船籍港を有しているため隻数の把握は可能であるが、非自航船については、法律上船舶とみなされないため総隻数を正確に把握することは難しい。しかし、日本作業船協会が2年に一度調査を行っているなかで、概略の全体像を把握でき、2007年時点で作業船は7,000隻余りの作業船がある。

作業船を工事の中の役割で分類すると、工事の中心的な役割を果たす起重機船や運搬船などの主作業船と、主作業船を支える引船や交通船、潜水士船などの付属作業船に分けることができる。

作業船の建造年をみると、主作業船と付属作業船は同じような傾向がみられる。1988年と1995年にピークがみられ、その後は建造隻数が減少傾向にあり、特に西暦2000年以後に建造された船は著しく少なくなっている。また、船齢が比較的高いものが多くなっており、更新が進んでいない。(図-2.2.6)。



2.2.2 主要な作業船の種類別隻数と規格

作業船の種類別の隻数を分析すると、最も隻数が多いのは監督船・交通船・測量船などの調査船であり、次いで引船や押船、台船・運搬船、揚錨船、土運船などの付属船である（図-2.2.7）。これらの船の内、土運船と台船を除けば、大部分が自航船であり、小型の船である。この種の作業船は、津波来襲時などの異常時でも、通常の小型船を同じ対応が可能である。

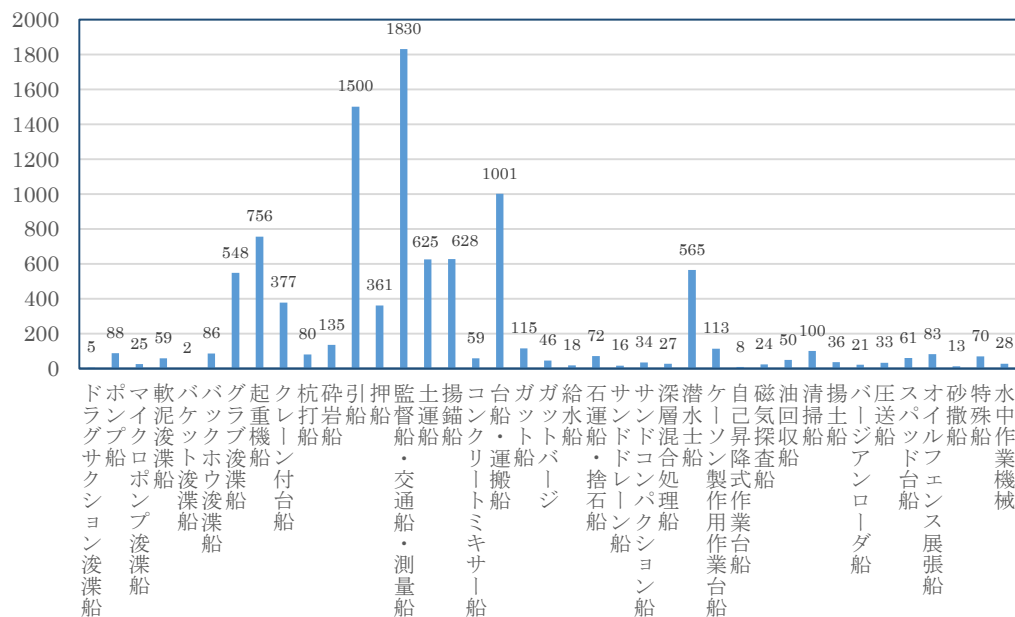


図-2.2.7 船種別現有作業船と隻数（現有作業船一覧2007年）

一方、工事の中心的な役割を果たす浚渫埋立工事用作業船や構造物工事用作業船の中で一番隻数が多いのは起重機船であり、その次がグラブ浚渫船である。これらの船については、ドラッグサクシオン船やコンクリートミキサー船などの一部の船種を除けば、そのほとんどが非自航船であり、船の形状も特殊で、大きさも浚渫能力や吊り上げ能力などの作業船の規格に応じてまちまちである。

全国作業船一覧¹¹⁾のデータの内、規格が明らかなものについて主作業船の船種別、規格別の隻数を分析すると、大きさや規格が多様多様であり、ばらつきも大きいことが分かる。

主作業船の中で最も隻数が多い起重機船については、規格が明らかな 517 隻のうち自航式は僅かに 10 隻で、ほとんどが非自航式である。これを規格別にみると、70t 吊り未満から 450t 吊り以上までを 5 階層に分けると、最も多い階層は 70t 以上 150t 未満の階層となり 171 隻ある。次いで 150t 以上 250t 未満の階層で 135 隻ある。また、最大の吊り能力の船は 4,100t まであり、同じ起重機船でも大小様々である。

その次に多いグラブ浚渫船では、376 隻のうち自航式はわずかに 7 隻しかなく、ほとんどが非自航式である。規格はグラブの容量が 5 m³未満のものから 23 m³以上のものまで 4 階層に分かれている。最も多い階層は 5 m³未満のもので 203 隻ある（表-2.2.1）。

このように作業船の大きさや規格は様々なものがあり、これらの作業船は、工事の場所や規模に応じ使い分けられているのが特徴である。

表-2.2.1 作業船の規格別大きさと隻数

船種	規格		単位	平均船長 (m)	平均船幅 (m)	平均喫水 (m)	隻数	備考	
	範囲								
グラブ浚渫船(自航)	~	5.0	m3	39.3	15.0	2.1	7		
グラブ浚渫船(非自航)	~	5.0	m3	39.5	15.5	1.3	203		
	5.0	~		15.0	51.8	19.7	1.7	85	
	15.0	~		23.0	56.6	21.2	2.1	38	
	23.0	~			63.1	24.5	2.5	43	
バックホウ浚渫船	~	1.0	m3	17.7	7.3	0.7	15		
	1.0	~		2.0	24.3	9.6	0.9	25	
リクレーマ船	~	3200	PS	54.7	20.2	1.7	7		
	3200	~			82.6	27.6	1.9	8	
バージアンローダー船	~	2000	PS	38.0	12.0	1.5	5		
	2000	~			45.8	12.7	1.9	7	
空気圧送船	~	2000	PS	18.2	11.2	0.9	18		
	2000	~		6000	52.9	19.9	1.6	9	
	6000	~			61.3	25.6	1.9	12	
起重機船(自航)	~	50	t吊	24.3	9.6	1.6	14		
	50	~		100	35.2	13.7	1.7	5	
起重機船(非自航)	~	70	t吊	49.9	19.6	2.2	5		
	70	~		150	35.1	14.1	1.2	103	
	150	~		250	44.3	17.5	1.4	171	
	250	~		450	51.3	20.0	1.6	135	
	450	~			60.8	22.6	1.9	71	
杭打船	~	405	kW	90.3	36.6	3.5	27		
	405	~		900	34.4	15.1	1.5	7	
	900	~			46.9	20.2	1.5	13	
コンクリートミキサー船 (バッチ式)	~	1.5	m3	66.8	27.1	2.5	12		
	1.5	~		2.5	40.0	17.2	1.8	11	
	2.5	~			47.7	19.7	2.8	7	
コンクリートミキサー船(コ ンティニアス式)	~	45.0	型	60.1	23.3	4.4	7		
	45.0	~			33.7	14.3	2.3	3	
ケーソン製作用台船	~	3200	t積	42.1	18.8	2.7	5		
	3200	~		6000	33.7	26.5		12	
	6000	~		7000	47.9	34.1		28	
	7000	~			56.2	38.0		10	
深層混合処理船	~	2.2	m3	77.4	42.6		11	デッキハージ2隻含む	
	2.2	~		5.7	35.3	14.2	1.4	10	
	5.7	~			53.1	24.9	2.3	10	
サンドドレーン船	~	6.0	連装	54.6	28.9	3.1	4		
	6.0	~		12.0	66.3	28.7	2.3	10	
サンドコンパクション船	~	35.0	m	72.8	35.0	2.6	4		
	35.0	~		55.0	47.5	19.5	1.9	2	
	55.0	~			63.2	27.9	2.3	19	
				68.7	30.4	2.5	7		

※現有作業船一覧(2011年版)から算出した。
 ※港湾土木請負工事積算基準(赤本)を元に規格を分類した。
 ※使用が不明の船舶があり、隻数の集計表と合計は一致しない場合もある。

2.2.3 非自航式の作業船の特徴

(1) 形状の特徴

作業船の形状の特徴としては、非自航式の作業船において一般の船舶と異なり、矩形の物が多い。グラブ浚渫船や起重機船では、矩形の台の上に起重機やグラブバケットを乗せ

た形状をしている。この特徴は地盤改良船にも当てはまる。また、ケーソン製作用業台船（一般には「フローティングドック（FD）」という。）もまた作業を行っていないときは矩形の作業台が浮いている状態である。これらの作業船は一般的に喫水が比較的浅いことも特徴である。起重機船では250t吊以上450t吊未満の船でも平均喫水は1.9mである。一般に作業船は船上の機械を使って工事をすることが主な目的であり大量の貨物を運ぶ貨物船などと異なり喫水が浅いものが多い。前掲の表-2.2.1の作業船の喫水を見ると明らかのように、例えば地盤改良船などの比較的大きな規模の作業船でも喫水が3m以下のもの多くみられる。

（2）稼働の特徴

作業船の稼働の実態についても一般の船舶とは大きく異なる特徴がある。貨物船などは貨物の輸送を低コストで行うため、船舶の稼働率がかなり高いのが一般的である。このため海上を航行している時間が長く、貨物の積み下ろしのため岸壁に接岸している際に船員が船の中に残っている場合が多い。一方、作業船は工事が無い時には当然のことながら動かさないことが多い。また、工事や作業の種類、規模に応じて船が作られているため、工事が行われていても、作業の内容や規模によって作業船の出番は限られている。国土交通省港湾局が作業船の損料を算定するためにまとめた実態調査によると、主要な作業船の供用日数は、最も供用日数が多い起重機船でも、年間165日程度であり1年のうち半年以上の期間は供用していない。また、グラブ浚渫船や地盤改良船、ケーソン製作船などは115～120日であり、年間の1/3の期間しか供用していない。また、荒天時や船員の休日等を除いた運転日数になると更に少なくなる。引船や

表-2.2.2 主な作業船の稼働状況

作業船の種類		運転時間 (時間)	運転日数 (日)	供用日数 (日)
主作業船	グラブ浚渫船	560	70	115
	起重機船(非自航式400t吊り未満)	600	100	165
	地盤改良船(深層混合船)	980	70	120
	ケーソン製作台船(FD)	-	-	120
付属 作業船	引船	1,040	130	215
	潜水土船	-	100	185
	揚錨船	-	100	165

※平成26年度船舶及び機械器具等の損料算定表(国土交通省港湾局)より抜粋

船などの付属作業船については、供用日数は主作業船よりも多く、引船は200日を

超えているが、それでも運転日数は100～130日である。このように、作業船は一般の貨物船等に比し、稼働していない時間帯が長いため、岸壁や水域などに係留している時間が長いのが特徴である(表-2.2.2)。

（3）係留時の特徴

非自航式の作業船の係留時の特徴については、非自航船は法律적으로는船舶ではなく建設機械の性格を有するため、工事に従事していない作業船は、単なる建設機械的なものとみなされる。通常は船員が常駐することはなく岸壁や水域などに係留されている場合が多い。

工事がある時だけ船員が乗り込み稼働させることとなる。このため、稼働していない（工事が無い）期間の作業船が突然の大規模地震に伴う津波の来襲にあった時には、非自航船であり、船員も乗り込んでいない状態からの対応となるため、短時間で港外に退避することは不可能に近い。

2.2.5 作業船の現状のまとめ

以上より、作業船は多種多様であるが、一般の船舶と比べて特徴的な点は以下のとおりである。

- ① 作業船は、公的性格の強い船であり、港湾や漁港の整備や海洋開発や大規模な津波災害時の航路啓開、災害復旧に欠かせない。
- ② このため、作業船所有者はもちろん港湾管理者や国の港湾整備関係部局等も協力して作業船がその役割を果たせるように常時から必要な準備や対策を整えておくべきである。
- ③ 浚渫埋立工事用作業船や構造物工事用作業船は、そのほとんどが非自航船である。
- ④ 非自航式の作業船の形状は、矩形で喫水が浅いものが多い。
- ⑤ 非自航式作業船は工事に従事していない時間が比較的長く、通常は船員が常駐することなく岸壁や水域に係留されている場合が多い。
- ⑥ 作業船係留時に突然大規模地震に伴う津波の来襲を受けた場合は、短時間で港外へ退避することは不可能に近い。

作業船の津波被害低減対策は、このような作業船の特徴を十分に踏まえて検討する必要がある。

2. 3 東日本大震災に伴う津波による船舶の被災実態と作業船の被害実態

作業船の津波被害低減対策を検討するにあたって、津波来襲時の作業船の被災実態を把握する必要がある。作業船の津波による被災事例は必ずしも多くないため、一般船舶の津波による被災実態や、津波来襲にも関わらず大きな被害を受けなかった船舶についても実態を把握し、作業船の津波被害低減対策の検討において有意義な情報とする。

本節では、まず東日本大震災に伴う津波による一般船舶の被害実態を明らかにするとともに津波の来襲にもかかわらず被害を受けなかった（又は軽微な被害しか受けなかった）船舶の事例についても合わせて明らかにする。次に、作業船について東日本大震災に伴う津波は勿論、それ以前の津波による被害も含めてその実態を明らかにする。これらの被災実態を踏まえて今後の作業船の被害低減対策の方向性について取りまとめることとする。

2.3.1 東日本大震災時の津波による船舶被害実態

(1) 船舶被害の全容と津波来襲時の船舶の行動

東日本大震災時の船舶被害の実態については、様々な報告がされている。

岡本修¹²⁾は東日本大震災時の港内船舶の被害実態の全体像を取りまとめている。これによると、港外に避難した船舶のうち被害のなかった船舶が88%であったのに対し、港内にとどまった船舶のうち78%が何らかの形で被害を受けたことが取りまとめられており、津波来襲時の船舶の被害低減のためには港外に退避することが基本であることを改めて示している。また、港内残留船舶被害率と津波高さの関係も整理し、港内津波波高が高いほど被害率が高くなることを分析している。岡本修は、富田・廉ら¹³⁾がSTOCモデルで算定した各港湾でのシミュレーションによる津波最大高さ及び津波最大流速と、津波来襲時に港内に係留していた船舶の被害との関係を分析し、船舶の係留場所の津波高さや最大流速の大きさが船舶被害の発生の有無に大きく影響していることを述べており、4m/sを超えると被害の重い船舶が見られるようになることを示している。

東日本大震災に伴う津波来襲時の船舶行動実態については、日本海難防止協会が取りまとめた海と安全 No552 の「(特集) 3.11 巨大地震と大津波の教訓を伝える」や近畿運輸局が平成23年9月に取りまとめた「津波に遭遇した船の行動事例集」が、具体的事例の多さや内容の質などからみて秀逸である。これらの資料の多くが大津波が迫る中で船舶の港外への退避の経験を報告したものである。ただし、その中でも岩崎正幸の「大船渡港での地震津波遭遇状況報告」¹⁴⁾や恩田裕治の「港内における津波遭遇報告」¹⁵⁾は、港外退避が間に合わず、結果として港内で大津波を経験することとなった事例を報告している。どちらの事例も岸壁に係留していた船を離岸させ、港内で津波の押波や引波に対処しており、港湾内の船舶が津波の来襲を受けた場合に、被害を免れる又は低減するためには、船員が力を合わせて対処するなど大変な努力が必要であることが記述されている。また、自航が可能で船員が乗船していても津波来襲時の安全確保が容易ではないことが示されている。

これらの報告や研究は、船舶の津波被害低減対策を検討するうえで大きな示唆を与える

ものであるが、基本的には大津波の際には港外に退避することが有効であることを示している。しかし、非自航式の作業船の場合は2.2節で記述したように港外への退避が困難であり且つ通常の船舶に比し特異な形状をしているため、津波被害低減対策を検討するにあたっては非自航式の作業船の特徴を踏まえた対応が必要となる。

(2) 津波による被災の有無（マリンゲート塩釜等の事例）

港湾内に係留されていた船が津波の来襲にもかかわらず被災を受けなかった事例を被災を受けた事例と比較しつつ分析することは、港外退避が難しい非自航式の作業船にとって重要な情報となり得る。

東日本大震災時の津波により被災を受けなかった事例としては、塩釜港のマリンゲート塩釜の浮体式棧橋に係留していた観光遊覧船がある（図-2.3.1）。浮体式棧橋以外の場所に係留していた周辺の小型船が乗り上げ、座礁などをする中で、観光遊覧船は増し舳いを通常の2倍にして繋いだだけで、被災から救われた。その様子は「浮棧橋に救われた松島観光の遊覧船」¹⁶⁾に報告されている。村田一城、増田光一、増田光弘、居駒知樹は、現地調査等を行い、当時の係留の状況や被害状況等を整理している。この資料を基にした分析については、第4章に詳しく示すこととするが、浮体式棧橋への係留は津波による被害低減対策の候補の一つとして検討に値する。

また、徳島県庁が行った、東日本大震災時のいわきサンマリーナ、大洗マリーナ、銚子マリーナの3マリーナの被害事例等の分析¹⁷⁾によると、浮棧橋は水位と同調するため、杭から抜けなければ、係留艇・棧橋ともに損傷は少なく、流出による2次災害の可能性は低



図-2.3.1 津波来襲時のマリンゲート塩釜の浮体式棧橋に係留している観光遊覧船（津波第一波実録 2011.3.11 東日本大震災マリンゲート塩釜から撮影 <http://www.youtube.com/watch?v=htYaz909e48> より転写）

いことと、水位と同調しない係留方法（係留環・アンカー等）は津波高さや津波の流れに抗しきれず、漂流・流出・沈没する可能性が高いことが総括されている。このことは、津波に対する浮体式棧橋の有効性を示すものとして、マリンゲート塩釜の事例とも共通する点があるが、小型の作業船の被害低減対策に対して重要な示唆を与えるものとなっている。

五十嵐一馬氏は「住友金属物流船団の津波対応」¹⁸⁾の中で、鹿島港の北水路及びそれに接する小港湾において地震発生時に13隻が着岸していたが、2隻が沖合に避難し、残り11隻が着岸したまま乗組員が陸上避難し、そのうち3隻が損傷を受けた実態を報告している。これらの船はほぼ同じ総トン数の船であり、係留についてもそれぞれ増し舳いなどの安全

対策を施していたが、索が破断し漂流したものと漂流しなかったものに分かれており、港湾内の係留場所によって津波時の影響が異なることを実証する事例となっており、係留場所の選択が被災を免れる上で一つの重要な要素となっていることを示唆している。

2.3.2 津波による作業船の被害実態

(1) 東日本大震災時の作業船の被害実態

東日本大震災時の津波による作業船の被害については、まとまった報告資料が無いが、いくつかの報告書などにその実態を垣間見ることができる。まず、海上保安庁が取りまとめている「東日本大震災への対応の記録」¹⁹⁾によると、発災から10ヶ月(2012年1月11日)の時点で漂流船舶を506隻発見し、そのうち使用可能性のある船舶85隻を曳航救助したが、このうちの20隻が大型作業台船などであるとしている。その中には、漂流した建設作業用大型作業台船を犬吠埼東方沖360海里付近の海上で発見し、曳航したものもある(図-2.3.2)。また、港湾空港技術研究所が2011年4月にまとめた2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報⁴⁾によると、久慈港の諏訪下外防波堤周辺でフローティングドック(ケーソン製作用作業台船)が半分沈没(図-2.3.3)



図-2.3.2 漂流作業船の曳航状況¹⁹⁾



図-2.3.3 FDの被災²⁰⁾

していたことや、釜石港において港奥に係留されていたフローティングドック3隻のうち、1隻は元あった場所に座礁、1隻は港内にて座礁、最後の1隻は港外(港口防波堤の外)南方かなり遠くの海岸まで漂流して座礁していたとの記録がある。更に、日本港湾協会がまとめた「よみがえれ港湾 3.11 東日本大震災の記録」²⁰⁾によると八戸港河原木地区において陸に乗り上げた土運船(図-2.3.4)や、久慈港下諏訪地区のフローティン



図-2.3.4 土運船の被災²⁰⁾

グドックの水没の写真が掲載されている。

このように作業船の被害状況を整理すると、作業船の主な被害は、座礁する被害と、係留索が破断し漂流する被害であることがわかる。これは、作業船の喫水が浅く陸上へ乗り上げ易いことや、津波外力による係留索の破断により漂流が多く生じていることを示している。

(2) 日本海中部地震による作業船の津波被害実態

過去における作業船の津波による被害については、それほど多くの事例があるわけではないが、日本作業船協会が日本海中部地震に伴う津波によって能代港などで被害を受けた作業船について整理している²¹⁾。それによると、62 隻が被害を受け、40 人が死亡している。被害の内訳は転覆 7 隻、乗り上げ 14 隻、流出 4 隻、沈没 26 隻、その他（衝突、浸水等）11 隻であった。主な作業船の被害状況の詳細は以下のとおりである。

- ・自航起重機船が 1 隻アンカーロープ破断により船底を破損、1 隻は沖合へ避難し事なきを得る。
- ・台船が漂流、座礁し船底を破損。
- ・潜水士船がほとんどの船が転覆、沈没。
- ・引き船・揚錨船は転覆や沈没した船無し。
- ・ガット船が 1 隻、第 1 波でケーソン上に打ち上げられ、第 2 波で堤防内に押し流されて沈没。3 隻は沖に避難して事なきを得る。1 隻は防波堤内の津波遮蔽域に入り無事。
- ・コンクリートミキサー船が防波堤内の津波遮蔽域におり無事。

これらを見ると、非自航船はロープが破断し漂流したものや、乗り上げて座礁したものなどが多くみられる。また、潜水士船は小型漁船と形状が似ていることもあり、転覆、沈没など小型漁船の被害と類似している。

2.3.3 被害実態からみた作業船の津波被害低減対策の方向性

上記 2.3.2 項でみてきたように、作業船の津波による被害は、自航船の場合は通常の船舶の被害と似ているが、非自航船の場合は係留索が破断され漂流するものと、陸上などに乗り上げるものが多い。これは、非自航式の作業船の形状が矩形で喫水が浅いことが影響しているものと考えられる。このため、対策としても自航船の場合は一般船舶と類似の対応でよいが、非自航船の場合は、漂流防止や陸上乗り上げを防止するための工夫が特に必要になると考えられる。また、対策として考えられるのは、一般的に漂流防止には増し舳いがあるが、増し舳いだけでは 2.3.1(2)で示した鹿島港の事例のように係留場所によって被害の程度が異なることなどが明らかになっている。さらに、マリンゲート塩釜の浮体式栈橋の事例のように、浮体への係留によって観光遊覧船が被災を免れた事例は、比較的喫水が浅い作業船の場合、陸上や岸壁への乗り上げを防止する対策として参考になる。

本節で得られた概要を取りまとめると、以下のとおりである。

- ・津波来襲時の船舶被害低減対策は、港外退避が基本である。自航船で船員が乗船して

いる船でも港内で津波の来襲を受けた場合、被害を免れるのは容易でない。

- 津波最大流速が 4m/s を超えると重い被害の船が見られるようになる。
- 主作業船は矩形で喫水が浅いものが多いため、津波による岸壁等への乗り上げによる被害が一般の船舶よりも発生しやすい。
- 小型の付属作業船は漁船などの小型船舶の被災と同様の傾向がある。
- 類似の船形で増し舳などの係留対策をしても係留場所によって被害の有無が分かれる場合があり、係留場所の選定は重要である。
- 浮体式栈橋に係留することは、被害防止対策の一つとして検討に値する。

2. 4 津波来襲時に作業船が取るべき行動

前節までに、津波が来襲した際の作業船の被害を低減させるための基礎的な情報を整理してきたが、作業船の津波被害低減のための対策の現状を整理しておくことは需要である。そこで本節では、津波による船舶の被害発生に対する既往の知見を整理し、船舶の津波対策の現状を整理・分析するとともに、作業船について津波に対する安全確保のための既存のガイドラインを分析し、津波被害低減対策のための課題を明らかにすることとする。

2.4.1 津波による船舶の被害発生に関する既往知見

津波による船舶の被害発生については、過去の津波による船舶の被災データを取りまとめることにより、幾つかの知見がまとめられている。

首藤伸夫^{2 2)} は津波対策小史において漁船は津波高 2m で被害が発生、津波高 4m で被害率 50%、津波高 8m で被害率 100%という値を示している。また、東北地方整備局が設けた「沿岸部と背後地の連携による総合的な津波被害軽減方策検討委員会」^{2 3)} の報告書によると、船舶の規模に応じて津波による被災の目安を以下のとおり示している。

- ・ 500GT 未満 : 水位上昇 2m 以上あるいは流速 4m 以上
- ・ 500GT 以上 1 万 GT 未満 : 水位上昇 3m 以上あるいは流速 3.5m 以上
- ・ 1 万 GT 以上 : 水位上昇 4m 以上あるいは流速 3m 以上

山本正明ら^{2 4)} は、小型の船に対して、日本海中部地震津波による漁港内の漁船被害を調べ、港内最高水位が 1.5m 程度から船の被害が出始め、3m を超えると 1/3 以上の船が被害を受けていることを報告している。この報告は、岡本修がまとめた東日本大震災時の港内船舶の被害実態^{1 2)} の分析とよく一致している。

一方、数値シミュレーションを利用して津波の船舶への影響を分析する研究も行われている。

中屋行雄、津田宗男ら^{2 5)} は、港湾内に進行する津波の推定と係留船舶への影響評価の試みとし、南海道地震が発生した場合の阪神から播磨エリアの津波伝播状況を数値シミュレーションにより推定し、その結果を用いて係留船舶動揺シミュレーションを実施し大型船舶の安全性の評価を試みている。

米山治男、大垣圭一^{2 6)} は清水港を対象とした数値計算により、係留船舶 (5,000DWT～60,000DWT の 4 隻を想定) への津波の影響を評価しており、船型が大きいほど船舶の固有周期が長くなるため津波の周期と一致しやすくなり船舶の動揺も大きくなること、通常用いられている標準的な係留方法で船舶を係留した場合にはプレストラインやスプリングラインといった短い係留索の張力が大きくなること、係留索を長く取る方法が津波に対して効果的な係留方法であると考えられることなどを明らかにしている。

これらの数値シミュレーションを用いた研究は、津波対策として増し舳いなどによる係留方法の工夫を行う上では参考となるものであるが、増し舳いでは凌げないような大きな津波来襲時の対応を検討するには限界があると考えられる。また、比較的大型の貨物船を

対象としたものであり、作業船のような特殊な形状をした船を対象としたものには必ずしもなっていない。これらの研究はいずれも重力式ケーソンや矢板構造などの岸壁（以下「固定岸壁」という。）への係留を対象としたものとなっている。

増田光一、居駒知樹、恵藤浩朗、村田一城、宮本卓二郎、著者²⁷⁾は、港湾における浮体式栈橋を用いた船舶の津波被害軽減法に関する基礎的研究において、浮体式栈橋に船舶を係留することにより津波からの船舶被害を軽減できること等を分析している。詳細は本論第4章の係留方法の提案において論述することとする。

2.4.2 船舶の津波に対する安全対策の現状

港内に停泊している船舶の津波来襲時の安全対策として幾つかの研究が行われている。

片山敏孝ら²⁸⁾は、漁船を対象として陸上滞在時に津波の予想高さが6m以上の場合は漁船を沖に避難させないなどのルールを提案している。

風間隆宏ら²⁹⁾は、漁船などの小型船舶を対象として、簡易的に避難海域の水深を設定する手法を提案し、気仙沼湾を対象とした津波シミュレーション結果と比較し、その妥当性を確認している。また、人命第一を考えた船舶避難行動に関する考え方として港周辺もしくは沖合で航行している小型船舶は避難海域に避難することや、港内で停泊していて津波来襲までの時間がない場合は港外退避を行わないことなどを提案している。

河田恵昭ら³⁰⁾は1,000t以上の大型船舶を対象に、津波の流れと水位の上昇による係留索の破断についての被害評価手法を開発し、3.5m以上の津波高で船舶の乗り上げ被害が生じる可能性を指摘し、座礁に対する安全マップを示して被害軽減のための情報としている。

一方、実際に津波が来襲した場合に各船主や船長がどの様に行動すればよいかという具体的な津波時の安全対策としては、海難防止協会が平成15年度に行った「津波が予想される場合の船舶安全確保に関する調査研究報告書」（以下「平成15年度調査研究報告書」という。）において津波に対する船舶対応が取りまとめられている。この中では、津波予報の種類を「津波警報の大津波」、「津波警報の津波」、「津波注意報」の3つに分け、津波来襲までの時間的余裕を「余裕なし」、「中間」、「余裕あり」の3つに分けて、それぞれの場合の船舶の対応をまとめている。船舶としては、港内着岸船と錨泊船・浮標係留船、航行船の3つに分け、港内着岸船については更に危険物積載船舶、一般船舶、小型船（プレジャーボート、小型漁船等）の3つに分けて、荷役中止や港外退避、陸上避難などの具体的対応を示している。

海上保安庁では平成16年12月28日に「港内における船舶津波対策の策定について」を公表し、原則として全国の特定期港（86港）に船舶津波対策協議会を設置すること、港ごとに船舶津波対策を定めること、を決めている。また、この港ごとの船舶津波対策策定にあたっては、平成15年度調査研究報告書において取りまとめられた津波に対する船舶対応の考え方が参考として示されている。

各特定港では、海上保安庁の指導の下で港ごとに協議会を設けており、例えば京浜港（横

浜区及び川崎区に限る)においては「船舶津波対策実施要領」³¹⁾を策定している。また、大分港長・大分海上保安部長の連名で「津波対策実施基準」³²⁾を定めている例もある。これらの要領や基準には、先の船舶対応表を港ごとにアレンジしたものが別添として付けられている。これらを見ると、工事作業中の船の対応が盛り込まれており、いずれも津波警報時には作業を中止し、時間的余裕がないときは陸上避難、時間的余裕がある時は港外退避又は流出防止措置により対応することが記述されている。

以上のように、津波に対する港湾内の船舶の対応は、大型船・中型船は基本的には港外退避であることが分かる。また、特定港で作成されている要領や基準をみると作業船についても配慮されているが、工事中のものが基本となっており、工事をしていない期間の作業船については、具体的な記述が少ないものとなっている。

2.4.3 作業船の津波に対する被害低減対策

作業船の安全確保に関する既存の研究や報告はあまり見られない。

数少ない研究のうち、金澤剛、小竹康夫ら³³⁾は、作業船の安全な係留方法を検討するため、津波作用時に一点係留中船舶に発生する係留張力に関する実験的研究を行っており、係留索に生じる張力の特性について調べ、索長を伸ばすことにより最大張力が1/2~1/4程度に低減し安全性を向上できるとしている。この研究は一点係留の場合のみの実験である点で基礎的なものであると考えられる。

社団法人日本作業船協会では、津波来襲に的確に対応するために、作業船の安全確保に関するガイドライン²¹⁾を取りまとめている。この中では、過去の津波による作業船の被害事例を示したうえで、代表的な作業船の係留方法として係留ワイヤーで周辺の海底地盤にアンカーリングされているものと仮定し、津波が及ぼす作業台船への影響について数値シミュレーション結果を基に津波高5mまでの台船の動揺と係留張力の最大値をグラフ化して示すことにより安全性を評価している。また、津波発生時に人と船がどのように対応すれば良いかについて取りまとめている。さらに、津波情報の入手と通信、連絡手段を分析し、主としてソフト面での避難や対応について整理している。

このガイドラインの詳細については5.1節において分析するが、この基本方針としては、まず人命を第一に考えること、そのうえで、被災による船舶の損壊、及びそれに付随する環境汚染などを最小限に食い止めることを示しているのが特徴である。そして内容は、稼働中の人員が乗船している作業船が中心であり、稼働していない港湾内等に係留されている作業船の被害低減については、あまり記述されていない。

津波災害後、できる限り早く作業船が航路啓開や災害復旧に活躍できるようにするためには、稼働中の船員や作業員が乗船している作業船だけでなく、稼働していない作業船も含めた全作業船について被害を可能な限り低減する対策を示すことが重要である。

2. 5 作業船の津波被害低減対策の課題

2.5.1 港湾管理者と国の関与と関係者間の協力

東日本大震災時の津波により東北地方の太平洋側を中心とした沿岸域では大きな被害を経験し、これにより沿岸の港湾施設も被災し、港湾の機能も著しく低下した。このような津波を伴う大災害時に、緊急物資はもちろんであるが、ガソリンをはじめ地域の経済・産業活動を支えるための物資の海上からの搬入を可能にしたのは、被害を受けた航路の啓開や港湾施設の早期復旧でありこのために活躍したのが各種の作業船である。

2.2.1 で示したように、作業船は、通常時から公共事業などのために用いられることが多く、公的な性格をもった船として社会基盤施設の整備の一翼を担っているが、津波を伴う大災害により、その重要性が再認識されたといつてよい。

今後、来襲が予想される東海、東南海、南海トラフ地震等の大規模地震時には、東日本大震災と同程度の津波の来襲が予想されているが、沿岸部は人口や産業の集積が高いこともあり、人的被害だけでなく甚大な経済的被害を受ける可能性が予測されている。これらの災害発生後に、いち早く港の機能を回復できるよう、作業船が稼働できるように事前に可能な限りの準備をしておくことは、単に作業船所有者だけに任せていてよいという問題ではなく、港湾の安全や利用・振興を考える役割を担っている港湾管理者や、我が国の経済の基盤を守る役割を担っている国としても正面から取り組むべき課題である。

特に、作業船は、港の物流や人流などの経済活動の中心である貨物船や旅客船とは異なり、港の利用や振興においては、あまり社会的に注目されない存在であること、また、特定の工事種類（以下「工種」という。）があるときだけ活躍する船も多く、他の工種を行っているときは待機する機会が多いこともあり稼働時間は比較的短いこと、船齢も長いものが多いこと、特殊な船であるため熟練した専門の船員や作業員が不可欠であることなどにより、健全な状態で維持すること自体が必ずしも容易ではない環境にある。だからこそ、港湾管理者や港湾整備行政を担う国が、正面から取り組むべき重要課題であるといえる。

また、実際に作業船の被害低減対策を検討するためには、係留場所や施設等の確保にあたり、港湾の開発・利用・保全との調整が不可欠であり、港湾管理者の理解と協力が無ければ簡単に進まない。港湾計画や港湾施設の整備計画にも関わる場合も考えられ、この場合には、作業船を港湾の防災政策の一翼を担う一つの要素として位置づけることも必要になってくる。

作業船の津波被害低減対策は、単に船の損害回避と捉えて、作業船の船長や船員或は作業船の運行者だけに限定された問題として民間に全てを託すのではなく、大規模地震に対するリスクヘッジの一つとして、また、港湾 BCP のツールの一つとして捉え、港湾管理者や港湾行政にかかわる国の問題として公的部門が積極的に関与する必要がある。このため、作業船の津波被害低減対策に関係する船長や船員、作業員と、作業船の運行者、さらには港湾管理者や国の港湾整備部局など、それぞれが、その立場と役割を明らかにするととも

に協力体制を構築することが重要な課題である。

2.5.2 作業船の特徴を考慮した被害低減対策の策定

2.4節において明らかにしたように、一般船舶の津波による被災や津波安全対策については、研究量も多く、その対策も具体的な提案がなされているが、作業船の津波被害低減対策に関係する既存の研究や報告及び実際に現場で使われているガイドラインに関しては少なく、しかも一般船舶の安全対策を参考としたものである。

作業船の中には、2.2節で明らかにしたように、ガット船やドラグ浚渫船のような一般船舶と同じ特性を持った船もみられるし、また潜水土船や監督測量船など漁船や小型船と類似の特性を持った船もみられる。しかし、建設工事の中心的役割を果たす起重機船やグラブ浚渫船、地盤改良船などは非自航船であり、形状も特異であり、工事に従事していない（稼働していない）ときに津波が来襲した場合には、短時間での港外退避が難しいなど一般の船舶とは異なる要素が多くみられる。このため、津波被害低減対策についても、それぞれの特性を考慮したものであるべきである。

一般の船舶は津波時には港外へ退避が基本であるが、作業船は、工事期間以外の（稼働していない）期間は人が乗船することなく港内等で係留されている場合が多く、特に非自航式の作業船は単独で動くことが出来ないため、短時間で港外に退避することは困難である。このため、港内で津波の来襲に耐えることを前提として被害低減対策を考える必要がある。

今後東海、東南海、南海トラフなどの大規模地震とそれに伴う津波に来襲が予想されていることもあり、発災後できる限り早期に航路啓開や災害復旧に従事するという重要な役割が期待されている作業船にとって、係留している状態での津波被害低減対策を進めることは喫急の今日的課題となっている。これらをまとめたものを表-2.5.1に示す。

表-2.5.1 本論の対象とする事象の整理

		港外退避	港内係留	本論との関係
大型・中型船 (一般船舶)		既存研究多数 原則港外退避 対応ルールあり	被害予測の研究多数 安全上港内係留には限界あり	参考情報として考慮
小型船（漁船・プレジャーボート等）		避難関係の研究あり 対応ルールあり	人命優先、無理に港外避難しないルールあり	参考情報として考慮
作業船	自航式	大・中・小型船舶を参考	大・中・小型船舶参考	本論に記述
	非自航式	稼働していない時は港外避難が困難	作業船の具体的な被害低減対策が未確立	本論の主たる対象

作業船の被害低減対策をより具体的に検討するにあたっては、いくつかの個別課題を解

決する必要がある。すなわち、港内に係留を余儀なくされるため、一つは係留場所の選定方法についての考え方を明らかにすることである。今一つは作業船の特性に応じた適切な係留方法を明らかにすることである。そして、これらを整理して作業船の津波被害低減のためのガイドラインとしてまとめることである。

2.5.3 課題のまとめ

以上、2.5.1 及び 2.5.2 において示した内容を整理して、本研究の全体課題と主要な個別課題としてまとめると以下のとおりである。

全体課題)

- ・ 作業船の特性に応じた津波被害低減対策をまとめること

主要な個別課題)

- ・ 作業船の港湾内の係留場所の選択方法の考え方をあきらかにすること
- ・ 作業船の係留方法の考え方を明らかにすること
- ・ 作業船の津波被害低減対策ガイドラインを取りまとめること
- ・ ガイドラインにおいて関係者の役割を広い視点からまとめること

第3章 係留船舶津波ハザードマップの開発と作業船の係留場所 選定手法の提案

本章では、作業船の係留場所の実態と課題を明らかにした上で、係留船舶津波ハザードマップの開発と、それを用いた作業船の係留場所選定手法を提案する。さらに、木更津港及び清水港を事例として、係留場所選定手法の適用性を確認する。

3.1 作業船の港内係留場所の実態と課題

港湾内における作業船の係留場所の選定の考え方を整理するにあたっては、まず作業船の港内係留場所の実態を把握しておく必要がある。ここでは、全国浚渫業協会の会員企業35社を対象にした作業船係留場所実態調査（平成25年2月取りまとめ）をもとにして、係留実態のある30の港湾及び漁港におけるグラブ浚渫船及び土運船の係留場所の実態を整理するとともに、航空写真等を利用して実際の作業船の係留場所を確認し、作業船の係留場所に関する課題を明らかにする。

3.1.1 係留場所の実態

グラブ浚渫船及び土運船の係留場所については、公共施設（水域を含む）の中の、港湾施設が最も多くそのシェアは75%を超えており、次いで漁港施設が約15%、そして残りの9%足らずが民間施設となっている。なお、民間施設の岸壁や護岸は、港湾区域内の施設であり、作

業船の係留について港湾区域内の係留が約85%を占めている。港湾

表-3.1.1 作業船の係留場所（単位：隻数）

公共施設							民間施設			合計
港湾				漁港			岸壁	護岸	水域	
岸壁	物揚場	護岸	防波堤	水域	防波堤	水域				
49	11	1	16	26	5	15	7	4	1	135
36.3%	8.1%	0.7%	11.9%	19.3%	3.7%	11.1%	5.2%	3.0%	0.7%	100.0%

全国浚渫業協会の調査（平成25年2月）をもとに取りまとめた

施設の中では岸壁に係留している場合が最も多く全体の36%を占めているが、水域が20%弱、防波堤が約12%を占めており、岸壁以外の係留も多い（表-3.1.1）。これらのデータをさらに細かくみると、地方の港湾では岸壁に係留している場合が多い反面、東京港や横浜港、名古屋港、大阪港、神戸港などで水域での係留が多くみられる。

上記の係留場所の傾向について航空写真等によって確認すると、グラブ浚渫船や土運船だけでなく、起重機船や地盤改良船などの比較的大型の作業船や作業船を支援する小型の作業船も、同じような場所に係留されていることを確認した。また、係留場所は港湾内の港奥部が比較的多い。それ以外では、旧水面貯木場や防波堤の内側などにもみられた。旧水面貯木場及び防波堤の内側の係留例として、東京港の12号地作業船係船場（旧水面貯木

場) と尼崎西宮芦屋港の西宮防波堤内側の作業船係留状況を図-3.1.2 及び図-3.1.3 に示す。

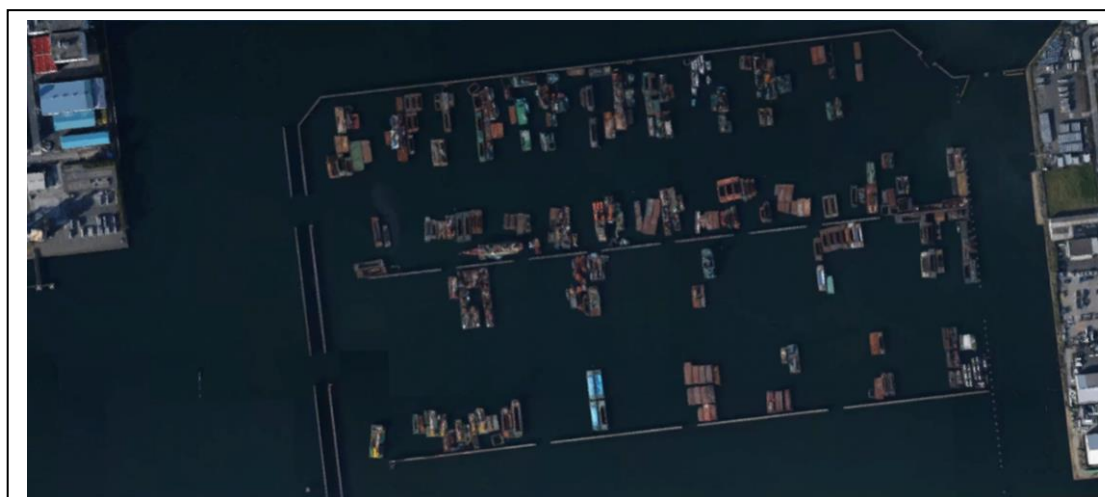


図-3.1.2 東京港 12 号地作業船係船場 (旧水面貯木場) (google map より)

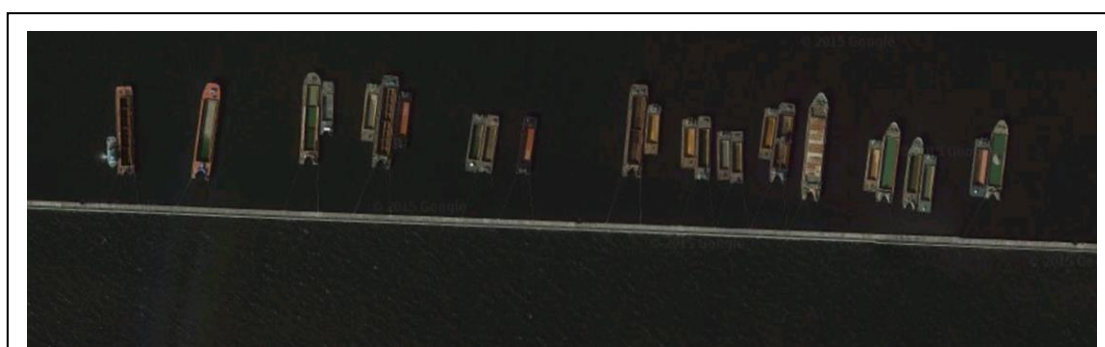


図-3.1.3 尼崎西宮芦屋港の西宮防波堤内側での作業船係留状況 (google map より)

3.1.2 係留場所の問題点と課題

作業船の係留場所は、港湾計画上は小型船船だまりとして計画の中に位置づけられている。しかし、実際の係留場所をみると、小型船船だまりの中にある物揚場に係留されているものは比較的少なく、岸壁や防波堤の内側、水域などに係留されているものが多い。この要因としては様々なことが考えられるが、その理由として、作業船の大きさや形状が小型船船だまりでの係留に向いていないことや、実際の計画策定の際に作業船に対する検討が十分には行われていない可能性などが考えられる。

係留場所についての問題点としては、公共の岸壁に係留している場合などは専用の係留場所でないため一般の船舶等の岸壁利用に応じて作業船を移動しなければならない状況がみられた。これらの船主の中には年間を通じた係留場所の確保を望んでいる者が多い。また、十分な係留施設が無い等により台風等の荒天時に係留できない場所や係留に不安を感

じている場所もみられる。さらに今後の港湾の開発や整備などにより現在の係留場所が近い将来に確保できなくなる可能性が高い場所もあり、特に東京港の中央防波堤内側の係留場所は東京オリンピックの開催に合わせて追い出される可能性を心配している船主も見られる。

このように作業船の係留場所をみると、作業船が港湾整備や海洋開発などで重要な役割を果たしてきたにもかかわらず、また今後ともその重要性は微塵も変わるものではないにもかかわらず、一般船舶の岸壁利用が優先される中であって港湾管理者による明確な係留場所の位置づけがされているものは少なく、場合によっては厄介者のような扱いを受け、決まった係留場所を持たないホームレスに似た取り扱いを受けているものも見られた。このため、係留場所の選択に当たって、津波などに対する安全性に配慮するという考えは取られていない状況である。

作業船は、港湾の開発が進むに伴って従来の係留場所から閉め出され新たな係留場所を探し求めてきたという歴史を経て、今日に至っている。例えば東京湾においては、木更津港など比較的港湾工事量の少ない湾口部に近い港にも作業船が係留されたり、かつての水面貯木場を利用して作業船が係留されたりするなどの実態が見られるようになっている。

海洋国である我が国にとって、作業船は、今後とも港湾の開発や海洋開発などで必要不可欠な船であり、また、大規模地震に伴う津波来襲後の航路啓開や災害復旧の際にも重要な役割を期待されている。このため、作業船が置かれている現状を直視した上で、津波来襲時の被害低減対策にも配慮したしっかりとした考え方に基づき、作業船の係留場所を選択することや作業船の係留場所の確保を計画的に進めることが今後の重要な課題となってきた。

3. 2 港湾内の係留船舶津波ハザードマップと係留場所選定手法提案

前節において作業船の係留場所の実態をみてきたが、港湾内の場所によって津波が係留船舶に与える影響は異なり、被害も異なってくることから、港湾内の係留場所（水域）の津波来襲時の危険性を評価することが重要である。このため本研究では作業船の係留場所の選定にあたって係留船舶津波ハザードマップを開発し、これを利用して係留場所選定手法を提案する。

3.2.1 係留船舶津波ハザードマップの考え方と定義

(1) 係留船舶津波ハザードマップの定義

一般に陸域の津波ハザードマップは津波来襲時の陸域の浸水可能範囲を示すことにより、津波来襲時に沿岸の住民や従業員等の避難を円滑に進めることを目指したものである。このため、陸域がどの範囲まで、どの程度の深さに浸水するかという浸水深が示されているものであり、これには海域の危険性を示すという概念が乏しいものである。

係留船舶津波ハザードマップは、専ら港湾の岸壁や海域に係留されている船舶などの危険性を示すものであり、港湾関係者や水産関係者などの海域において活動する者に対して、津波が港湾などの複雑な形状の水域でどのような挙動を示し、それが水域を利用している船舶や施設等に対してどの程度影響を及ぼすかを予測するために用いるものである。特に、東日本大震災に伴う甚大な津波被害を受け、近年注目されるようになっており、星野智史、増田光一、居駒智樹、村田一城、著者ら³⁴⁾が清水港をケーススタディに開発を進めてきた。

本研究では、係留船舶津波ハザードマップを「最大津波高図」「最大浸水深図」「津波最大流速図」「最大係留索張力評価図」の4つのマップで構成されたものと定義する。

それぞれのマップは以下のとおりである。

最大津波高図：津波伝播・遡上シミュレーション結果を基に海域における津波高の最大値を図化したもの。

最大浸水深図：津波伝播・遡上シミュレーション結果を基に岸壁や護岸等の周辺の陸域への浸水深さの最大値を図化したもの。

最大津波流速図：津波伝播・遡上シミュレーション結果を基に、海域における津波流速の最大値を図化したもの。

最大係留索張力評価図：想定した津波により係留施設等に係留させた船舶の係留索に働く最大係留索張力を船舶応答シミュレーションにより求め、係留索破断強度との比を係留施設毎に図化したもの。

係留船舶津波ハザードマップにより、一つには、作業船の係留場所を絞り込み、係留に有力な候補地を選定するための情報を得ることができ、いま一つは、係留中の作業船が受ける津波による外力（係留索張力）や、津波による作業船の挙動など、津波被害低減の事前対策のための情報を得ることができる。

(2) 係留船舶津波ハザードマップ作成の留意事項

係留船舶津波ハザードマップ作成において重要な点は、一つには津波をどのように想定するかということ、二つ目はどのようなシミュレーション計算を行うかということ、そして三つ目は係留する船舶の条件をどのように設定するのかという点である。

一つ目については、陸域の津波ハザードマップと同様に、想定される最大のものを提示することが重要である。このため、対象とする港湾に対し、複数の想定される地震断層モデルの中から最も津波による影響が大きいと予測されるものを選択することである。

二つ目については、津波予測計算は主として差分法による計算手法がかなり確立されている。その中でも、海域のシミュレーションとはいえ、岸壁や護岸の近辺の危険性をできる限り精度の良く再現する必要があるため、津波の陸域への遡上シミュレーションが可能なモデルを選択することが重要である。また、メッシュの大きさなどについても、巨大な断層の変動をカバーしつつ、港湾内の諸水域の津波の挙動が分かる程度に細かくとることが重要であるため、大領域から中領域、小領域までの少なくとも3段階程度のメッシュにすることが適切である。

三つ目の船舶の条件については、係留索張力を求める際に重要である。係留の危険性を評価しようとする船舶の規格（大きさや形状等）をもとにモデル化することが基本である。しかし、大きさや形状等が異なる多様な作業船に対応するため、係留索張力にとって安全側となる大きめの作業船を標準船舶として設定することが好ましい。また、付属作業船のような標準船舶に比して船舶の大きさが著しく小さくなる場合には、安全側の評価となるよう配慮しつつ係留索張力を補正する考え方を取り入れることも一考である。

以下の項において、係留船舶津波ハザードマップ作成方法を示す。

3.2.2 係留船舶津波ハザードマップ作成の手順と計算手法及び計算条件

係留船舶津波ハザードマップ作成においては、津波伝播・遡上シミュレーションと、船舶応答シミュレーションを用いる。津波伝播・遡上シミュレーションでは、最大津波高、最大浸水深、最大津波流速の図を求め、津波伝播・遡上シミュレーションと船舶応答シミュレーションを重ね合わせることにより、最大係留索張力評価図を求める。作成手順と、それぞれの計算の手法、計算条件は以下のとおりである。

(1) 計算手順

係留船舶津波ハザードマップの作成は、まず使用するソフトウェアなどのコンセプト計画を整理した上で、シミュレーションの対象とする範囲の地形データを入力し、次いで地震の断層モデルを基にした初期水位の設定し、これらより津波伝播・遡上シミュレーションを行い波高

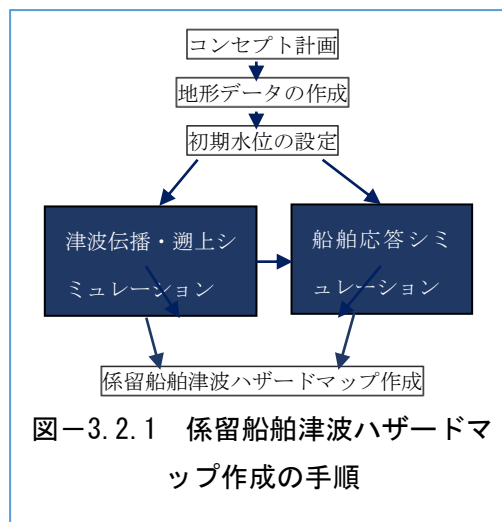


図-3.2.1 係留船舶津波ハザードマップ作成の手順

や流速などの津波特性を求めるとともに、これらを用いて船舶応答計算を行い船舶の挙動や係留索に働く張力を求めるという手順で行われる。この一連の手順のフローチャートは以下の図-3.2.1のとおりである。

(2) 計算手法・計算条件

地形データについては、NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration : 人工衛星画像)、(財) 日本水路協会海洋情報研究センター及び国土地理院データを基に、シミュレーションの座標系への変換など必要なデータの変換・補完を行った。

初期水位の設定については、断層地殻を半無限弾性体と仮定することにより導かれた Mansinha and Smylie (1971)の式をもとにして、Steketee(1958)^{3 5)} が発表した食い違いの弾性理論に基づき、Okada(1992)^{3 6)} がまとめた地殻の変位計算式を用いた。津波計算の海面初期変位は、断層運動による鉛直方向の地殻変動と断層運動による水平方向の地殻変動によって、傾斜した海底面で生ずる鉛直方向の地形変化の和として与えた。

津波伝播・遡上シミュレーションについては、陸域遡上が可能な津波伝播シミュレーターを用いた。シミュレーションモデルは非線形長波理論に基づき連続の式 (3-1) と運動量保存の式 (3-2) (3-2) を支配方程式とした平面 2 次元の差分法であり、数値計算上の安定性を考慮してスタッガートリーブフロッグ法を適用して離散化した。

連続の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = \frac{\partial S}{\partial t} \quad (3-1)$$

運動量保存の式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{M}{D} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{N}{D} \frac{\partial M}{\partial y} + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{f}{D^2} MQ = 0 \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{M}{D} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{D} \frac{\partial N}{\partial y} + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{f}{D^2} NQ = 0 \quad (3-3)$$

船舶応答シミュレーションについては、個別要素法 (Distinct Element Method) を導入することで浮体の津波応答解析を行った。この際運動方程式は、Runge-Kutta 法を用い差分により離散化した。

船舶モデルについては、sway、surge の 2 自由度並進運動と yaw の 1 自由度回転運動を考慮するため、5つの要素群で構成した連続体としてモデル化した。連続体の計算方法は、要素群としてではなく個々の独立した要素として運動変位を算定し、位置関係の変化した要素群の位置を補正することで連続体の形状を再構成方法を用いた。船舶応答シミュレーションでは要素毎の各運動量を保存した状態で連続体の運動応答計算を実施した。図-3.2.2に連続体の計算に関する概念図を示す。

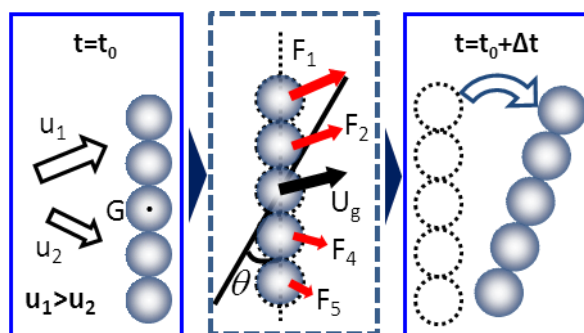


図-3.2.2 The conceptual diagram of DEM

係留条件については、浮体モデルと地形要素間に線形ばねを導入し、係留索張力を算定した。なお、その際の防舷材の条件は、係留張力が大きめに出るよう、弾性を無限大とし摩擦係数を 0 とした。なお、本研究では、船舶の衝突による係留施設の破壊はないものと仮定し、津波の特性を考慮して、船体の diffraction 問題は考慮しないこととした。

3.2.3 津波伝播・遡上シミュレーションの計算条件の概要

津波伝播・遡上シミュレーションの初期水位算定の際の地形データを図-3.2.3 に示す。初期水位は、2012 年度の各港湾の最高潮位を東京湾中等潮位からの値に換算した。

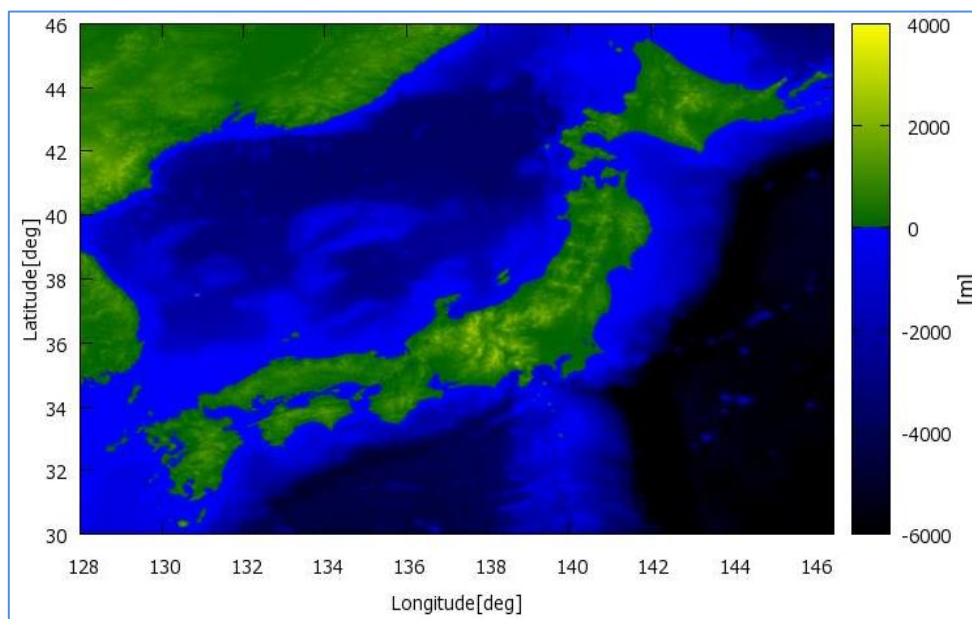


図-3.2.3 初期水位算定の際の地形データ

計算のデータの作成に当たっては、大領域、中領域、小領域に分け、それぞれの領域が接する境界では、ネスティングの条件を設定した。計算領域は、東西方向に X 軸、南北方向に Y 軸を設定した。

津波が発生する際の断層の設定については、津波断層面を近似した小断層ごとに、食い違いの弾性体論に基づき海底地殻変動を求めた。その際に用いる断層パラメータには内閣

府による南海トラフの巨大地震モデル検討会が発表した断層パラメータを用いた。検討される 11 ケースのうち「基本的な検討ケース」は 5 ケース(Case1～Case5)、「その他派生的な検討ケース」は 6 ケース(Case6～Case11)となっている (表-3.2.1)。

表-3.2.1 断層パラメータ概要

Case 番号	断層設定域	小断層数
Case1	駿河湾～紀伊半島沖に大すべり域を設定	5773
Case2	紀伊半島沖に大すべり域を設定	5773
Case3	紀伊半島沖～四国沖に大すべり域を設定	5773
Case4	四国沖に大すべり域を設定	5773
Case5	四国沖～九州沖に大すべり域を設定	5773
Case6	駿河湾～紀伊半島沖に大すべり域+分岐断層	5746
Case7	紀伊半島沖に大すべり域+分岐断層	5773
Case8	「駿河湾～愛知県東部沖」と「三重県南部沖～徳島県沖」に大すべり域を設定	5773
Case9	「愛知県沖～三重県沖」と「室戸岬沖」に大すべり域を設定	5773
Case10	「三重県南部沖～徳島県沖」と「足摺岬沖」に大すべり域を設定	5773
Case11	「室戸岬沖」と「日向灘」に大すべり域を設定	5773

出典：内閣府³⁷⁾

3.2.3 作業船の係留場所の評価方法

(1) 被害発生 of 概略判断基準の設定

係留船舶津波ハザードマップを用いて、係留場所の絞り込みを行うためには、係留場所を評価するための判断基準が必要である。本研究においては、理論値や既往の知見を参考として、概ねの判断を行うための概略判断基準を設定する。概略判断基準の設定にあたっての既往の知見を整理すると以下のとおりである。

① 乗り上げによる被害発生

作業船の場合、喫水の浅い船が多いため、津波により岸壁や護岸などへ乗り上げる被害が一般の船舶よりも容易に発生すると考えられる。

乗り上げに対する被害発生の目安値としては、河田恵昭ら³⁰⁾は乗り上げが発生するのは船底が岸壁の高さを超えるときであると定義しており、岸壁の高さと朔望平均満潮位 (HWL)、船舶の軽荷喫水値 (荷物の無い時に喫水) を用いて、乗り上げの限界津波高を以下の式(3-4)で評価することを提案している。

乗り上げによる限界津波高

$$= \text{岸壁の高さ} + \text{軽荷喫水値} - \text{朔望平均満潮位 (HWL)} \quad (3-4)$$

一方、増田光弘、南清和、増田光一は津波来襲時における岸壁に係留された船舶の防災・減災対策に関する研究（その2）³⁸⁾においてMPS法を用いた数値シミュレーションにより大きさの異なる船舶に係留索の破断及び乗り上がりなどについて検討を行うとともに、被害低減のための対策についても検討を行っている。これによると、MPS法により岸壁への船舶の乗り上げを評価できることや、増し舳対策を施しても津波高が高い場合は乗り上げを防ぐことができないという結果を確認している。また、係留している船舶の喫水と同程度の浸水深さ（岸壁付近）の津波が来襲した場合には、乗り上がり又はそれに近い現象が生じることを再現している。

このような知見から、式(3-3)は、乗り上げの概略判断基準の一つの目安と成り得ると考えられる。

②最大津波流速による係留索破断等の被害発生

津波の流速による被害としては、係留索の破断や漂流物の衝突などが考えられる。一般の船舶に係留索の破断の被害が発生すると、最終的には船舶が岸壁から離れ漂流物ともなることから、漂流物の衝突の可能性も増すこととなる。

係留索破断の被害発生の目安としては、2.5.1項において整理しているが、東北地方整備局が行った「沿岸部と背後地の連携による総合的な津波被害軽減方策検討委員会」²³⁾によると、船の大きさに応じて以下の値が示されている。

- ・ 500GT未満 : 水位上昇 2m 以上あるいは流速 4m/s 以上
- ・ 500～1万GT未満 : 水位上昇 3m 以上あるいは流速 3.5m/s 以上
- ・ 1万GT以上 : 水位上昇 4m 以上あるいは流速 3.0m/s 以上

また、津波が予想される場合の船舶安全確保に関する調査研究報告書³⁹⁾においてSpring切断に至る安全限界を図-3.2.4のように示している。

河田恵昭、新名恭仁らは、津波による船舶被害の評価手法の提案³⁰⁾において係留索切断の評価を船首方向からの流れによる切断と水位の上昇による切断の2つに分けて評価を行っている。これによると、1,000t以上の船舶では、水位上昇による切断は津波高が7m以上になら

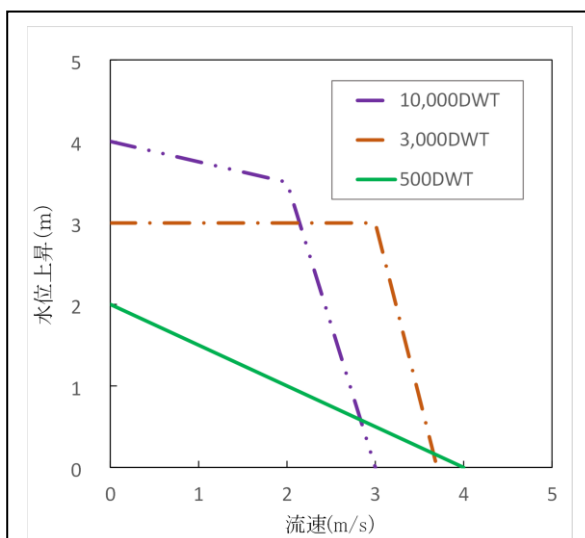


図-3.2.4 Spring切断に至る安全限界

ないと係留索が切断されて漂流する可能性が生じないと評価されているが、流れによる切断の場合は 3.9m/s 以上になれば係留索が切断されて漂流する可能性が生じると評価している。

さらに、岡本^{1 2)} は東日本大震災時の船舶の被害を分析することにより、津波流速が 4m/s 以上になると被害の重い船舶が見られるようになることを示した。

一方、最近の調査研究では、海難防止協会の「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」⁴⁰⁾ において、係留動揺シミュレーション手法による仮想栈橋に係留する大型危険物積載船 (VLCC 及び LNG 船) 及び一般船舶 (10,000DWT 及び 3,000DWT) に対する津波高さ、流速ごとの係留限界を求めている。これによると、津波高さに津波流速の影響が加わると、係留限界の津波高さは低くなることと、周期が短いほど係留限界の値が小さくなり、津波高さのみならず急激な水位上昇が係留限界に影響していることを明らかにしている。この中で 10,000DWT 及び 3,000DWT の船舶においては周期 5 分で 3m、周期 10 分、15 分で 6m の波高が係留限界となり、3,000DWT の船舶では流速が 7~8knot(3.5~4m/s)程度になると津波高が低くても係留限界になる場合もみられることが示されている。

これらの既往知見を踏まえて、最大津波流速が 3m/s 以上という値は、係留索破断被害の発生や、これに伴う船舶等の漂流・衝突被害の発生の可能性が高くなる目安の一つと成り得ると考えられる。

以上の知見等を踏まえて、概略判断基準を設定する。概略判断基準は、「岸壁への乗り上げ被害」、「船舶の流出・障害物の衝突被害」、「係留索の破断被害」の 3 つの被害の発生を想定し、それぞれの被害毎に最大津波高図、最大浸水深図、最大津波流速図、最大係留索張力評価図の 4 つの図のデータを評価するためのものとする。

岸壁等への乗り上げ被害の発生の可能性が高くなると判断するための概略判断基準は、式(3-4)が乗り上がり被害発生の目安の一つと成り得ることを受け、最大津波高と最大浸水深の 2 つのデータをもとに、以下の二つとする。一つは、最大津波高が作業船の喫水と HWL から岸壁天端までの高さの和以上になることであり、今一つは最大浸水深が作業船の喫水以上になることである。

津波流速による流出・障害物の衝突被害の被害発生の可能性が高くなると判断するための概略判断基準は、最大津波流速が 3m/s 以上が係留索破断被害の発生やこれに伴う船舶等の漂流・衝突被害の発生の目安の一つと成り得ることを受け、最大津波流速が 3m/s 以上とする。

係留索破断被害の被害発生の可能性が高くなるための概略判断基準は、最大係留索張力が係留索破断強度以上になることとする。

これらの判定基準をまとめると、図-3.2.5 に示すとおりである。

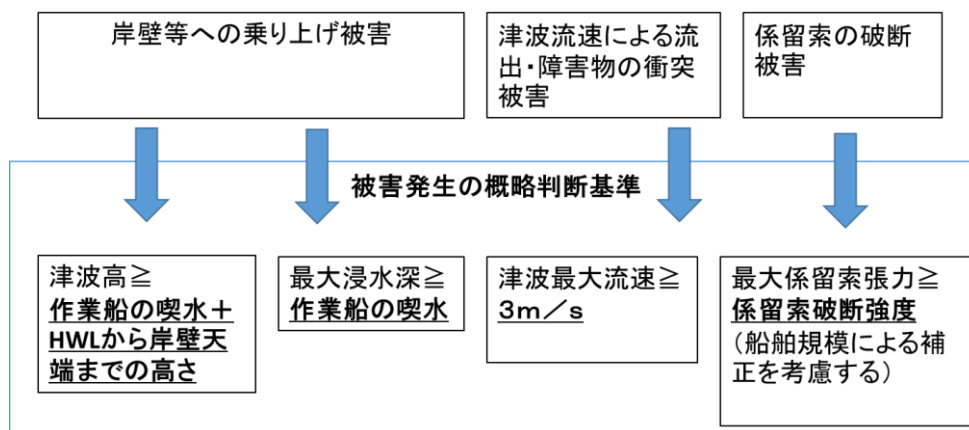


図-3.2.5 被害発生の概略判定基準

(2) 係留場所の評価方法

作業船の係留場所としての評価については、係留船舶津波ハザードマップを基にして、最大津波高、最大浸水深、最大津波流速及び最大係留索張力が、それぞれの概略判断基準以上となっているかどうかを調べ、被害発生の可能性を判断する。概略判断基準を超えて被害発生の可能性があるとして判断された場所については、被害発生に対する対策が取れるかどうかを検討する。その結果、一つでも概略判断基準を超え、かつ、被害発生に対する対策が取れない場所については、作業船の係留場所としては不適切な場所と評価することとする。

これを数値化することにより表すと、係留場所が判断基準以下が 0 点、判断基準以上であるが被害低減対策を行うことが可能な場所は 1 点、判断基準以上で被害低減対策が困難又は現実的でない場所は 2 点とし、それぞれ岸壁等への乗り上げ、流出及び障害物衝突、係留索破断の点数が一つでも 2 点を超えると、係留場所として不適切と評価し、それ以外の場所で、点数の少ない場所が係留場所としてより好ましいと評価する (図 3.2.6)。

評価項目 (最大津波高又は最大浸水深、最大津波流速、最大係留索張力)		
判断基準未満	—————	0 点
判断基準以上	├ 対策が可能	1 点
	└ 対策が困難又は不可能	2 点

図-3.2.6 係留場所の評価の考え方

3.2.4 作業船の係留場所選定手法のまとめ

前項までにおいて、作業船の係留場所選定手法の提案について記述してきたが、これらをまとめると、以下のとおりである。

- ①係留船舶津波ハザードマップのための計算条件の設定
- ②係留船舶津波ハザードマップの作成

- ・津波伝播・遡上シミュレーションの実施
 - ・船舶応答シミュレーションの実施
 - ・最大津波高図、最大浸水深図、最大津波流速図、最大係留索張力評価図の作成
- ③概略判断基準をもとに係留場所における被害可能性を判断
 - ④被害可能性がある場合の対策の検討
 - ⑤作業船の係留場所の評価

次節以降では、作業船係留場所選定手法について、木更津港及び清水港を事例として計算を行い、その適用性を確認することとする。

3. 3 木更津港における作業船の係留場所選定手法の適用

前節においては係留船舶津波ハザードマップを用いた作業船の係留場所選定手法を提案した。本節では、多くの作業船が係留されている三大湾内の港湾における、作業船の係留場所選定手法の適用性を確認する。

対象とする港湾は、三大湾の中でもわが国の首都を抱える東京湾内の港湾とし、作業船の係留が湾奥部の開発に伴い湾口に徐々に移動してきた実態を踏まえて、湾口部に位置する木更津港を対象とし、多くのガット船が利用している木更津南部地区内の係留施設等を係留場所の候補として検討とした。

3.3.1 係留船舶津波ハザードマップの計算条件と計算結果

木更津港における作業船の係留船舶津波ハザードマップの計算条件については、3.2.3項に記述した計算条件を基本とした。木更津港の条件は以下のとおりである。

(1) 津波伝播・遡上シミュレーションの計算条件

伝播・遡上シミュレーションを行うに当たり、大・中・小の3領域に分けてデータを作成したが、中領域を東京湾とし、小領域を木更津港周辺とした。

伝播計算の諸元は表-

3.3.1のとおりである。

小領域の中で、作業船係留場所としての適性を評価するための岸壁の位置は木更津南部地区の木材港前面に東西方向に伸びている岸壁等

(以下「Area A」という。)と、木材港の西側に南北に伸びる岸壁等(以下「Area B」という。)の2箇所を設定した(図-

3.3.1)。

表-3.3.1 津波伝播計算諸元

領域	大領域	中領域	小領域
X方向セル数	350	198	406
Y方向セル数	268	225	305
X方向セル幅[m]	2430	270	30
Y方向セル幅[m]	2430	270	30
時間刻み sec	0.01	0.01	0.01
計算時間 sec	9000	9000	9000
書き出し時間 sec	1.0	1.0	1.0
引き継ぎデータ	無	有	有
流入境界	なし	南	北・西
マニング粗度係数	0.025	0.025	0.05

注) Xは東西方向、Yは南北方向

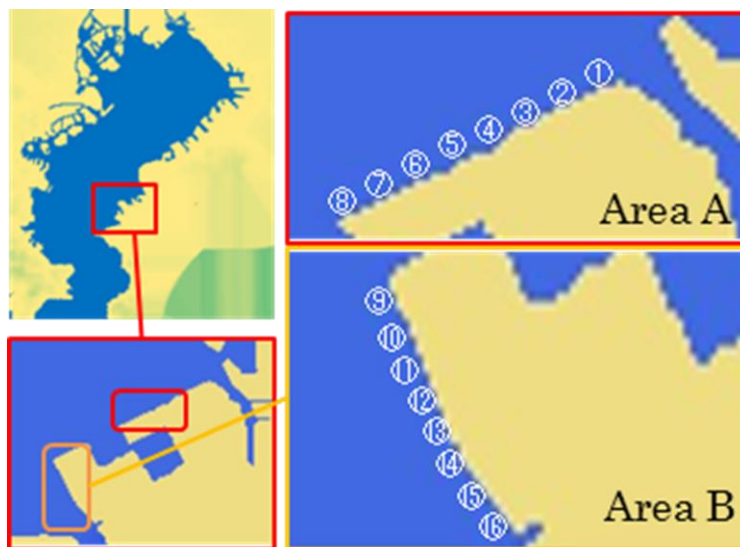


図-3.3.1 計算領域と対象地域

断層パラメータとしては、中央防災会議南海トラフの巨大地震モデル検討会において示された 11 ケースの内、東京湾に最も影響が大きく出るケース 6（駿河湾～紀伊半島沖に大すべり域＋分岐断層）を用いることとした。

(2) 船舶応答シミュレーション条件

木更津港の木更津南部地区では、砂・砂利が主な取扱貨物となっているため、ガット船が多く係留されている。ガット船は作業船の中でも機動力があり、東日本大震災後の航路啓開作業でも震災発生後比較的早期に利用された実績がある。ここでは、被害予測を行う対象船舶をガット船とした。ガット船は、法規上及び税金の問題でその大部分が 500 t 未満のであり、ほぼ同じ規格となっている。本研究では、港湾管理者へのヒアリングを元に収集した第二十八旭丸の諸元を参考として、ガット船のモデル化を行った。第二十八旭丸の諸元は表-3.3.2 のとおりである。また、同船を基にした応答シミュレーション上の船舶の諸元は、表-3.3.3 のとおりである。

表-3.3.2 対象船舶諸元

船舶名	第二十八旭丸	長さ(m)	56.0
総トン数(t)	493	幅(m)	13.4
貨物総容積(m ³)	947.8	高さ(m)	5.95
満載喫水(m)	船首 3.4 船尾 4.8	空喫水(m)	船首 1.2 船尾 3.3

表-3.3.3 シミュレーション上の船舶諸元

船舶数	16	船舶長さ(m)	60
Gross tonnage(GT)	493	船舶幅(m)	12
船舶要素径(m)	12	喫水(m)	1.2

船舶応答シミュレーションの前提条件及び船舶モデルの考え方は、3.2.2 項 (2) と同じものを用いた。ただし、係留条件についてはガット船の係留実態を基に、4 本の Line としモデル化した。

また本研究では、実勢の係留区域に関する津波危険度を明らかにするため、千葉県港湾課の資料を基に実際の作業船団が係留されている区域に船舶モデルを 8 隻ずつ配した。Area A では船首を西に向け、Area B では船首を北に向けて係留を行った。それぞれの作業船の番号を Area A では No.1~8 とし、Area B では No.9~16 とした。係留索諸元と船舶の係留方法は図-3.3.2 に示すとおりである。

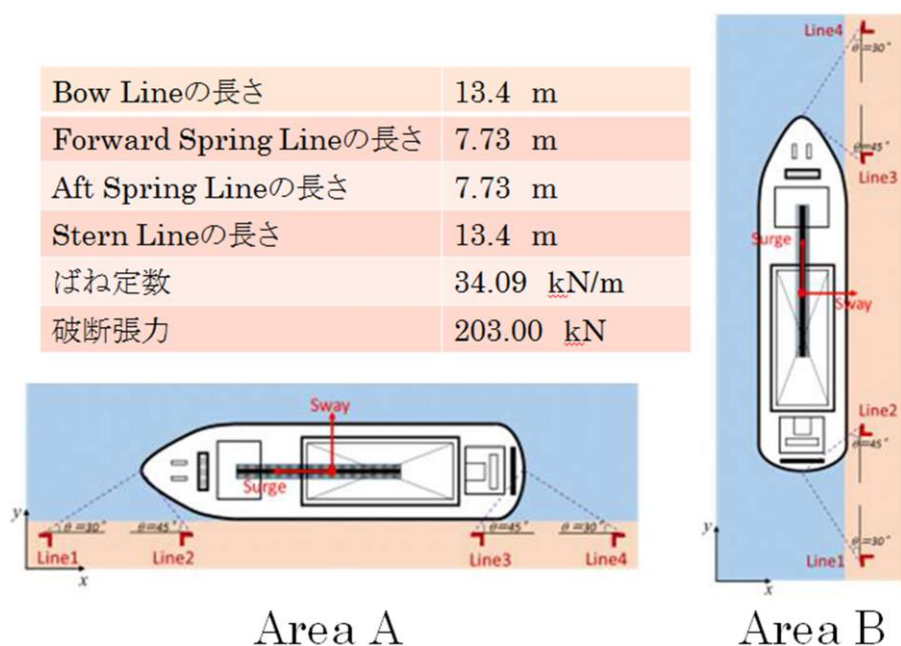


図-3.3.2 係留索諸元と係留船舶に関する概念図

(3) 津波被害予測シミュレーションの計算結果

津波伝播・迎上シミュレーションの結果、木更津港の木更津南部地区では、津波高は最大 1 m 程度であり、計算開始から約 5000sec 後に最初の寄せ波のピーク (+1m 程度) となり、その後引いた後、9000sec 頃に 2 波目の寄せ波のピーク (+0.75m 前後) となり、さらに 10000sec 過ぎたあたりで 3 波目の寄せ波のピーク (+0.8m 強) となった。

一方、津波による流速については、Area A では、最大 0.3m/s 程度であり、9000sec 頃の 2 波目のピーク時に発生していた。また、Area B では、最大 0.25m/s 程度であり 8000sec と 11000sec 頃に生じており、流れの方向は逆向きとなっていた。これらの結果は、図-3.4.3 及び図-3.3.4 のとおりである。

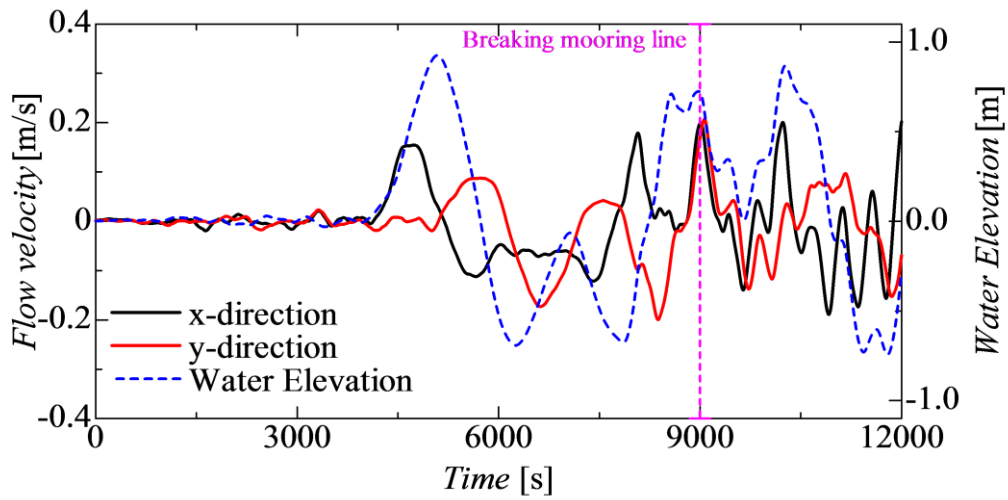


図-3.3.3 津波伝播シミュレーションによる Area A の津波高と津波流速

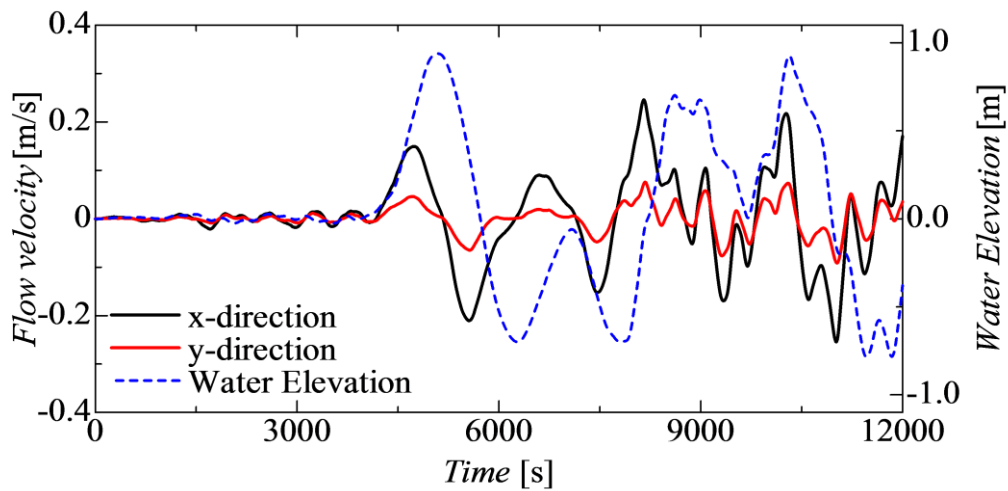


図-3.3.4 津波伝播シミュレーションによる Area B の津波高と津波流速

一方、船舶応答シミュレーションでは、Area A 及び Area B にガット船を係留している状態を想定し、それぞれの船の係留索張力を計算し、係留索破断の発生の有無や、係留索に働く張力の傾向を分析した。

その結果、Area A に係留した船の係留索は、一番東側 No.1 の位置の船舶を除き、係留索破断が発生することが確認できた。破断した係留索は、Line1 及び Line3 であり、Line2 及び Line4 は破断荷重の 7 割程度まで張力がかかる場所は確認できたが破断には至らなか

った。また、係留索の破断が生じた時間は、シミュレーション計算開始から 9,000sec 付近であり、この付近で津波流速と津波高がどちらも大きくなっていることが影響したものと考えられる。

これに対して Area B に係留した全ての船の係留索は、破断に至らなかった。ただし、No.14、No.15 の船の係留索には破断荷重の 8 割前後の張力が Line2 及び Line4 に働いており、港奥部の擾乱などにより係留索に大きな力が働く可能性があることが確認できた。

3.4.2 木更津港の係留船舶津波ハザードマップを用いた作業船の係留場所評価

(1) 最大津波高図及び最大浸水深図を用いた乗り上がり被害発生の判断

最大津波高については、東京湾の木更津港では、南海トラフ巨大地震に伴う津波が来襲しても、今回の対象区域では津波高 2m 前後であった。対象船舶であるガット船の喫水は約 3m であり、概略判断基準の「HWL から岸壁天端までの高さ」と喫水の和よりも最大津波高が小さくなっている。

陸域への浸水の深さを示す最大浸水深についても、今回の計算対象区域では概ね 0.3m 以下となっており、概略判断基準である作業船の喫水（約 3m）よりも小さくなっている。

以上より、岸壁への乗り上げ被害発生の可能性は小さいと判断できる。（図-3.4.5）

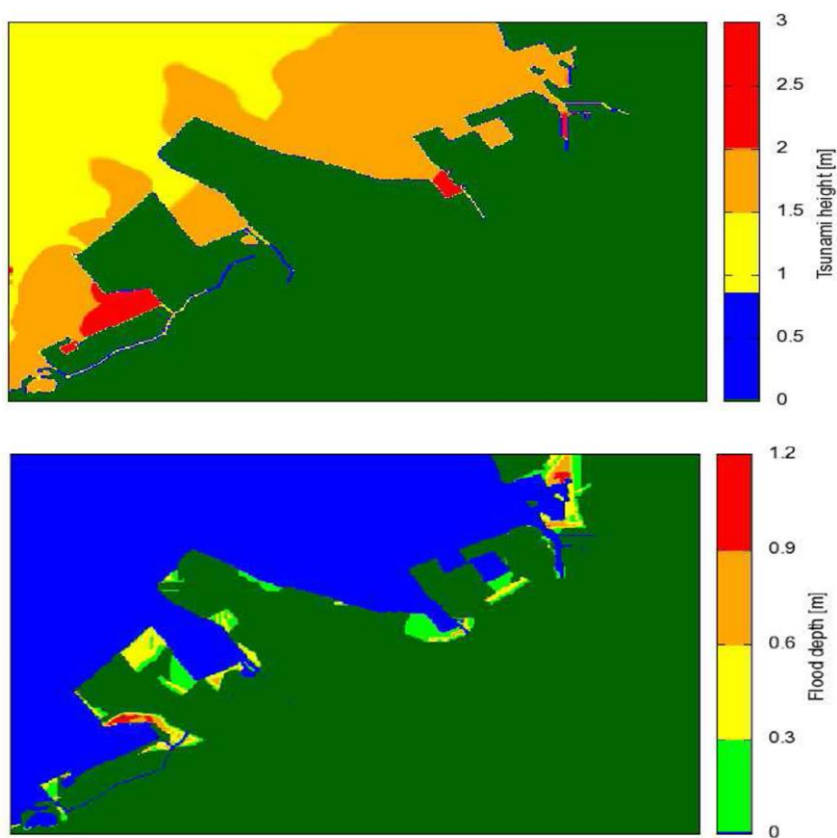


図-3.3.5 木更港の最大津波高（上）及び最大浸水深（下）

(2) 最大津波流速図を用いた作業船の流出又は障害物衝突の被害発生の判断

最大津波流速については、今回の対象区域では、概ね 1m/s 以下であった。概略判断規
準である最大津波流速 3m/s 以上の場所は見られなかった。このため、津波流速による流
出又は障害物の衝突被害の発生の可能性は小さく、被害は軽微であると判断できる (図一
3.3.6)。

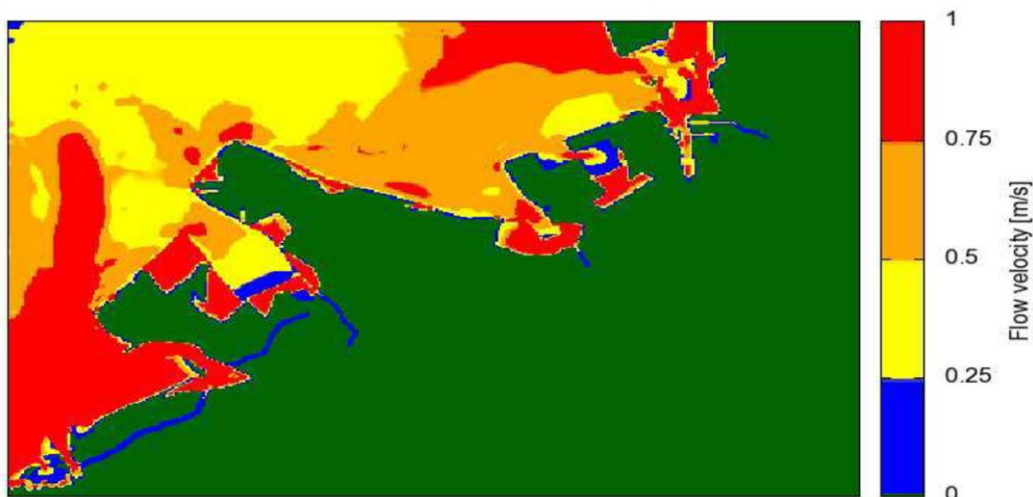


図-3.3.6 木更津港の津波最大流速図

(3) 最大係留索張力評価図を用いた係留索破断の被害発生の判断

係留索張力については、計算対象施設での最大係留索張力を係留索破断強度で除した値
(以下「最大係留索張力比」という。)が1以上の場所と、1未満の場所がみられた。

エリア A では、ほとんどの施設の最大係留索張力比が1以上であり、概略判断基準であ
る最大係留索張力が係留索破断強度以上であるため、係留索破断の被害発生の可能性が高
いと判断できる。ただし、このエリアの最大係留索張力比は2以下であるため、増しもや
い等の対策を行うことにより、係留場所として選定することはできることになる。

一方、エリア B では、最大係留索張力比が1未満であり、係留索破断被害の可能性は小
さいことが分かる。なお、最大係留索張力比がより小さい施設の方が、係留索破断に対し
てより安全な場所として評価できる。

このように、木更津港の事例計算を通じて、最大津波高や最大津波流速が小さくても係
留場所によっては係留索張力が係留索破断強度に達する作業船が見受けられた。これによ
り、津波被害の発生は、津波高や津波最大流速だけで判断するのではなく、係留索張力を
適正に評価することが重要であることが確認できた。

また、3.2 節で提案した作業船の係留場所選定手法を用いることにより、大きな湾内の港
において、津波被害低減のための適切な係留場所の選定を行うことができることを確認で
きた。さらに、係留船舶津波ハザードマップにより、それぞれの係留場所に応じた船の最

大係留索張力を把握できたため、増しもやいなどの被害低減対策を検討する上で有効であることが確認できた。(図-3.3.7)

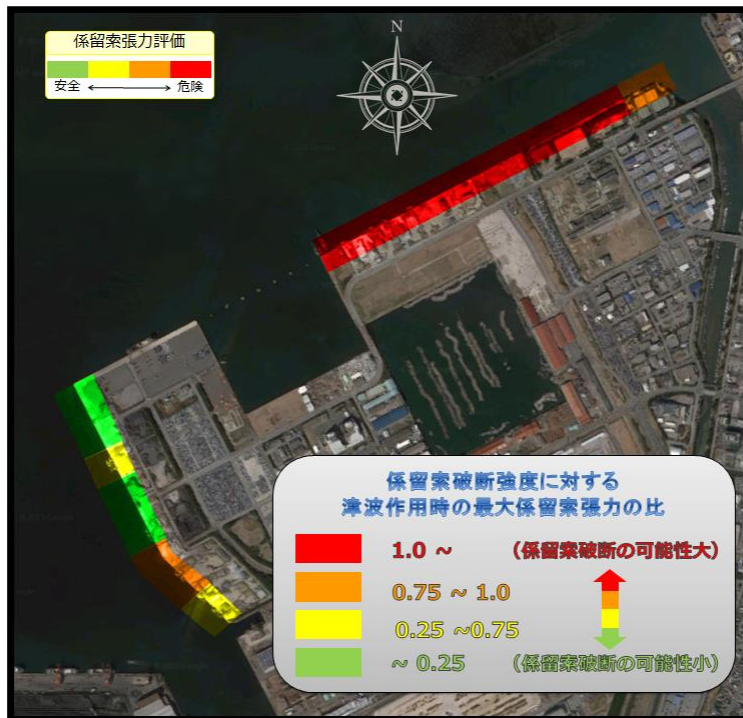


図-3.3.7 最大係留索張力評価図

3. 4 清水港における作業船の係留場所選定手法の適用

前節においては、3.2で説明した作業船の係留場所選定手法を基にして、三大湾内の港の事例として木更津港における適用性を確認した。本節では、外洋に直接面している港の事例として、南海トラフに近く地震発生後短時間で巨大な津波の来襲が予想される清水港を対象として、係留船舶津波ハザードマップを用いた作業船の係留場所選定手法の適用性を確認する。

3.4.1 清水港の係留船舶津波ハザードマップの計算条件と計算結果

清水港における作業船の係留船舶津波ハザードマップの計算条件については、3.2.1項に記述した計算条件を基本とした。清水港の条件は以下のとおりである。

(1) 津波伝播・遡上シミュレーションの計算条件

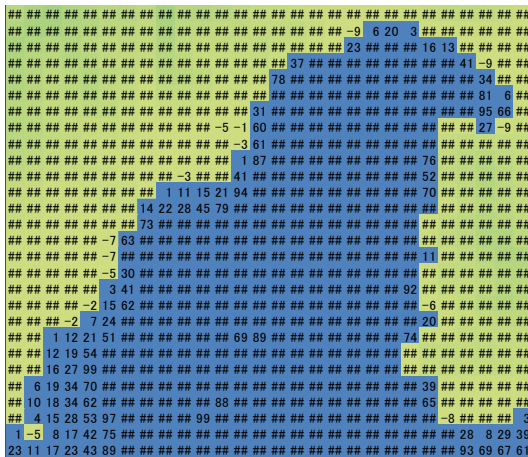
清水港の津波伝播・遡上計算を行うに当たり、大領域・中領域・小領域毎の計算設定条件及びそれぞれの領域をつなぐネスティング設定条件はそれぞれ表-3.4.1、表-3.4.2に示すとおりである。また、ネスティングの対象範囲は図-3.4.1に示すとおりである。

表-3.4.1 津波伝播・遡上計算設定条件

領域	大領域	中領域	小領域
X方向セル数	288	252	189
Y方向セル数	206	252	297
X方向セル幅[m]	2430	270	30
Y方向セル幅[m]	2430	270	30
時間刻み sec	0.01	0.01	0.01
計算時間 sec	9000	9000	9000
書き出し時間 sec	1.0	1.0	1.0
引き継ぎデータ	無	有	有
流入境界	なし	西東南	東・南
マニング粗度係数	0.025	0.025	0.05

表-3.4.2 ネスティング設定条件

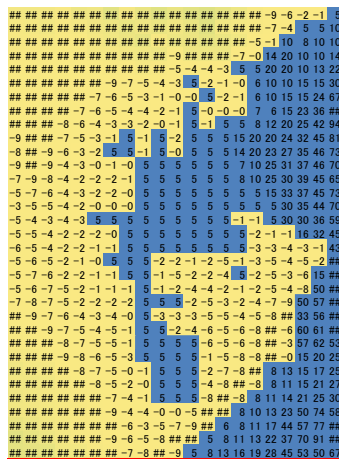
領域	大→中	中→小
X方向最小	255	101
X方向最大	282	121
Y方向最小	166	172
Y方向最大	193	204
X方向分割数	9	9
Y方向分割数	9	9
時間刻み sec	0.01	0.01
1ステップ毎のセル数	754	485



a)大領域ネスティング範囲



b)中領域(Excel)



c)中領域ネスティング範囲



d)小領域(Excel)

図-3.4.1 ネスティング対象領域の比較

津波伝播・遡上シミュレーションに用いる断層パラメータについては、各領域の津波・伝播シミュレーション結果から絞りこむこととし、最も津波の清水港内への影響が大きくなると考えられる断層パラメータとして、中央防災会議南海トラフの巨大地震モデル検討会において示された11ケースの内、Case8を選定した。

(2) 船舶応答シミュレーションの条件

船舶応答シミュレーションの条件として、対象とする船舶については、作業船は大きさや形状が多様であり一般化し難い。しかし、主作業船の中では隻数が最も多く、航路啓開作業の中心となる起重機船の内、啓開作業に参加した大型の作業船の大きさ（船幅×船長×喫水×比重）が、概ね3,000トン前後であること、及び、係留索張力の計算では船舶を大きめに設定した方が安全側の評価（係留索張力が大きめ）になることを踏まえて、標準船舶として3,000DWT程度の船舶を参考としてモデル化を行うこととする。

なお、3,000DWTの標準船舶は、作業船としては比較的大型であるため、付属作業船など

の小型の作業船の係留索張力の評価に適応させるため、補正の考え方を 3.4.2 (4) 項に示すこととした。下記の表-3.4.3 に本研究における船舶応答シミュレーションの条件を示す。

表-3.4.3 船舶応答シミュレーションの船舶の条件

船舶要素径[m]	15.0	地形要素径[m]	30.0
船舶数	20	船体重量[ton]	3000.0
船体長さ[m]	88.0	船体幅[m]	13.0
船体喫水[m]	5.0	抗力係数	0.2
慣性力係数	0.2		

また、本研究では、係留施設毎に船体要素を配置し、索の破断判定を行わない船舶応答シミュレーションによって各埠頭における係留索張力の評価を行った。

係留方法については、船首のヘッドライン、プレストライン、スプリングラインおよび船尾のスプリングライン、プレストライン、スターンライン、計 6 本の係留索を配した。

係留索には対象船舶で主に用いられるナイロンエイトロープ $\phi 40[\text{mm}]$ を想定し条件設定を行った。本研究における船舶の係留状況モデル化の概念図と係留索の条件を下記の表-3.4.4 および図-3.4.2 に示す。

表-3.4.4
係留索の条件

係留索長さ[m]	22.5
ばね定数[kN/m]	16.8
引張強度[kN]	276
$\theta[\text{deg}]$	60

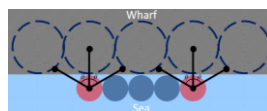


図-3.4.2 係留状況モデル化概念図

(3) 津波伝播・遡上計算シミュレーション結果

清水港の津波の伝播・遡上シミュレーションをもとに津波高、津波最大流速、津波到達時間の計算結果をまとめると以下のとおりである。

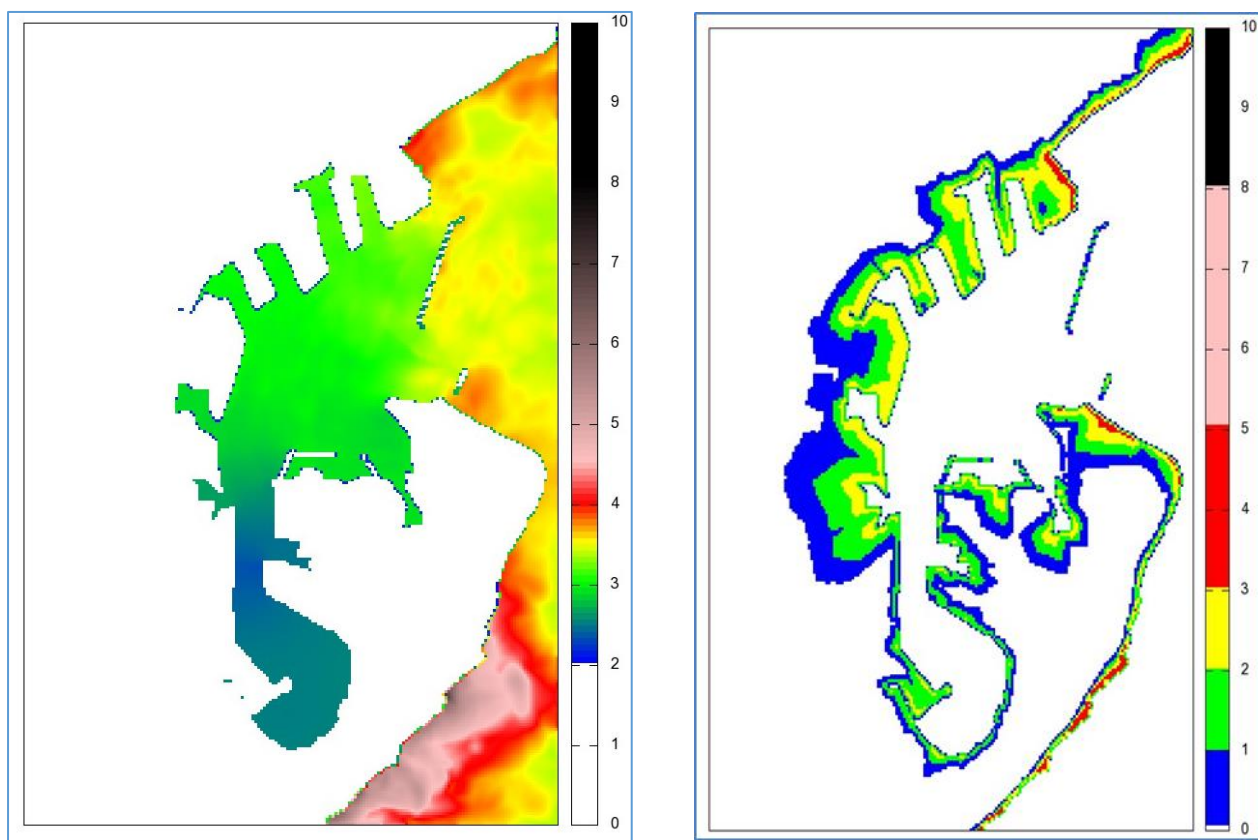
最大津波高については、港口部の新興津地区や外港防波堤前面、三保防波堤前面では 4m 前後となっており、防波堤内側の興津地区、袖師地区やその全面水域では 3m 前後となっている。また、港奥部の富士見地区や折戸地区では 2m~2.5m 程度となっている。陸上部への遡上によって浸水する際の水深の最大値（以下「最大浸水深」という。）を見ると、港口部の新興津地区の港外側や三保地区の港外側は、3m を超えており、防波堤の内側の興津地区や袖師地区、江尻地区が 2m~3m、港奥部の富士見地区や折戸地区では 1m~2m となっている（図-3.4.3）。

津波による最大流速については、新興津地区や外港防波堤と三保防波堤の間の港口部、外港防波堤の上部などで最大流速が 3~4m/s となっており、また、その周辺の港口部で 2~3m/s、港奥に向かう航路に沿って 1~2m/s となっている。また、折戸地区などの港奥部や港口部付近でも外港防波堤の内側の一部地域で 1~2m/s となっている。防波堤の開口部

や航路に沿って津波の流速が早くなっている一方で、港奥部や懐の深い水域では津波の流速が小さくなっていた。(図-3.4.4)

津波到達時間については、小型船の津波の被害が発生し始める+0.3mの津波波高となった時間を津波の到達時間と考えると、湾奥まで水深が深い駿河湾の特徴を反映し、港外の防波堤付近までは地震発生から100~200秒で津波が到達している。その後、400~600秒で港内の興津地区や袖師地区およびその全面水域に到達し、1000秒後頃には港奥部まで津波が侵出することが分かる(図-3.4.5)。

これらの計算結果をもとに係留船舶津波ハザードマップのうち、最大津波高、最大浸水深、最大津波流速のマップの作成を行った。



a)最大津波高

b)最大浸水深

図-3.4.3 清水港の最大津波高 a) 及び最大浸水深 b)

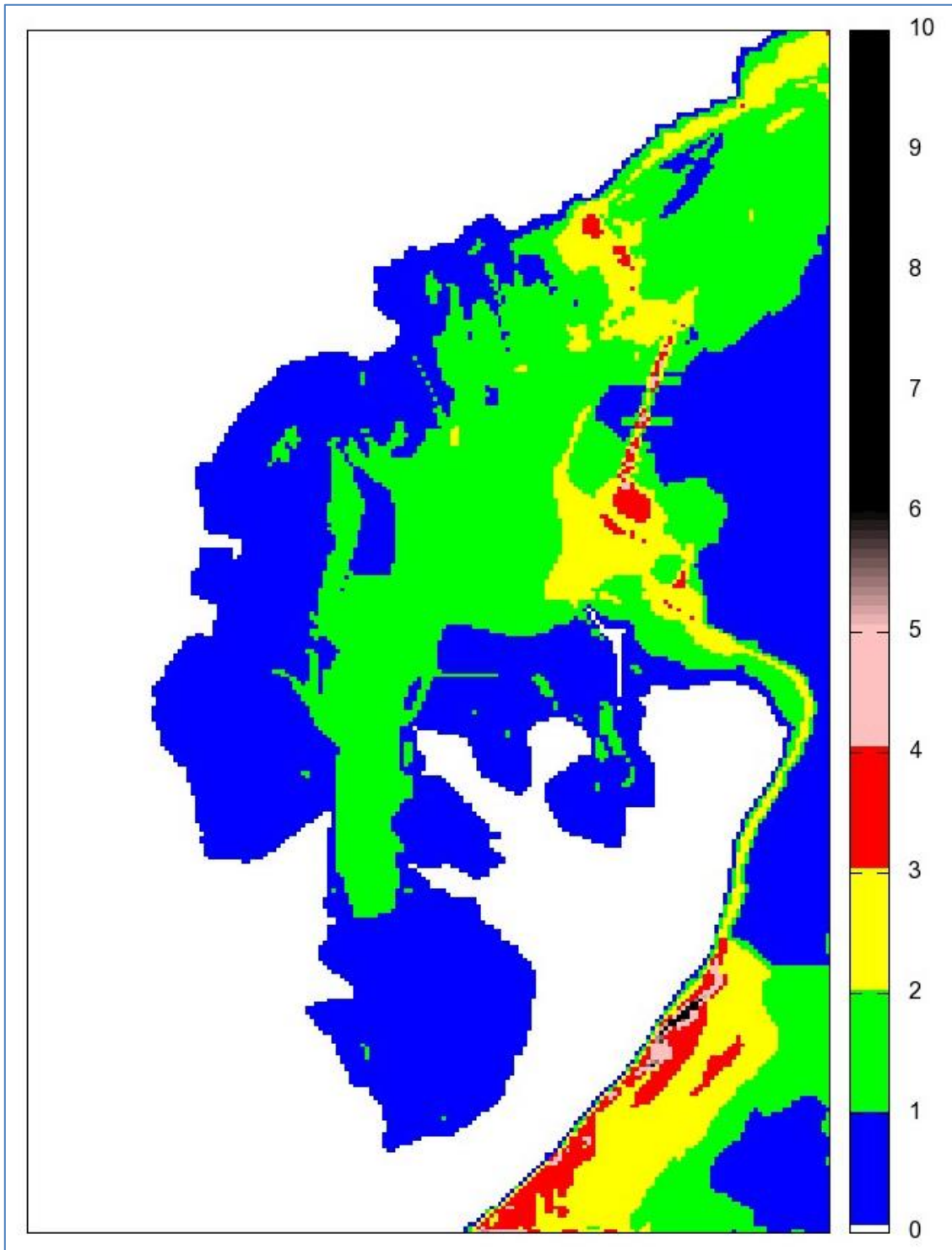


图-3.4.4 最大津波流速

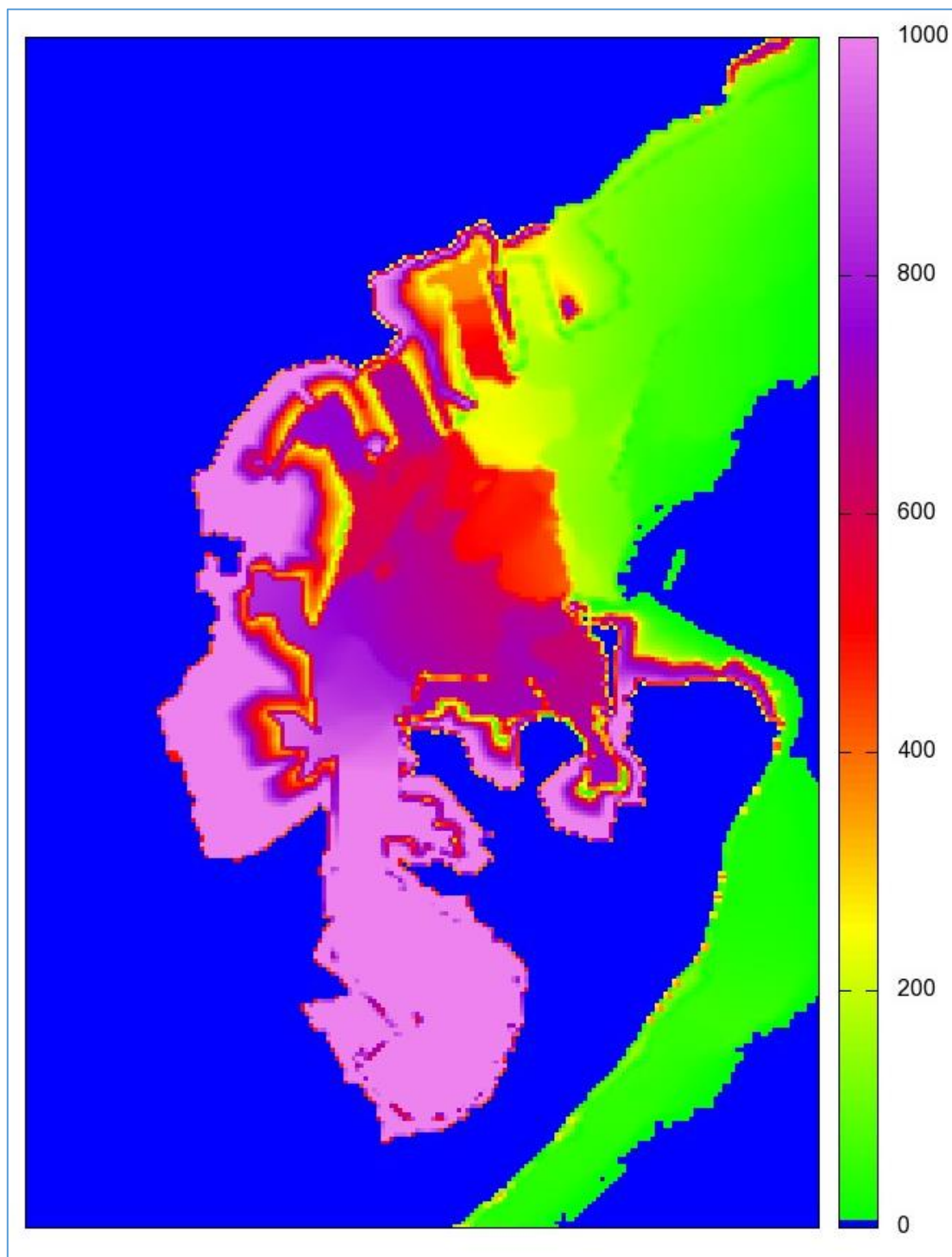


圖-3.4.5 津波到達時間

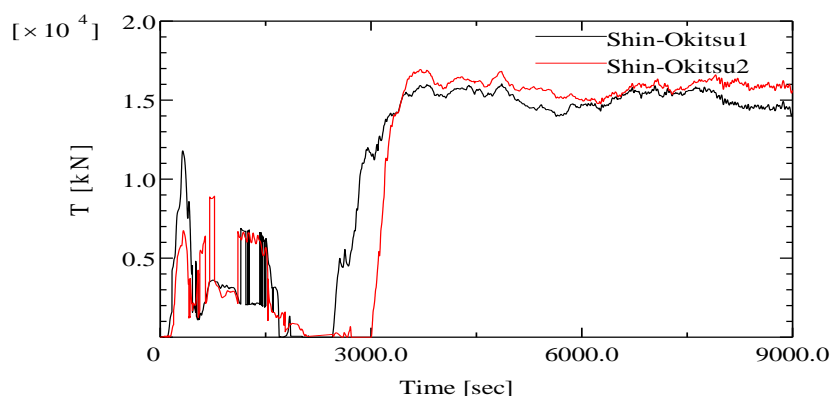
(4) 船舶応答シミュレーション結果

清水港の新興津地区、興津地区、袖師地区の各係留施設ごとに船舶動揺シミュレーションによって算定した係留索張力の総和を時系列で整理すると、各地区・施設ごとに、係留索の張力の傾向は異なっていた。

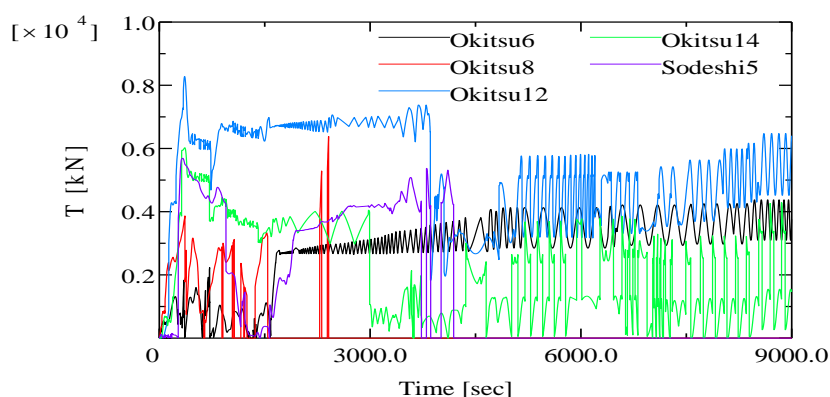
新興津地区では、船舶にとって縦波と言われる、船首から船尾に向かう船の長さ方向と波向が同一になる状態で係留した際に、係留索張力が極めて大きくなることがわかった。

(図-3.4.6a) 特に、新興津 1 号岸壁、2 号岸壁は、港口部の航路に平行に配置されており、津波により大きな流れが発生する場所となっている。

新興津地区よりも港奥に位置する興津地区や袖師地区の埠頭では、新興津地区に比較すると係留張力は小さいが、港内を反射した波の影響を受けるため、複雑な波向きとなり、係留索張力が振動するように振れる傾向が出ている。また、係留張力の最大値は、楕形埠頭の先端に近い係留施設である興津 8 号、12 号岸壁の方が、付け根部にある興津 6 号、14 号岸壁よりも大きくなっている。(図-3.4.6b)



a) 新興津地区



b) 興津地区及び袖師地区

図-3.4.6 係留索張力の時系列変化

3.4.2 清水港の係留船舶津波ハザードマップを用いた作業船係留場所としての評価

清水港において、津波伝播・遡上計算シミュレーション及び船舶応答シミュレーションをもとに、係留船舶津波ハザードマップを作成した。3.2節において定義したように、係留船舶津波ハザードマップは、最大津波高、最大浸水深、最大津波流速、及び最大係留索張力の4つを分かりやすく図化したものである。

以下に、これらの4つの図を用いて、清水港の主要な埠頭である新興津埠頭、興津第一埠頭、興津第二埠頭、袖師地区およびその周辺海域（以下本項では「対象地域」という。）が、作業船係留場所として適切であるかどうかを評価する。なお、対象地区および海域は貨物船やコンテナ船等の利用頻度が高い場所であるため、実際に作業船の係留場所として提供される可能性が低い場所が多く含まれているが、大規模地震後に短時間で津波が来襲する代表的な港として、作業船の係留場所を評価する方法を示す一つの事例としては有効なものである。

(1) 最大津波高図及び最大浸水深図による作業船の係留場所の評価

港湾内の海域の最大津波高をみると、港口部にある新興津埠頭では4m前後となり、比較的港奥部にある袖師第一埠頭でも3m前後となっている。また、最大津波高は港奥部に入るほど小さくなる傾向にあるが、今回対象としている地区では、新興津埠頭と外港防波堤の間の最も水域が狭くなっているところが最大津波高4m前後と3m前後との境界となっている（図-3.4.7）。

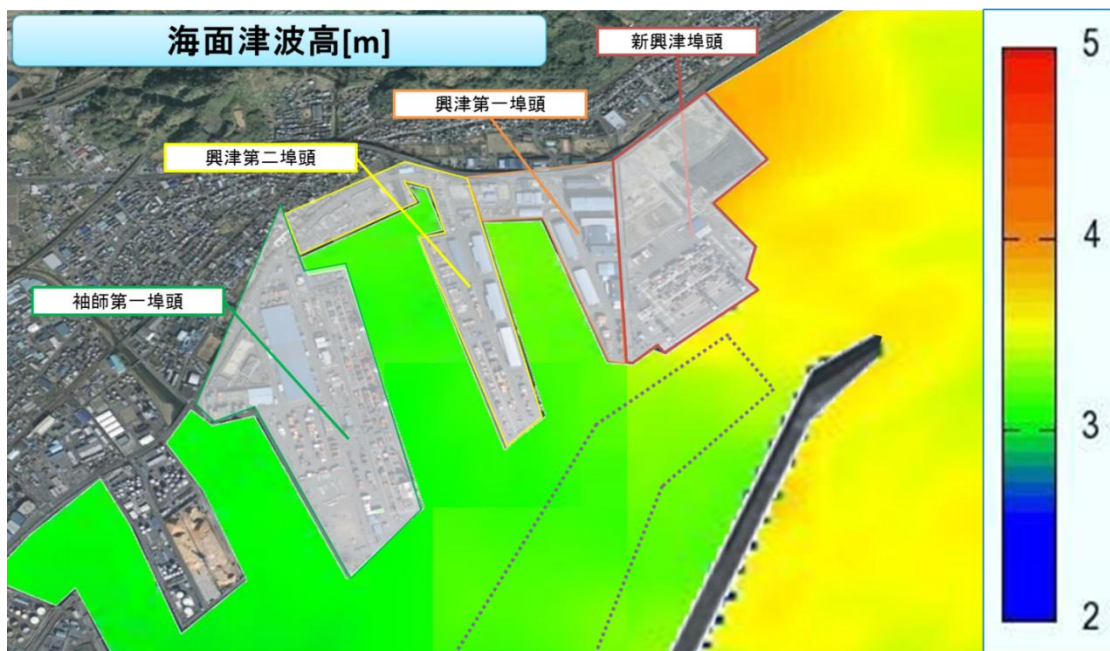


図-3.4.7 最大津波高

また、最大浸水深をみると、新興津地区の港外側では 3m 以上の浸水深となっているが、それ以外の興津第二埠頭、興津第一埠頭、袖師第一埠頭では岸壁前面の最大浸水深は 2m～3m となっている（図-3.4.8）。

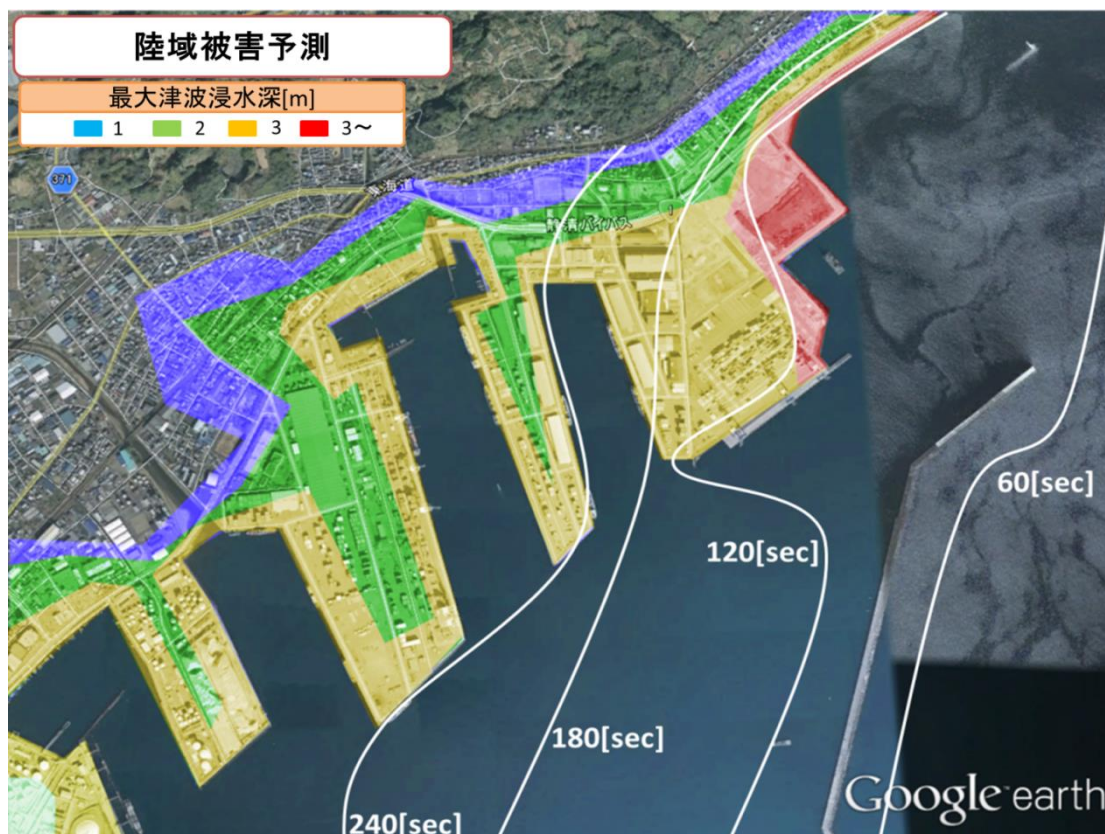


図-3.4.8 最大浸水深

作業船の岸壁への乗り上げ被害については、岸壁への乗り上げが発生する概略判断基準は、岸壁の前面の最大津波高が作業船の喫水と HWL から岸壁天端高までの高さの和を超える場合、又は陸上での最大浸水深が喫水よりも深い場合である。清水港の対象地域の場合は、作業船の喫水を 2m と仮定すると、新興津地区はもちろんであるが、それ以外の興津地区や袖師地区においても作業船の乗揚げが発生すると考えられる。このため、乗り上げ防止対策を施せない場所であれば作業船の係留場所としては不適切な場所となる。

乗り上げ防止対策としては、岸壁沖側への船首・船尾アンカーの設置や、浮体式栈橋の整備などが考えられる（4章にて記述）が、いずれにしても沖側アンカーを設置するなどの余裕のある水域の確保が不可欠である。対象地域の水域を見てみると、貨物船などの利用頻度の高い地域でもあることから、余裕のある水深の確保が難しいと考えられる。このため、対象地域を作業船の係留場所にするためには、現状の水域の利用や係留施設の利用について見直すことも含めた検討が必要であると考えられる。

なお、最大津波高図があれば、岸壁前面の浸水高が計算できるため、最大浸水深図が無くても乗り上がり被害の発生可能性を概略予測できる。

(2) 最大津波流速による作業船の係留場所の評価

港内の最大津波流速をみると、新興津地区の港外側において流速が3～4m/sの場所が見られる。また、新興津地区と外港防波堤・新興津防波堤との間の水域（以下「新興津埠頭全面水域」という。）や新興津埠頭内の陸域において2～3m/sの最大津波流速が見られる。さらに港奥部に第一興津埠頭、第二興津埠頭周辺になると、最大津波流速は1～2m/sまで低下し、袖師地区の袖師第一埠頭の西側水域まで来ると、最大流速が1m/s以下となっている（図-3.4.9）。



図-3.4.9 最大津波流速図

作業船の津波の流速による被害としては、流れの力による係留索の破断が考えられる。破断が発生する概略判断基準は流速が3m/s以上であり、清水港の対象地域内では、新興津地区の港外側は係留場所として適切でないと評価できる。この地区は最大津波高も大きいことから、作業船の係留には向かない場所である。また、新興津埠頭と外港防波堤・新興津防波堤との間の水域の流速は2～3m/sであり、また津波による引き波などで漂流物などが流れてくる通り道になることを考えると、この周辺での作業船の係留は好ましくないと考えられる。袖師埠頭の西側の水域では、1m/s以下の流速であり、流れによる作業船の流出や障害物の衝突による被害などは発生しない又は軽微であると判断できる。

係留索の破断対策としては、常日頃から係留索を増強しておく「増し舫い」が有効である。しかし、津波最大流速の大きい場所は、単に水流の力による係留索の破断だけでなく、漂流物の衝突などによる被害発生も考えられることから、流速が大きい場所や流れが集まる場所での被害低減対策は難しい。

(3) 最大係留索張力評価図による作業船の係留場所の評価

船舶応答シミュレーションの結果をもとに作成した最大係留索張力評価図を用いて、被害発生の概略判断基準である最大係留索張力が係留索破断強度以上となる場所を見ると、ほとんどの岸壁が該当し、係留索破断の可能性が高い場所と判断できる。その中でも最も危険性が高い岸壁は、新興津1号、2号埠頭、興津9、10号埠頭、袖師8、9、10号埠頭となっており、次に危険性の高い岸壁は、興津11、12、13号埠頭、袖師7、6号埠頭となっている。港湾の主航路に接している、楕形埠頭の先端に近い場所の係留索に大きな力が働いている。一方、楕形埠頭の根元にある埠頭は、係留索張力は先端付近に比べると小さく出るところが多い(図-3.4.10)。



図-3.4.10 最大係留索張力評価

今回のシミュレーションでは3000DWT級の船舶を標準船舶とし、通常の係留状況を設定したため、啓開作業などでよく使われる標準的な起重機船を岸壁係留した場合よりも船舶質量が大きく、係留索張力が大きくなる傾向にある設定となっており、安全側の判断となる。

なお、付属作業船などの小型作業船にこの結果を対応させるのは、船舶の規模があまりに大きく異なることもあり現実的でない。このため、船舶の規模(質量)に応じた補正の概念を導入することを提案する。

(4) 係留索張力の補正

作業船には色々な種類や形状があるため、同程度の規模の作業船であれば係留場所を選定するための評価として本シミュレーションの係留索張力をそのまま活用することもできるが、船の大きさや喫水などが大きく異なる場合には、本シミュレーションの結果をそのまま活用することは不適切である。この場合には、作業船の大きさや喫水などに応じて本シミュレーション結果を補正することが重要である。

この補正方法の一つとして、船舶の質量比を用いることが考えられる。すなわち、係留索に働く力が、短い時間での船舶の慣性力の変化、すなわち船舶の加速度に概ね比例すると設定すると、係留索に働く力の合計 F を船舶に働く加速度 α と船舶の質量 M によって表すと式 (3-5) となる。

$$F = M \alpha \quad (3-5)$$

M : 船舶の質量 (実際の排水トン)

α : 船舶に働く加速度

津波のように波長の長い波の場合は、大きな船も小さな船も、長い波長の波の上に乗っていると考えることが出来るため、加速度は同程度と考えることができる。このため、船の大きさにより係留索張力を補正する方法としては、船舶の質量比 (実際の排水トン比) を用いることが一案として考えられる。この際には、船の大きさに応じた係留方法の違いや、係留索の形状・弾性特性の違い、港の形状による津波の擾乱の影響など様々な不確定要因が考えられることから、ある程度の安全率を見ておくことが現実的である。

このような考え方を踏まえると補正係数 f は、以下の式で概算できる。

$$f = S_0 \frac{M_s}{M_m} \quad (3-6)$$

f : 補正係数

M_s : 対象船舶の質量

M_m : 標準船舶の質量

S_0 : 安全率

この補正の考え方及び安全率の考え方については、後述の 4.2.5 項において分析し、考察を加えているが、対象とする作業船が標準船舶よりも十分小さい付属作業船のような場合は、4.2.5 (2) の結果をもとにすると、作業船の係留索張力は標準船舶の係留索張力の補正值よりも小さくなる傾向があるため、安全率を 1.0 としても係留索の破断に対し安全側に評価できる。

被害発生の可能性がある場合の被害低減対策については、増し舳が適切である。ただし、係留索張力が非常に大きい場合や、津波により衝撃的な力が働く場合などは増し舳の対策では限界がある。増し舳を行う場合でも、係留索の引張強度のバラツキや、津波による衝撃的な力の発生の可能性を考慮して、適切な余裕 (冗長性) を考慮しておくことが好ましい。

(5) 総合的な係留場所の評価

以上、(1)～(3)に示したように、乗り上げ被害、流出又は障害物衝突被害、係留索破断被害の3つの被害に対して、最大津波高図、最大浸水深図、最大津波流速図、最大係留索張力評価図の4つの図を用いて作業船の係留場所の絞り込みを行うと、串側埠頭の付け根部の一部の岸壁を除くと、作業船の係留場所としては不適切と評価できる。また、付け根部の岸壁については、適切な係留索破断対策を取ることが出来れば、作業船の係留場所として対応可能であるが、対策の可否や方法等について水域を利用している関係者や港湾管理者等との調整を行う必要がある。

なお、評価にあたっての清水港の係留船舶津波ハザードマップを再度まとめたものを図-3.3.11に示す。

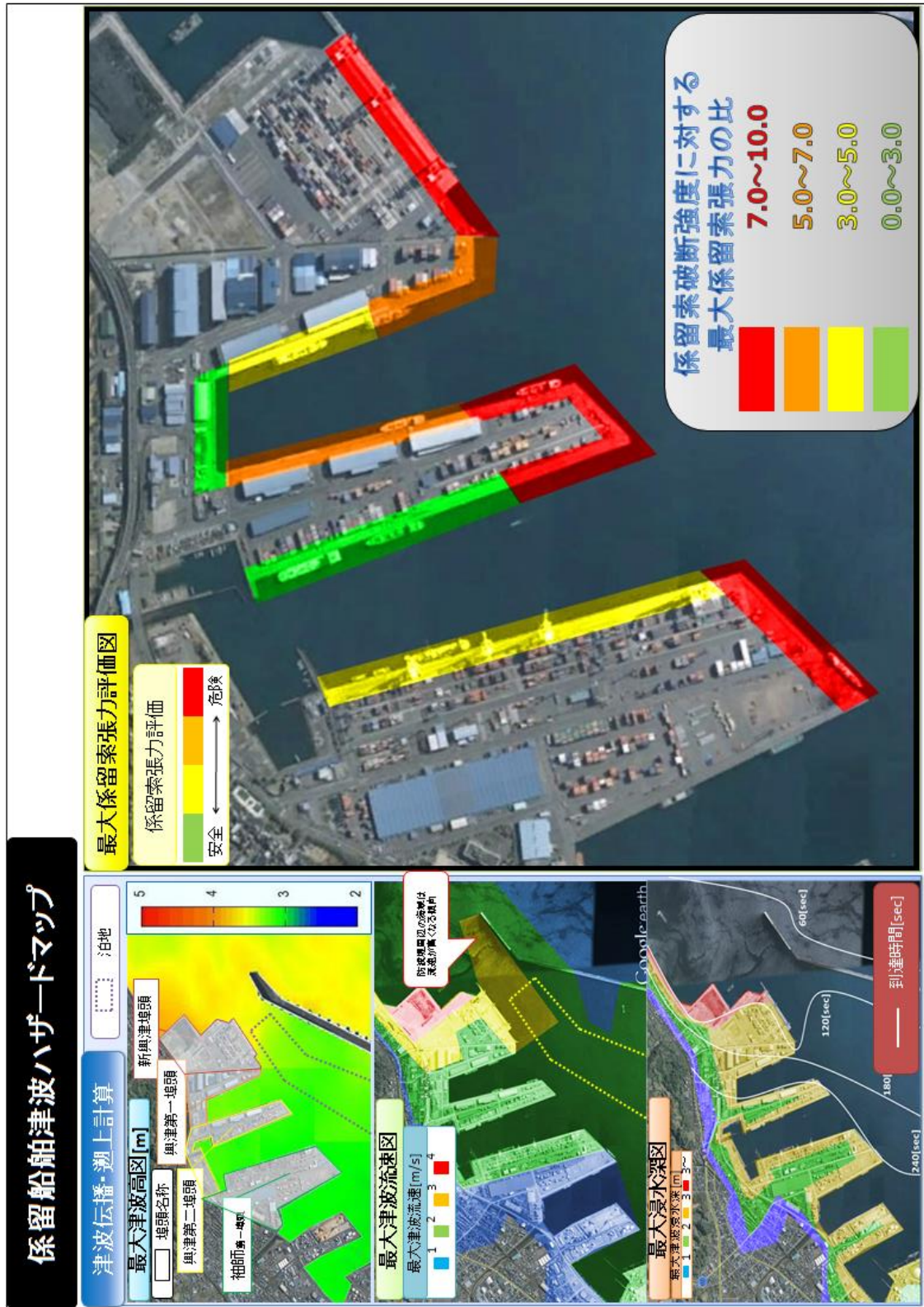


図-3.4.11 係留船舶津波ハザードマップ

3. 5 作業船の係留場所選定手法のまとめ

本章では、作業船の係留実態と課題を踏まえて、作業船の係留場所選定手法を提案し、事例による適用性の確認を行った。その結果をまとめると、以下のとおりである。

- ・津波による係留船舶の被害実態をみると、同じ港内であっても係留場所によって被害状況が異なり、被害低減のためには係留場所の選定が重要な要素であることを明らかにした。
- ・津波来襲時において港内に係留されている作業船の係留場所ごとの被害状況を予測するため、係留船舶津波ハザードマップを開発した。
- ・津波被害発生の概略判断基準を設定することにより、係留船舶津波ハザードマップを用いて、作業船係留場所の被害発生の可能性を判断し、作業船の係留場所としての適性を評価する手法を提案した。
- ・多くの作業船が存在している大きな湾内の港の代表として木更津港（木更津南部地区）を事例として選び、作業船の係留場所選定手法を用いて、係留場所の評価を行った。その結果、大きな湾内の港における作業船の係留場所選定手法の適用性を確認した。
- ・大きな津波が短時間で来襲することが予想されている外洋に面した港湾を代表して、清水港を事例として選び、作業船の係留場所選定手法を用いて、係留場所の評価を行った。その結果、外洋に面した港における作業船の係留場所選定手法の適用性を確認した。

以上の研究のフローをまとめると、図-3.5.1のとおりである。

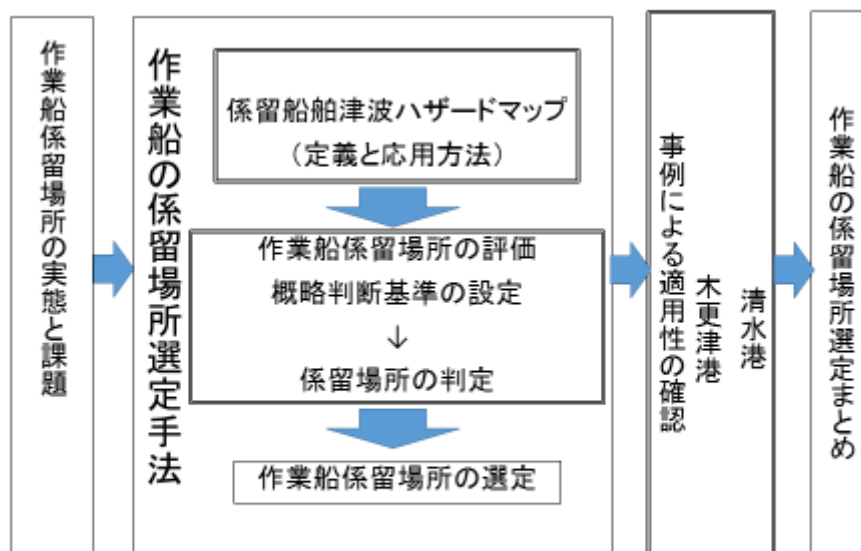


図-3.5.1 作業船の係留場所選定手法のまとめ

第4章 津波被害を低減するための作業船係留方法の提案

本章では、作業船の係留実態及び船舶で津波被害を受けなかった事例等を踏まえて、MPSシミュレーション計算により津波による船舶挙動および係留索への影響分析を行い、被害低減対策を施した場合の効果についても合わせて分析し、作業船の係留方法選定の考え方として取りまとめる。

4.1 作業船の係留方法の実態と課題

作業船の係留方法を検討するにあたって、まず、作業船の係留方法実態を把握しておくことが重要である。ここでは、3.1 節において使用した作業船係留場所実態調査（平成 25 年 2 月取りまとめ）を基に、係留方法について実態を明らかにする。

4.1.1 作業船の係留方法の実態

係留方法については、係留場所や施設によってその方法が異なるが、大きく整理すると岸壁等に係留する場合と、水域に係留する場合がある。岸壁に係留する方法としては、通常の船舶と同様に岸壁に平行に係留する方法（以下「平行係留」という。）と、岸壁に垂直に係留する方法（以下「垂直係留」という。）が見られる。水域に係留する場合は錨を用いてアンカーリングにより係留する方法と、係留杭などを設置して、これにつながりとする方法などが見られる。また、それぞれの係留方法において複数の作業船を平行に繋ぎ合わせた係留（以下「複数係留」という。）

も行われている。

実態調査を基に、どのような係留方法を選択しているかを調べ取りまとめたものが表-4.1.1 である。これによると岸壁等への平行係留が全体の約 60%強を占め、次いで岸壁等への垂直係留が 25%を占めている。単独係留と複数係留では、全体として

は複数係留が多くなっている。平行の単独係留は日本海側の港など地方の港で良くみられる。一方、複数係留は三大湾や関門地区などで比較的良くみられる。垂直係留は大阪湾や関門地区で良くみられる。水域での係留は単独の係留は見られず複数係留されていた。

表-4.1.1 作業船の係留方法の実態

係留場所	係留方法	箇所数	
岸壁等	平行係留	単独係留	16
		複数係留	11
	垂直係留	単独係留	4
		複数係留	7
水域	単独係留	0	
	複数係留	6	

代表的な平行係留については、図-4.1.1に示すが、同じ場所で単独係留と複数係留が行われているところもある。また、平行係留では土運船などが何艘も並列につながり合わせられることもしばしばみられる。この係留方法では、岸壁等への舳いにより岸壁等に係留されており、アンカーなどは用いられていない場合が多い。

代表的な垂直係留について図-4.1.2に示すが、垂直係留

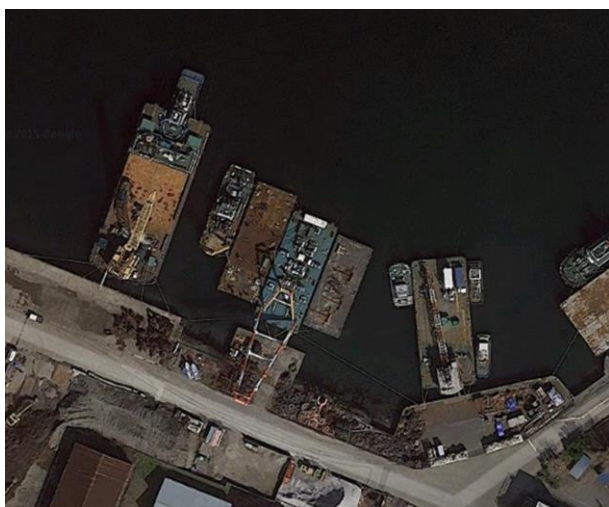


図-4.1.2 垂直係留の例 横須賀港新港地区 (google map より)

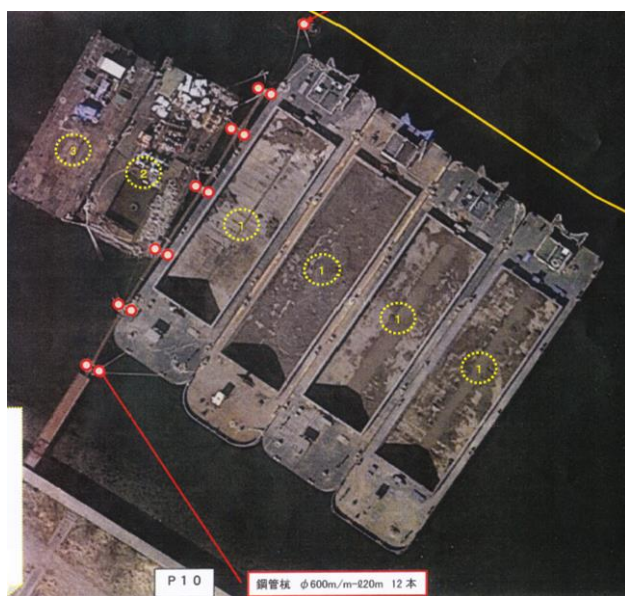


図-4.1.3 杭を使った係留方法
(東京港中央防波堤内側水域)

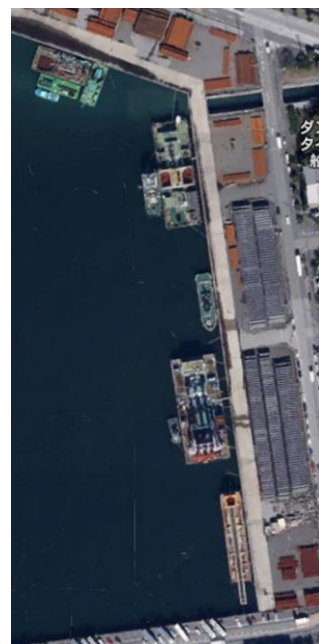


図-4.1.1 平行係留の例
千葉港船橋 (google map より)

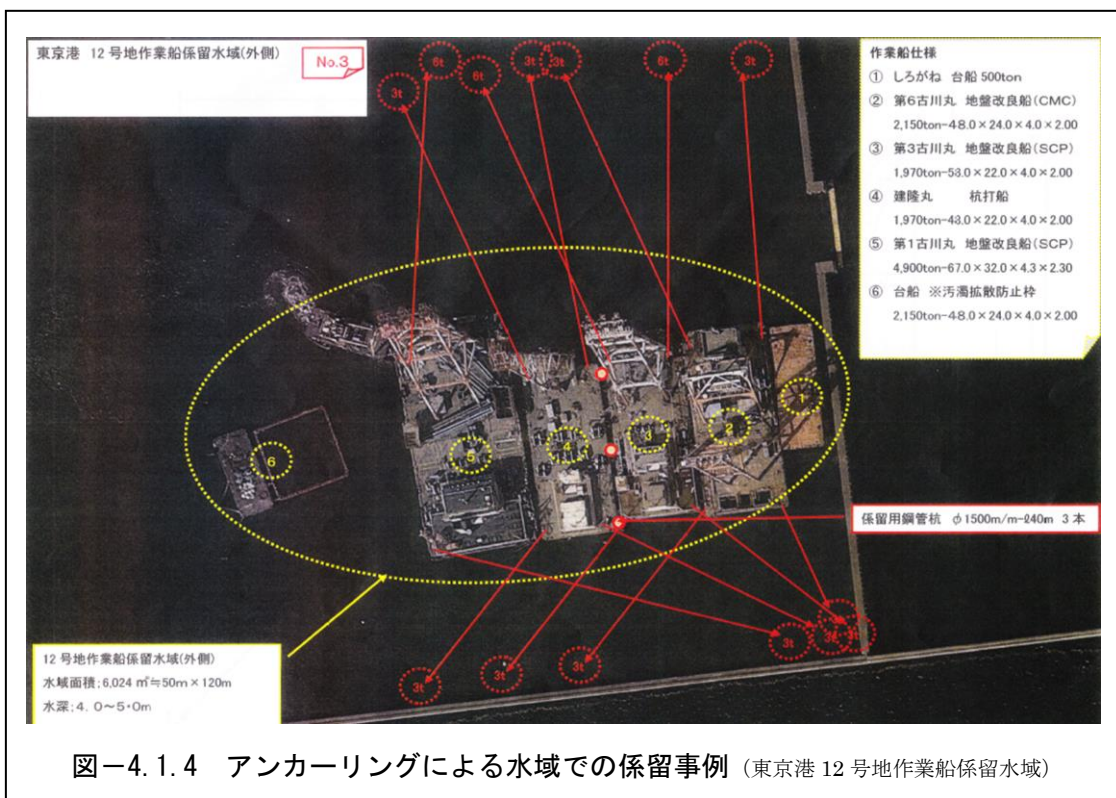
の場合は、護岸から少し離して沖側にアンカーを取って係留させる方法が良く見られる。この場合は作業船から岸壁に上がるために渡橋を架けている。

また、護岸の近くに係留する場合には、引き潮の際に護岸のマウンドに船底が乗揚げないように船を護岸から少し離して係留する場合もある。さらに水平係留と垂直係留のいずれの場合でも、大型作業船の横に小型の付属作業船が係留されることもよくある。

水域での係留について代表的な係留方法として杭を使った係留方法を図-4.1.3

に、アンカーリングによる係留方法を図-4.1.4に示す。

以上みてきたように、係留場所に応じて工夫された係留方法が取られており、船員等が常駐しない状態で強風などによる気象・海象の急変に対応できるようある程度配慮されているものと考えられる。また、複数係留が多用されている地域は、作業船の数に比して係留施設自体が少ないという事情や、費用面等から岸壁の専有長を短くしたいという事情などがあると考えられる。



4.1.2 作業船の錨について

作業船の係留実態をみると、港によってはアンカーリングによる係留が用いられているところも多い。この時に重要なのが作業船の錨などの係留設備の能力である。

作業船船舶設計基準（日本作業船協会）⁴¹⁾によると、「作業船の錨は一般の船舶に比べてその使用方法が大きく異なっている。」とされており、錨泊のために使われるだけでなく作業を行う際の船舶位置の固定などにも使われていることを示唆している。また、「錨の単重及び合計重量について調査した結果は、船舶規則規定の艀装数によるものと作業船に実際に装備しているものとを比較する、錨の単重量は、規定のランク～10数ランク大型の錨を装備し、装備数も多いので、合計重量は規程をはるかに上回っている。」と記述されており、十分に大きな錨重のものが多い。

また、同資料で錨鎖と鋼索の使用実態をみると、錨鎖のみ装備しているのは12%であり、それ以外は、鋼索のみを使っているか鋼索と錨鎖との両者を併用している。また、専用揚

錨機を有するものが62%あり、ワイヤードラムの付いた揚錨機を持った船が多い。

このように作業船は一般の船舶よりもアンカーの能力が高く、アンカーリングを施したときには、一般の船舶よりも係留力が大きい。

4.1.3 作業船の係留方法の特徴と課題

以上のように作業船の係留方法についてみてきたが、地域によって、また、場所によって係留方法は異なるが、通常の船舶係留と異なる特徴としては、複数係留が多く用いられていることや、沖側アンカーによる垂直係留が行われていることなどが上げられ、いずれも場所に応じた工夫された係留が行われている。また、船員等が常駐しない状態で強風などによる気象・海象の急変に対応できるようある程度は配慮されているものと考えられる。

また、アンカーについては、通常の船舶の規定のランクをはるかに超えたものが備え付けられており、アンカーリングによる係留力は通常の船舶よりも大きいものが多いと考えられる。これは、作業船のアンカーが単に作業船の水域での停泊のためだけでなく潮流の激しい場所での作業時における位置の確保など通常の船舶と異なる使い方をされていることによるものと考えられる。

このように、作業船の係留方法の特徴を踏まえ、作業船の津波被害低減対策を進める上での課題は、従来から工夫されてきた係留方法が、津波来襲時において有効に機能するかどうかを検証することである。すなわち、主作業船に付属作業船を係留させるなどの複数係留や、垂直係留において良くみられる沖側にアンカーを採る方法など、工夫されてきた係留方法の津波被害低減に対する有効性を明らかにする必要がある。

4. 2 浮体式棧橋による係留索張力低減効果等の分析

本節では、被害低減に有力な係留方法の候補の一つとして、2.3.1項(2)で記述したマリゲート塩釜等において浮体式棧橋に係留していた小型船に被害が生じなかった事例に着目し、浮体式棧橋による係留索張力の低減効果や船舶の乗り上げ防止効果等について分析する。

4.2.1 マリゲート塩釜の津波被害事例調査

(1) 現地調査の概要

マリゲート塩釜の現地調査は、震災当時の詳細な状況を把握するため、2012年7月14日に、本研究において協力関係にある村田一城、増田光一、増田光弘、居駒知樹らにより、マリゲート塩釜の港湾関係者に対するヒアリング及び港内調査等により行われた。

ヒアリングでは、震災当時に実施した係留船舶への緊急対策及び津波来襲当時の状況を把握した。また、港内調査等では、浮棧橋の形状・規模、係留船舶の形状・喫水、手すり等の被害状況、津波の痕跡等を把握した。

調査の主な結果は以下のとおりである。

当時の状況：マリゲート塩釜の浮棧橋に係留されていた運航船3隻

対応手順：職員や観光客を避難終了させたのち、マリゲート塩釜の浮棧橋に係留されていた運航船(3隻)に対して通常時の2倍の増し舫いを行った。

船舶被害：浮棧橋に係留した船舶(観光遊覧船)には被害が見られなかった。一方、湾奥の通常の固定式岸壁に係留された船舶は岸壁に乗り上がる被害をうけた。ただし、係留索の破断には至らなかった。

浮棧橋被害：浮棧橋の連結部にあるハンドレール(手すり)の一部が湾曲した。

水位上昇：津波による水位上昇は、震災当時の浮棧橋地点で約3.4mであった。

浮棧橋形状：長さ52.0m、高さ3.0m、奥行き9.0m、喫水1.0m、
係留方法は4本の係留杭に係留するドルフィン方式、
係留杭の高さは海面から7.5m、全面水深約5m(津波時)

船舶緒言：浮棧橋に係留されていた3隻は比較的似た緒言であった。主な船舶の諸元は、トン数102GT、長さ30m、高さ4m、奥行き6m、喫水2m

(2) 調査結果の分析

浮棧橋に係留したことによる効果については、通常の固定式岸壁に係留していた船舶が岸壁の上に乗り上げる被害を受けたにもかかわらず、浮棧橋に係留していた船舶は被害を受けなかったことから、岸壁への乗り上げを防止する効果があることが確認できた(図4.2.1)。なお、係留索については、通常の固定式岸壁に係留した船舶のものも浮棧橋に係留した船舶のものも、破断がなかったことより、両船舶に働く流体力が係留索の破断強度の範囲内であったことが分かった。



図-4.2.1 マリングート塩釜の浮棧橋への係留状況と固定式護岸での被災状況

マリングート塩釜より提供

浮棧橋の構造については、四隅を係留杭により支持され、浮棧橋との接合部には弾性体でできたローラーが取り付けられ、潮位変動や津波のような水位上昇に対して追従可能な構造となっていた。また、杭については、径は約 1.0m であり、浮棧橋の連結部に隣接する 4 本の杭の上部は相互に強固に連結固定されており剛性の高い構造となっていた。浮棧橋連結部にあるハンドレール（手すり）が湾曲していたのは（図-4.2.2）、震災当時の津波による水位上昇に伴って浮棧橋が上昇し、係留杭上部の連結固定部分に圧迫されたところにより生じたものであると考えられる。また、浮棧橋が漂流しなかったのは、水位上昇が係留杭による上下動の可動範囲以内に収まったことが主たる要因であると考えられるが、ハンドレール（手すり）の湾曲により係留杭上部の連結固定部分が浮棧橋上昇に対して抑止する役割を果たしていたことも伺える。



図-4.2.2 マリングート塩釜の浮棧橋連結部及び係留杭の構造と手すりの被害

これらをまとめると、マリングート塩釜の浮棧橋に係留していた船舶が津波による漂流、

座礁（岸壁等への乗り上げ）を免れた理由は以下の通りであると考えられる。

- ① 浮棧橋が複数の直立杭によって係留されており、ローラーを介して上下可動の構造であったこと。
- ② 津波来襲時に浮棧橋とこれに係留していた船舶が共に水位変動に追従して上下したため、係留索に鉛直方向の張力変化が生じなかったこと。
- ③ 津波来襲時の浮棧橋の上下動が杭の可動範囲内に収まっていたこと。
- ④ 津波の流れによる船舶に働く流体力が係留索の破断強度の範囲内であったこと。

なお、以上の調査結果を踏まえて、数値シミュレーションによる現象再現等の分析を行うこととする。

4.2.2 MPS シミュレーション計算手法及び係留索モデル

MPS法（Moving Particle Semi-implicit Method）は、越塚ら⁴²⁾⁴³⁾が提案した粒子法の一つであり、流れを流体粒子の運動であると考え、その粒子を時々刻々と追跡することで流れの場を捉える考え方である。格子法がある領域内の計算点のある時刻で通り過ぎる流体の物理量を考えるオイラー型であるのに対して、粒子法はラグランジュ型であるという点が格子法との決定的な相違点である。格子法のような格子生成の煩雑な作業を行わずに自由表面の大変形を伴う現象を扱うことができる手法として開発されたものである。

以下、本研究で用いたMPS法について概説する。

(1) MPS法の計算手法

本研究で用いたMPS法（Moving Particle Semi-implicit Method）は、作業船の被害分析及び係留方法の検討のために、増田⁴⁴⁾が開発したMPS法プログラムコードを用いた。支配方程式は、流体の連続の式（4-1）とナビエストークス方程式（4-2）であり、粒子間相互作用モデルを用いて離散化した。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (4-1)$$

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{k}g \quad (4-2)$$

津波を表現するために造波境界を設けることとし、ピストン式の造波板を用い、造波板の動きを造波板粒子に速度を与えることによって決定した。

MPS法における浮体運動の取り扱い、相田⁴⁵⁾によって検証されたモデルを用い、複数の粒子の集合体として一つの個体を表現し、個体の重心位置の併進と回転によって運動させた。3次元MPSの慣性モーメントは各軸まわりに3つ設定した。また、計算誤差が蓄積しにくいように、各時間ステップで慣性モーメントを離散的な粒子の集合から毎回計算する方法を採用した。

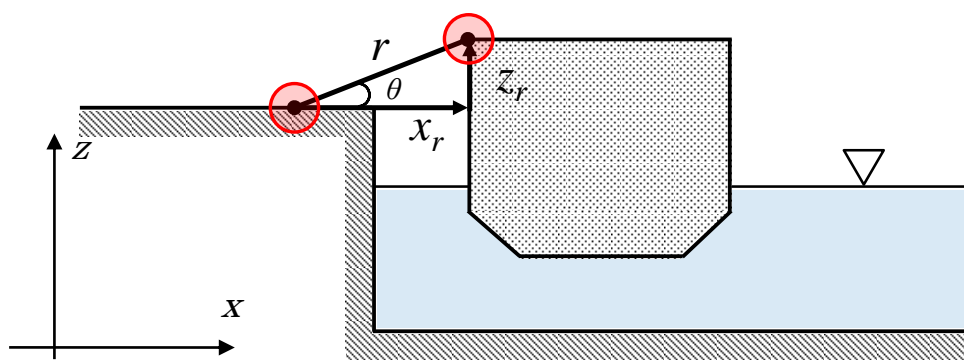
(2) 係留索張力の計算方法

係留力項については、ナビエストークス式に係留項を設けることで係留索張力 \mathbf{Fr} をモデル化した(4-3)。

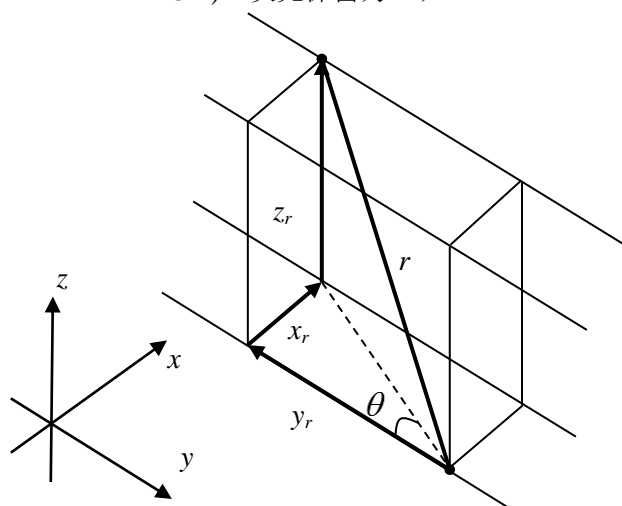
$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\vec{u} + \vec{k}g + \frac{1}{\rho_0 V_i} \int \mathbf{F}_r dt \quad (4-3)$$

係留索に模擬した拘束条件を浮体モデルの係留点と係留索の起点となる係留点との2点間に作用する線形ばねとして表現した。

なおシミュレーションでは線形ばねは十分に強度のある大きめの係留索の弾性係数を採用し、線形ばねに働く力(係留索張力)が想定する係留索の破断強度を超えた時刻以後は、係留力が働かないようにすることで、係留索の破断を表現した。また、防舷材についても考慮しないこと(弾性は無限大、摩擦係数は0)とした。2次元及び3次元における係留索のモデルは図4.2.3のとおりとした。



3-1) 2次元係留力モデル



3-2) 3次元係留力モデル

図-4.2.3 各次元における係留索のモデル化

4.2.3 マリンゲート塩釜の浮体式棧橋のモデル化と効果の検証

本節では、塩釜港内マリンゲート塩釜の浮体式棧橋に津波が来襲した時の状況をもとにモデル化を行い、3次元MPS法を用いて数値シミュレーションを行うことにより津波時の観光旅客船の挙動を分析し、浮体式棧橋の津波被害低減の効果について検証した。

(1) モデル化の概要

本検証においては、マリンゲート塩釜の船舶の規模と浮体規模を参考にし、船舶、岸壁、浮体式棧橋を図-4.2.4に示すようにモデル化した。数値シミュレーションに用いた数値計算諸元は観光旅客船の諸元及びその係留状況を基に表-4.2.1のとおり設定した。

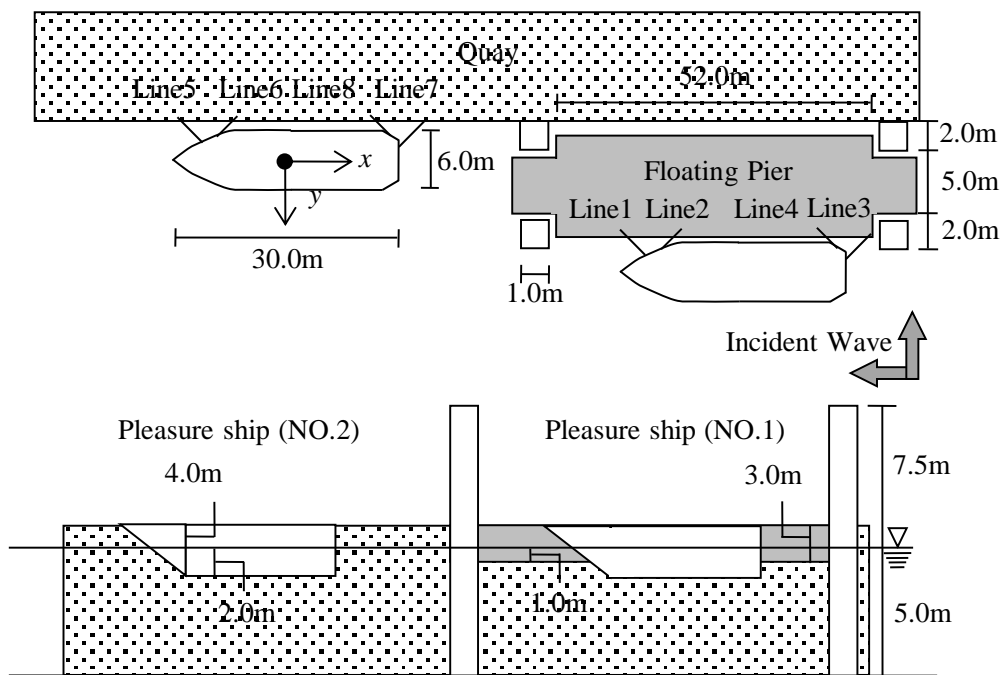


図-4.2.4 通知計算に用いたモデルの概要

表-4.2.1 数値計算諸元（係留索諸元）

GT	102.0 [t]
Particle numbers [0degree]	162,081
Particle numbers [90degree]	472,048
Density of Vessel's particles	467.7 [kg/m ³]
Particle distance	1.0 [m]
Length of Bow line	4.24 [m]
Length of Spring line[Front]	4.12 [m]
Length of Spring line[Back]	4.12 [m]
Length of Stern line	5 [m]
Spring constant	41.4 [kN/m]
Number of Tether Line1,5	2
Number of Tether Line2,6	1
Number of Tether Line3,7	2
Number of Tether Line4,8	1
Breaking Force	64.0 [kN]
Stretch rate	36.4 [%]

浮体式栈橋は長さ 52.0m、高さ 3.0m、奥行き 9.0m であり、喫水は 1.0m である。浮体式栈橋は 4 つの係船柱によって係留するドルフィン方式で係留されており、係船柱の高さは海面から 10.0m とした。船舶は 102.0t の観光船とし、長さ 30.0m、高さ 4.0m、奥行き 6.0m、喫水 2.0m である。

各船舶の係留条件は、船首側においてバウラインに 2 本、スプリングラインに 1 本とし、船尾側においてはスターンラインに 2 本、スプリングラインに 1 本とした。索の最大伸び率は 36.4% であり、1 本あたりの破断荷重は 64.0kN である。また、ばね定数は 41.4kN/m である。この時、バウラインおよびスターンラインにおいては 1 点の係留点につき 2 本分のばね定数を設定し、1 つの船舶で 6 本の係留索で係留されていることとした。

津波の入射角度は船舶に対して船尾から船首に水平に入射する方向を 0 度とし、垂直に入射する方向を 90 度とした。ここで、計算に用いた津波は、時間的な計算コストを考慮して模擬津波として孤立波を採用し、ピストン式造波板によって造波した。最大津波高は東日本大震災時のマリゲート塩釜で痕跡として残っていた 3.4m に設定した。また、本検証においては、6.0m を超えるケースにおいても検証を行った。なお、入射波高測定位置は 0 度の場合は浮体式栈橋先端位置、90 度の場合は船舶先端位置に目標津波高を入射した。

また、本検証では浮体式栈橋を固定し直立岸壁とした場合との比較も行い、浮体式栈橋に係留することによる係留索張力の低減効果についても検討も行った。

(2) 浮体式栈橋の効果の確認

数値シミュレーションの結果は以下のとおりである。

1) 入力波の波形

数値シミュレーションにおける津波の入力波は、シミュレーション開始 30 秒後から水位が上昇をはじめ 70 秒後前後にピークを迎えるものである。最大津波高 3.4m のものは、概ねなだらかに上昇してピークに達する波形であり、6.4m のものは一度 4.5m 程度の波高まで上がった時点で水位上昇が短時間止まった後で再び上昇してピークを迎える波形となっている。(図-4.2.5)

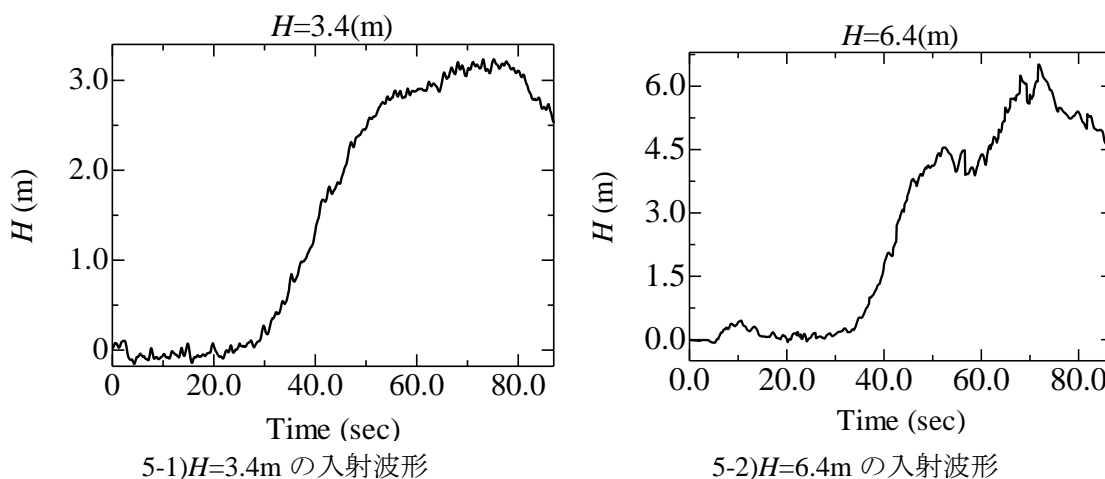


図-4.2.5 波高ごとの入射波形

2) 津波入射角 0 度の場合

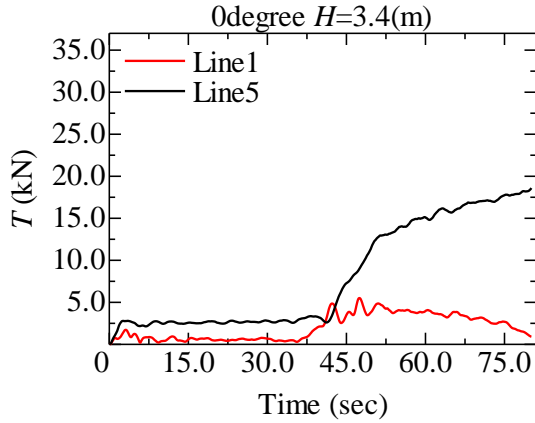
マリゲート塩釜の津波来襲時に近い条件となっている入射角度 0 度で最大津波高 3.4m の場合の係留索張力を浮体式栈橋に係留した場合と固定式岸壁に係留した場合で比較すると、いずれも固定岸壁に係留した船の係留索張力の方が大きくなり、浮体式栈橋に係留した係留索の張力の 3~4 倍になった。固定式岸壁に係留した場合の張力は、シミュレーション開始から 40 秒頃 (津波の水位上昇が 1m 程度になる頃) から大きくなり始め、50 秒過ぎ頃 (津波の水位が 3m 近くになる頃) まで急に大きくなり 60~75 秒には船首のバウライン (Line5) と船尾のスターンライン (Line7) の張力は 15kN を超えた。一方、浮体式栈橋に係留した場合のバウライン (Line1) とスターンライン (Line3) の最大係留張力は 5kN 程度でありシミュレーション開始から 40 秒程度で上昇した後 45 秒以後は多少振動しつつも横ばいから若干減少して推移した。

スプリングラインについても同様の傾向が見られたが、係留張力の絶対値はバウライン、スターンラインの半分程度であった。(図-4.2.6)

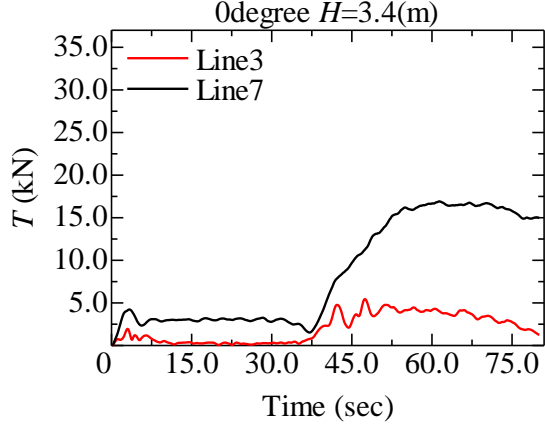
これらの結果から、浮体式栈橋によって係留された船舶に作用する係留索張力は低減することが確認された。これは、津波による水面の変動に応じて浮体式栈橋が浮上することによって、津波水位変動に起因する係留索張力が発生しなかったことが大きな要因である

と考えられる。

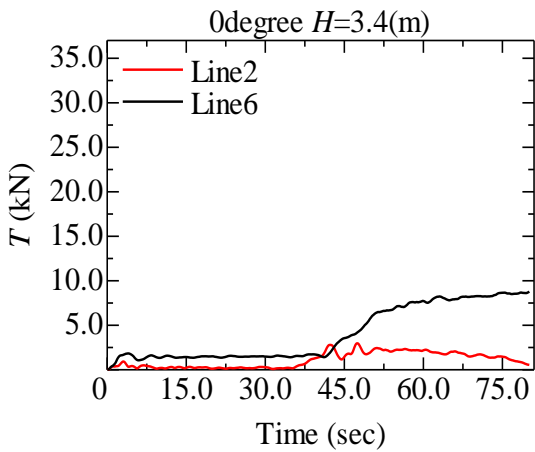
<最大津波高 $H=3.4\text{m}$ 入射角度 0 度 各係留点における係留索張力比較>



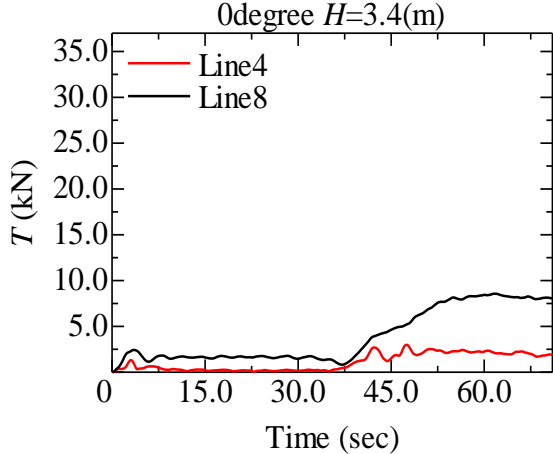
6-1) Line1, Line5 における張力の比較



6-2) Line3, Line7 における張力の比較



6-3) Line2, Line6 における張力の比較



6-4) Line4, Line8 における張力の比較

図-4.2.6 固定式岸壁と浮体式岸壁に係留した船舶の張力の比較 ($H=3.4\text{m}$, 入射方向 0 度)

入射角 0 度で最大津波高 6.4m の場合は、浮体式岸壁に係留した場合の係留索張力は最大津波高 3.4m の時と同程度の値で類似の傾向を示したが、固定式岸壁に係留した場合の係留索張力は最大津波高 3.4m の時よりも大幅に大きな値となっている。固定式岸壁に係留した場合のバウライン (Line5) とスターライン (Line7) の最大係留索張力は約 120kN となっており、シミュレーション開始から 30 秒を過ぎたあたりから増え始め、一度 30kN まで増加した辺りで張力の増加が横ばいになったが、50 秒を過ぎたあたり (津波の水位が 4.0m を超えたあたり) で急激に張力が増加してピークを迎え、その後係留索が切断され、張力が 0kN となっている。この傾向は、スプリングラインでも絶対値は小さいが同様に見られた。(図-4.2.7)

これは、50 秒頃から船が岸壁に乗り上げるくらいの高さまで水位が上昇したため、急激

に大きな係留力が働き、その後乗り上げて陸側に流されることにより係留索張力が破断強度を超えたためと考えられる。このことは計算結果を可視化することにより 50 秒頃から船が岸壁に乗り上げ始めることから確認することが出来る。(図-4.2.8)

先のシミュレーション結果と合わせて考えると、津波の入射角 0 度の時は、固定式岸壁に係留した船と比較して浮体式栈橋に係留した船の係留索には小さい力しか働かないことと、津波高の大きさに係わらず係留索張力はさほど変化がないことが明らかとなった。また、固定岸壁に係留した場合、岸壁への乗り上がりが発生する直前にさらに急激に大きな係留索張力がかかることが明らかとなった。

<最大津波高 $H=6.4\text{m}$ 入射角度 0 度 各係留点における係留索張力比較>

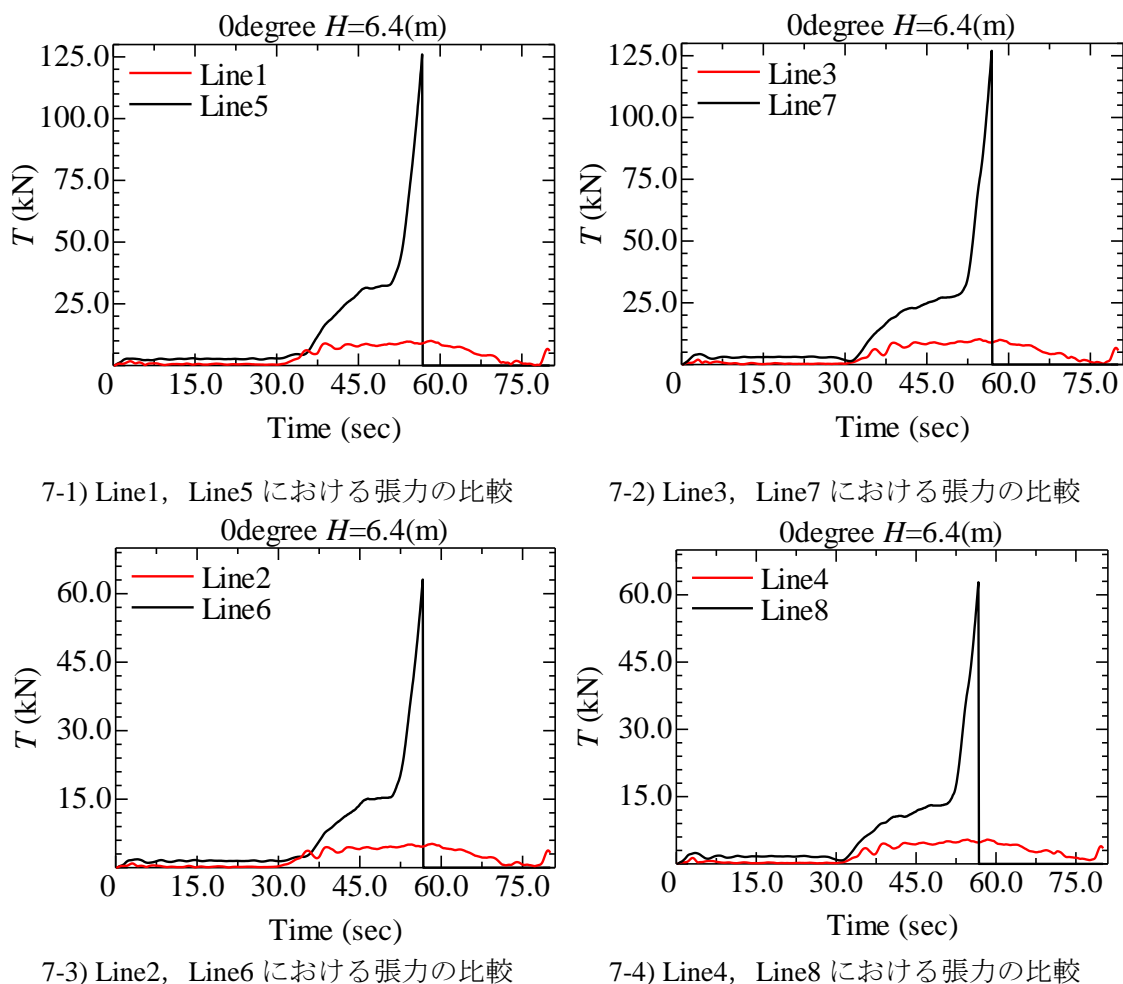
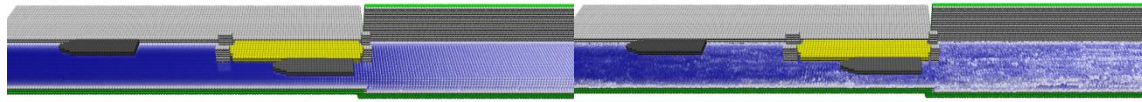
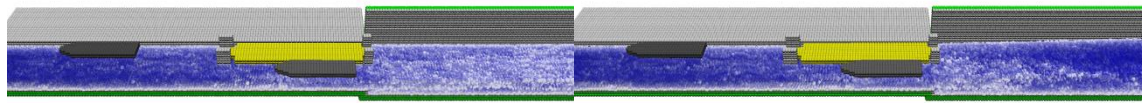


図-4.2.7 固定栈橋と浮体式栈橋に係留した船舶の張力の比較 ($H=6.4\text{m}$, 入射方向 0 度)



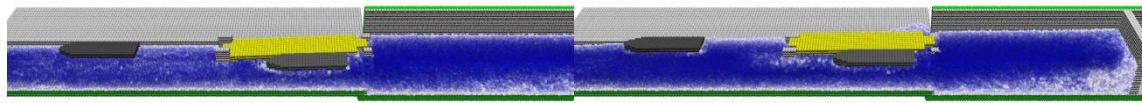
$T=0.0\text{sec}$

$T=10.0\text{sec}$



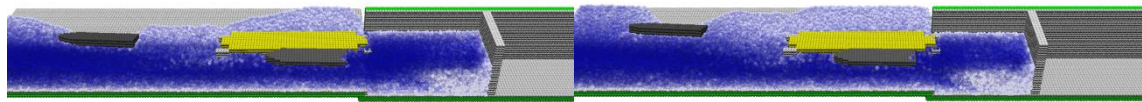
$T=20.0\text{sec}$

$T=30.0\text{sec}$



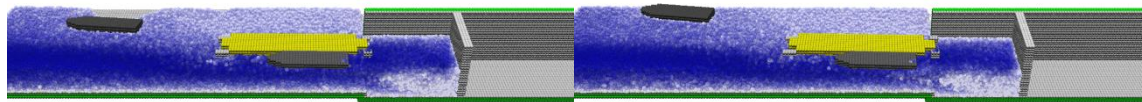
$T=40.0\text{sec}$

$T=50.0\text{sec}$



$T=60.0\text{sec}$

$T=65.0\text{sec}$



$T=67.5\text{sec}$

$T=70.0\text{sec}$

図-4.2.8 計算可視化結果 ($H=6.4\text{m}$ 、入射方向 0 度)

3) 津波入射角 90 度の場合

入射角 90 度の場合についても、浮体式栈橋に係留すると固定式岸壁に比し係留張力が大幅に小さくなった。津波高が 3.4m では、固定式岸壁に係留するとバウライン (Line5) とスターンライン (Line7) の係留索張力は津波の水位上昇が始まる 35 秒過ぎから増え始め最大で約 28kN まで上昇しているが、浮体式栈橋に係留すると何れの索も最大 2.5kN 以下で非常に小さい値となっており、津波により水位が上昇しても係留索張力には大きな変化が見られなかった。また、スプリングラインでも、値自体はバウラインやスターンラインよりも小さいが、同様の傾向となり、固定式岸壁 15kN 弱の値で、浮体式岸壁は 1kN 以下であった。

(図-4.2.9)

<最大津波高 $H=3.4\text{m}$ 入射角度 90 度 各係留点における係留索張力比較>

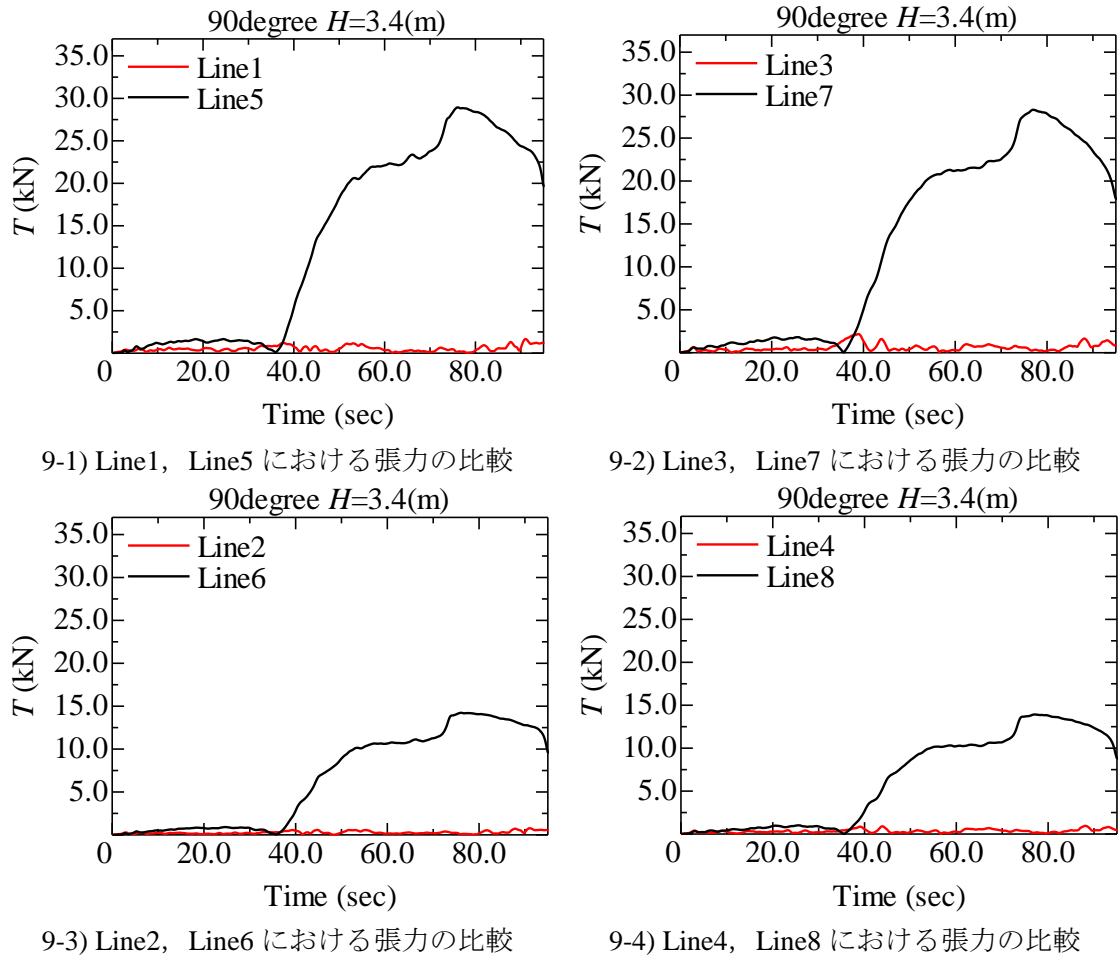


図-4.2.9 固定栈橋と浮体式栈橋に係留した船舶の張力の比較 ($H=3.4\text{m}$, 入射方向 90 度)

津波高が 6.4m では、固定式岸壁ではバウライン (Line5) と船首側のスプリングライン (Line6) でシミュレーション開始の 35 秒後から係留索張力が上昇し始め、45 秒を過ぎたあたりで上昇が止まるが 60 秒を過ぎたあたり (津波高が 4.5m を超えたあたり) で再び急

激に張力が増加し、70 秒前でピークを迎え、その後係留索が切断され張力が 0kN となった。係留索張力の最大値はバウラインで約 120kN、スプリングラインで約 65kN であった。スターンライン (Line7) と船尾側のスプリングライン (Line8) では、60 秒付近まではバウライン及び船首側スプリングラインとそれぞれ同じ傾向であったが、60 秒を過ぎたあたりから張力が上昇したが、70 秒付近でピークを迎え、その値を維持したまま係留索が切断される事無くほぼ一定値で推移した。浮体式栈橋では、70 秒頃まで津波の水位上昇に伴う係留索張力の増加は顕著に表れなかったが、70 秒を辺りで若干の係留索張力の増加が見られた。その最大値は精々5kN 程度であった。(図-4.2.10)

固定式岸壁で 60 秒頃から係留索張力が再上昇し始めたのは、津波の入射角が 90 度の場合には船の乗り上げが 60 秒頃から発生したためと考えられる。このことは計算結果を可視化することにより 60 秒頃から固定式岸壁に係留している船舶が岸壁に乗り上げ始める状況から確認できる。(図-4.2.11)

<最大津波高 $H=6.4\text{m}$ 入射角度 90 度 各係留点における係留索張力比較>

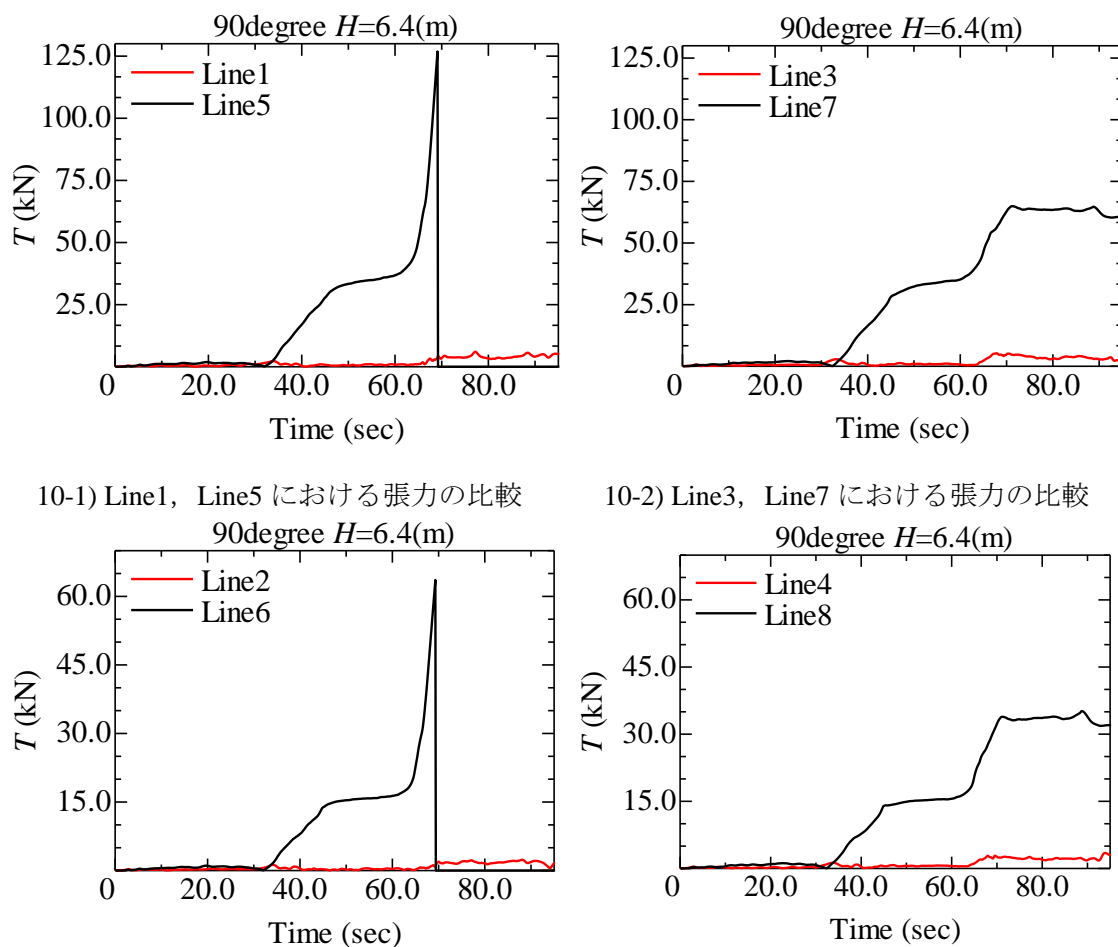


図-4.2.10 固定栈橋と浮体式栈橋に係留した船舶の張力の比較 ($H=6.4\text{m}$, 入射方向 90 度)

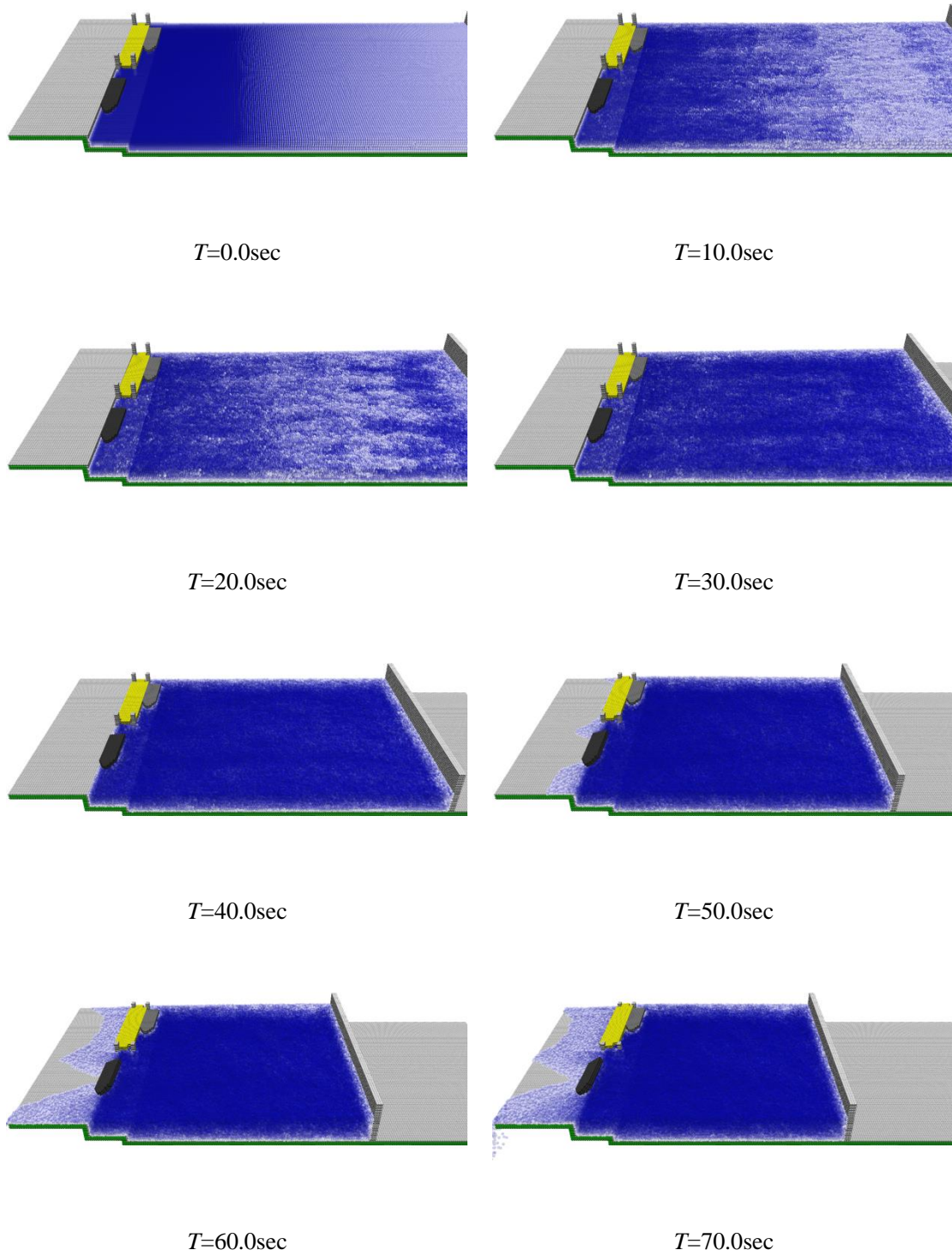


図-4.2.11 計算可視化結果 ($H = 6.4\text{m}$, 入射方向 90°)

4) 計算結果のまとめ

以上より、マリゲート塩釜での実際の津波来襲に、浮体式栈橋に係留していた観光遊覧船が被害を受けなかったことを再現することが出来た。また、マリゲート塩釜のモデルから、浮体式栈橋を用いることにより、係留索に働く力を大幅に低減できることや、船舶の乗り上がりを防止できることを明らかにすることができた。さらに、津波の入射角が90度の場合は、0度の場合以上に浮体式栈橋に係留した船舶の係留索張力が小さく、浮体式栈橋による係留索破断防止対策の効果が大きいことが明らかになった。また、津波高6.4mの場合に係留索が切断するほど張力が大きくなるのは、船舶の乗り上げが発生する前後であることが明らかになった。一方、浮体式栈橋に係留した場合、津波入射角が0度の場合の方が、90度の場合よりも係留索張力が大きくなり、津波の来襲との連動が見られることも分かった。これは、津波によって発生する流速が係留索に与える影響が、0度の方が大きいためであると考えられる。

以上、マリゲート塩釜での事例をもとに作成したシミュレーションモデルをもとに計算した結果、得られた知見を箇条書きでまとめると以下のとおりである。

- ・固定式岸壁に比較して浮体式栈橋に係留した船舶の係留索張力は大きく低減される。
- ・津波高が大きく船舶の乗り上げが発生する可能性がある場合に、浮体式栈橋に係留することにより、岸壁への乗り上げが発生しない。
- ・浮体式栈橋への船舶の係留は、岸壁への船舶の乗り上げ防止や係留索の破断防止に対して効果的である。
- ・津波の入射角が岸壁法線に対して90度の場合の方が、0度の場合よりも係留索張力の低減効果が大きい。
- ・津波高6.4mの場合、係留索が破断するほど張力が大きくなるのは、岸壁への船舶の乗り上げが発生する前後である。
- ・浮体式栈橋に船舶に係留している場合、津波入射角が90度の方が0度よりも係留索張力の低減効果は大きい。これは、津波によって発生する流速の係留索に与える影響が0度の方が大きいためであると考えられる。

なお、今回のシミュレーション結果は、マリゲート塩釜で実際に用いられていた浮体式栈橋や船舶の大きさ等をもとに諸条件を設定したものである。浮体式栈橋と船舶の大きさ等が変わることにより、浮体式栈橋による係留索張力の低減効果が変わる可能性が考えられる。次章では船舶と浮体の規模が変化した場合の対津波特性をMPS法を用いて定量的に分析することとする。

4.2.4 浮体栈橋による船舶の被害低減対策の効果分析

前項では、マリゲート塩釜の事例をもとに浮体式栈橋の津波に対する船舶の乗り上げ防止効果や係留索張力の低減効果の分析を行い、被害低減効果があることを検証した。た

だし、この事例は比較的小型の船の場合であり、付属作業船等の小型船舶には十分に適用できるが、比較的大型の作業船に対する適用性の検討が必要である。

本項では 3.4 節で示した比較的大型の標準船（3,000DWT）を対象として、最大津波高の違いや入射角度および浮体式栈橋の規模の影響について、MPS 法を用いた数値計算を行うことにより、浮体式栈橋に係留した船舶に対する係留索の津波被害低減効果を分析する。また、この結果を用いて、船舶の大きさと津波時の係留索張力との関係についても考察を加える。

(1) シミュレーション条件設定

1) 標準船舶及び係留諸元の設定

本節で用いる標準船舶の設定にあたっては、東日本大震災時に活躍した起重機船が最大で 360t 吊であり、ほとんどが 300t 吊以下であり、排水トンとしては 2,000t~3,000t であったこと、グラブ浚渫船の大きめのものの排水トンが 3,000 t 台であること、また、国内に多い 7.5m 岸壁に着く船の標準的な船の大きさが 3000DWT であることなどを加味して、3,000DWT の船舶を標準船舶として設定した。

船舶の係留系の設定にあたっては、3,000DWT の船が使用する係留索の中から大きめの係留索として $\phi = 75.0$ mm のナイロンタフレローブを想定し、表-4.2.2 の諸元を採用した。

表-4.2.2 係留索諸元

Tether type	Double braid
Tether diameter [mm]	$\phi=75.0$
Breaking force [kN]	1230.0
Stretch rate [%]	40.0
Length of Bow line[m]	11.49
Length of Spring line[Front] [m]	8.31
Length of Spring line[Back] [m]	8.31
Length of Stern line [m]	11.49
Length of Brest line[Front] [m]	5.39
Length of Brest line[Back] [m]	5.39
Spring constant Line1,4[kN/m]	240.88
Spring constant Line2,3[kN/m]	333.17
Spring constant Line5,6 [kN/m]	513.91
Number of Tether Line1,4	4
Number of Tether Line2,3	2
Number of Tether Line5,6	2

2) 数値計算モデル

数値計算モデルの諸元を図-4.2.12~図-4.2.15 に示す。津波入射角度は図-4.2.14 お

よび図-4.2.15 に示すとおりであり、船舶に対して船尾から船首（船の長さ方向）に水平の方向を 0° 、垂直の方向を 90° とした。

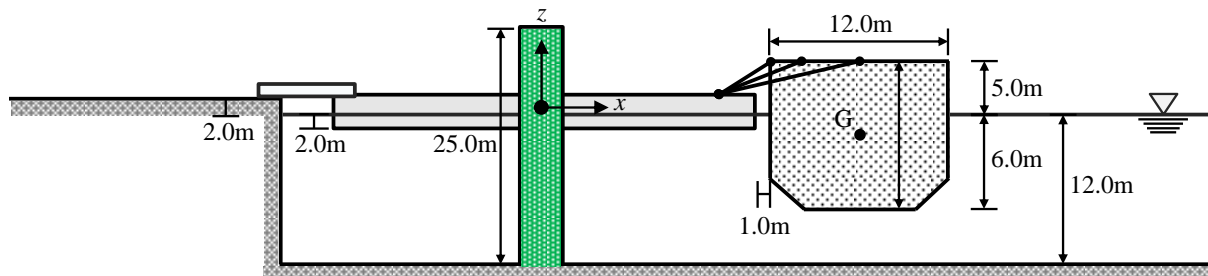


図-4.2.12 数値計算概要図（断面図）

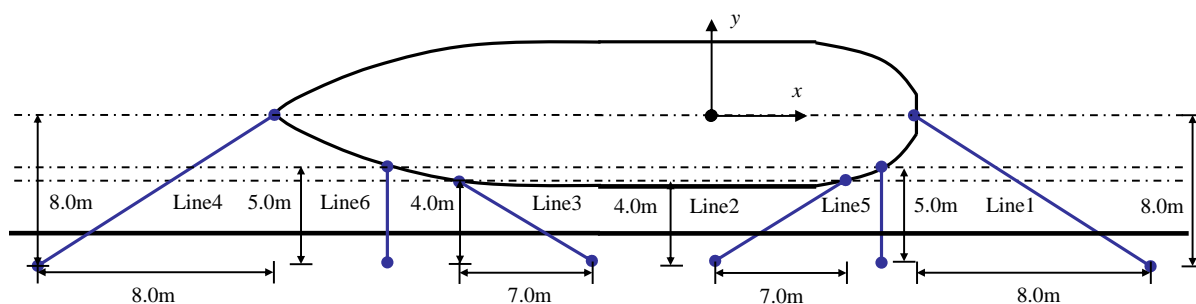


図 4.2.13 数値計算概要図詳細

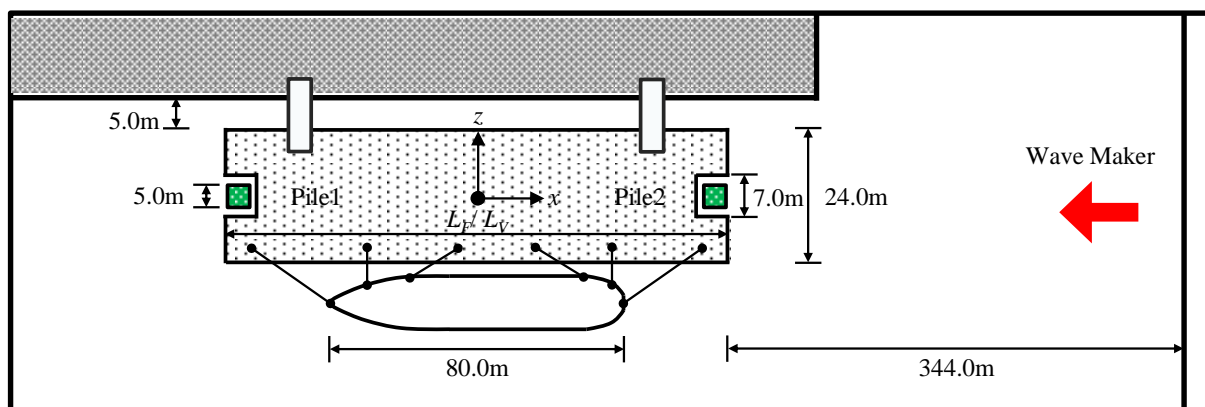


図-4.2.14 数値計算概要図（平面図,入射方向 0° ）

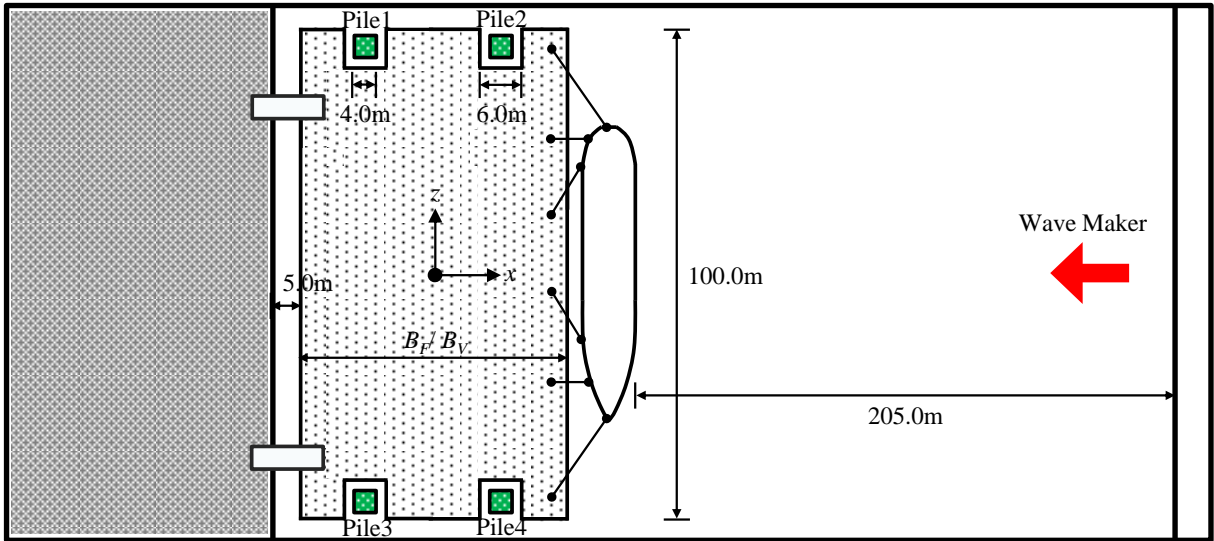


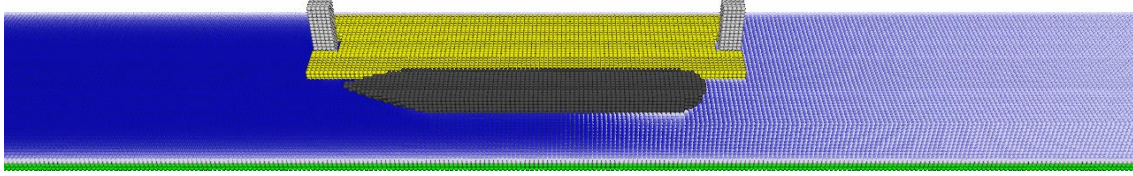
図-4.2.15 数値計算概要図（平面図,入射方向 90°）

加えて、浮体式栈橋の規模は津波入射角が 0° であるとき、船舶の長さに対する比によって浮体長さを変化させ、津波入射角が 90° では、船舶の幅に対する比によって浮体幅を変化させ検証を行う。本分析においては固定栈橋係留時での最大係留索張力との比較を行うことから、係留索の破断は発生させず計算を継続することとし検証を行った。各係留点の索の本数は、船首側においてバウラインに 4 本、スプリングラインに 2 本、ブレストラインに 2 本とし、船尾側も同条件とした。係留索の設定条件を表-4.2.3 に示す。また、モデル化した浮体式栈橋と船舶との形状を図 4.2.16 及び図 4.2.17 に示す。

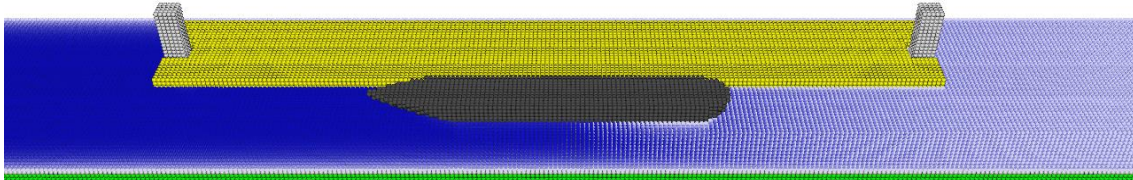
入射波はピストン式造波板による孤立波とした。最大津波高は港湾内の係留船舶の被災規模が飛躍的に大きくなる 6.0m を超える津波と、比較的規模の大きい 3.0m を超える場合を採用した。

表-4.2.3 検証項目数

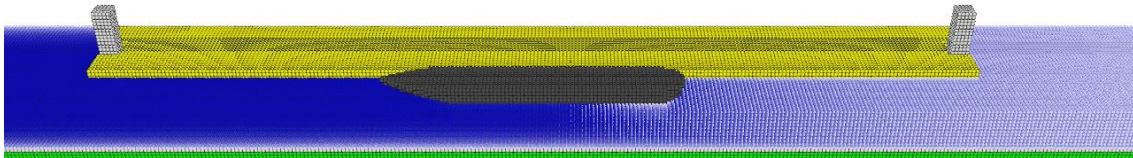
Angle	0degree		90degree	
Scale	L_F/L_V	Length [m]	B_F/B_V	Breadth
Float-Vessels ratio	1.25	100.00	1.25	15.00
	2.25	180.00	5.00	60.00
	3.00	240.00	10.00	120.00
	4.00	320.00	15.00	180.00



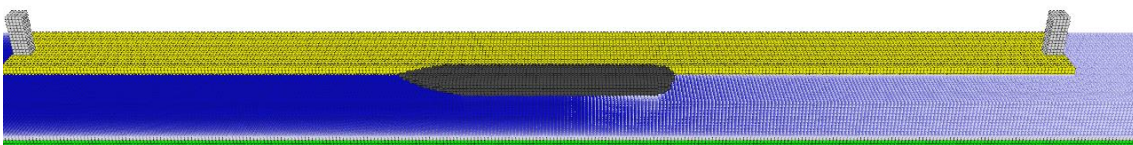
16-1) 浮体船舶=1.25



16-2) 浮体船舶=2.25

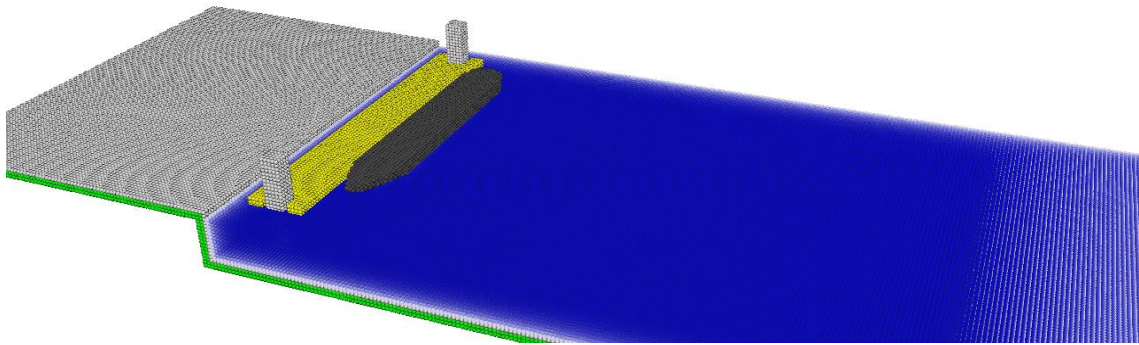


16-3) 浮体船舶=3.0

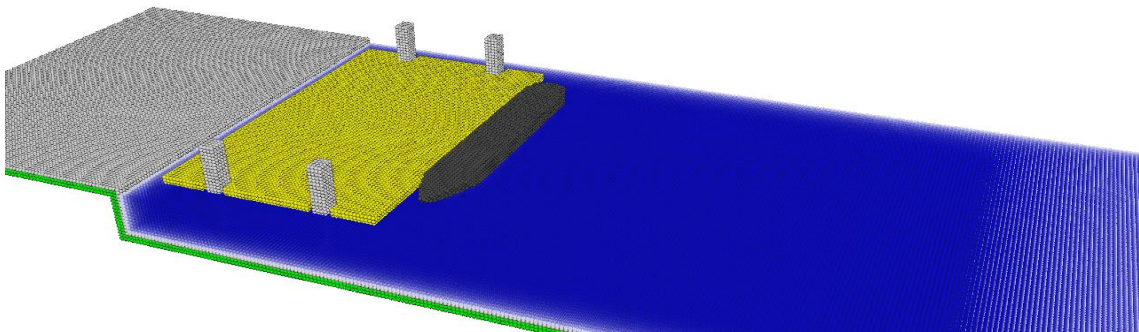


16-4) 浮体船舶=4.0

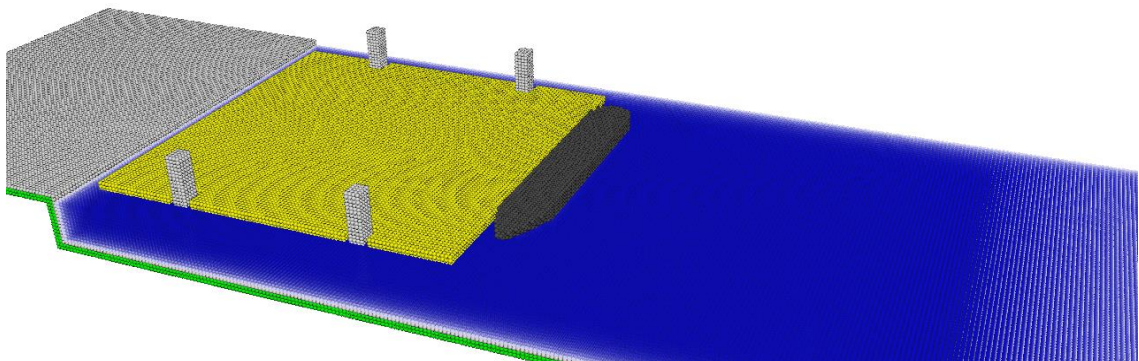
図-4.2.16 津波入射方向 0° における浮体船舶比



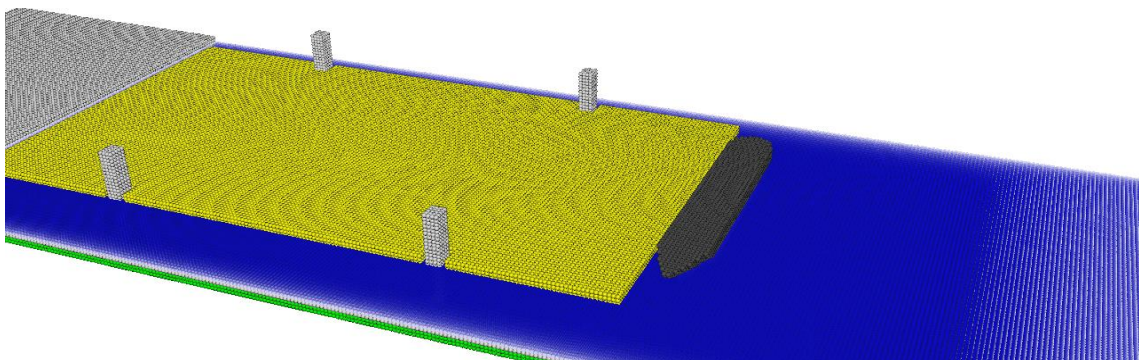
17-1) 浮体船舶=1.25



17-2) 浮体船舶=5.0



17-3) 浮体船舶=10.0



17-4) 浮体船舶=15.0

図-4.2.17 津波入射方向 90° における浮体船舶比

(2) 浮体式棧橋のシミュレーション結果と係留索張力低減効果の分析

1) シミュレーション結果の分析

シミュレーション結果をもとに、固定式岸壁と浮体式棧橋との船舶の係留索張力の平均値を比較することにより、浮体式棧橋の低減効果を分析した。

津波入射角 0 度の場合の低減効果は、津波高 3.4m で浮体式棧橋と係留船舶との長さの比（以下「浮体船舶比」という。） $L_F/L_V=1.25$ の条件の時、約 30%であった。また、この低減効果は浮体船舶比が大きくなるに従い減少し、浮体船舶比 4.0 の時には 10%程度となった。一方、津波高 6.4m の時は、低減効果は 10%前後となった。（図-4.2.18）

津波入射角 90 度の場合は、津波高 3.4m で浮体船舶比 1.25 の時に 80%あり、浮体船舶比が大きくなると若干低下するが、それでも浮体船舶比 4.0 でも 70%の低減効果がみられた。津波高 6.4m の時は、浮体船舶比 1.25 で約 70%、浮体船舶比 4.0 で約 65%の低減効果がみられた。（図-4.2.19）

また、船舶の水平変位についてみると、津波入射角 0 度の場合は、浮体式棧橋とこれに係留している船舶の間に、津波高 3.4m の時には 2.5m 前後、津波高 6.4m の時には 5.0m 程度の棧橋方向に沿った移動が見られた（図-4.2.20）。一方、津波入射角 90 度の場合は、浮体式棧橋とこれに係留している船舶の間に、津波高に係わらず 1.0m 弱の岸壁法線直角方向の移動が見られただけであった（図 4.2.21）。船舶の鉛直変位については、浮体式棧橋とこれに係留した船舶の間には大きな差は見られず、浮体式棧橋とこれに係留している船舶が同じように挙動していることが分かった。

なお、これらのシミュレーションでは、津波高が 6.4m の場合でも船舶の喫水が 6.0m と深いため、岸壁への乗り上げは発生しなかった。

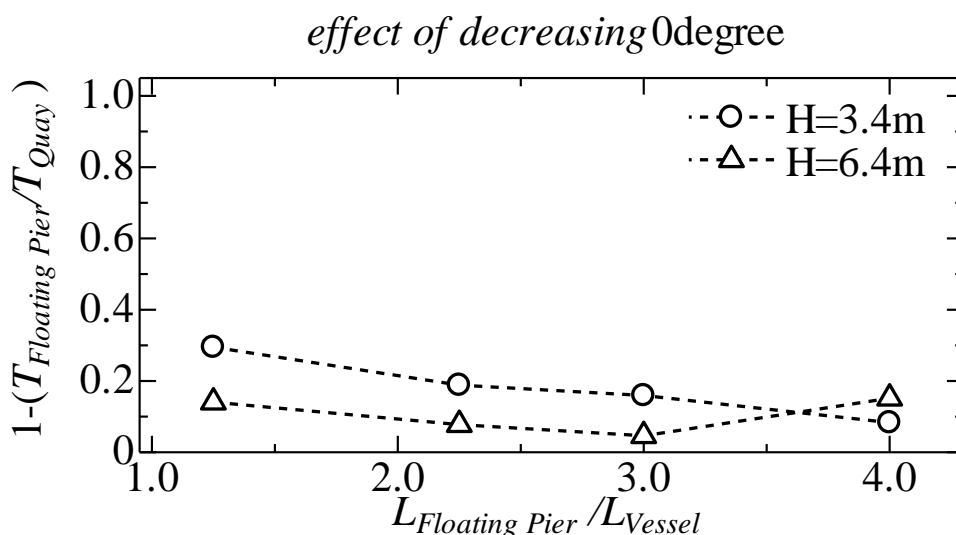


図-4.2.18 浮体船舶比ごとの係留索張力の低減効果（入射方向 0°）

effect of decreasing 90degree

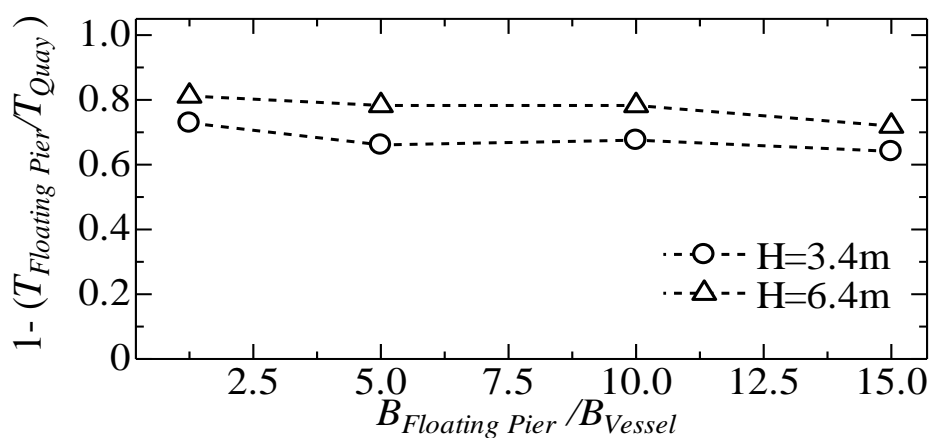


図-4.2.19 浮体船舶比ごとの係留索張力の低減効果 (入射方向 90°)

H=3.4, H=6.4 0degree

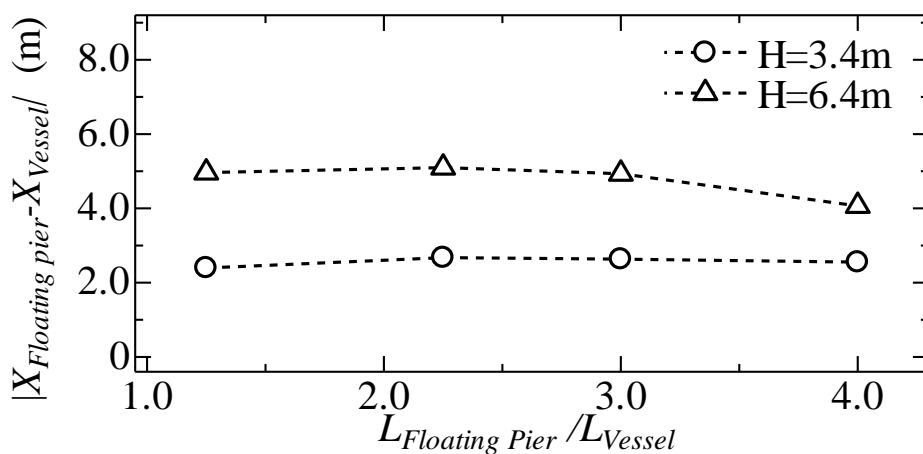


図-4.2.20 浮体船舶比ごとの相対的な水平方向変化量 (入射方向 0°)

H=3.4, H=6.4 90degree

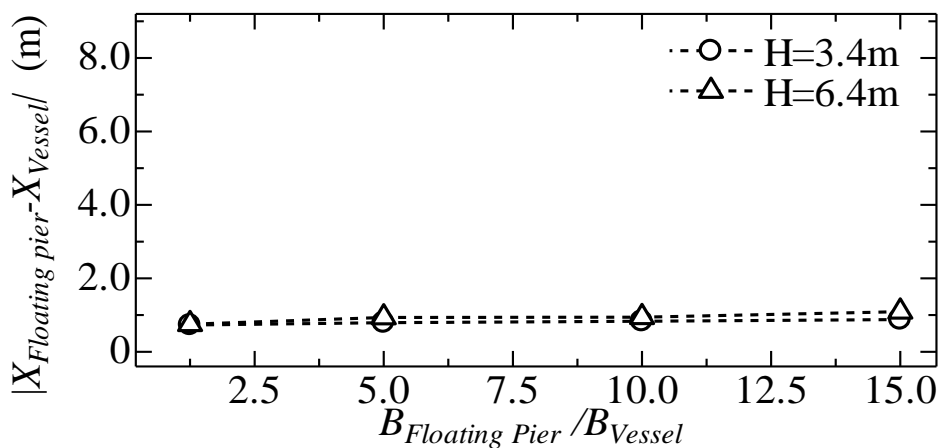


図-4.2.21 浮体船舶比ごとの相対的な水平方向変化量 (入射方向 90°)

4.2.5 観光旅客船（小型船）と標準船舶の比較と考察

（１）標準船舶の津波被害低減効果が観光旅客船よりも低い理由

4.2.3 項において分析したマリゲート塩釜の事例では、津波入射角が 0 度の場合と 90 度の場合のどちらも係留索張力削減効果が大きいことが確認できたが、今回の結果をみると、津波入射角 0 度の場合の係留索張力の削減効果があまり大きく出なかった。これは、係留索張力は、津波による水平方向の力による係留索の伸びと水位の上昇による垂直方向の力による係留索の伸びとの合計から影響を受けるが、観光旅客船（以下ここでは「小型船」という。）の場合は標準船舶に比べて船長や係留索長が短いため、水位の差による係留索の伸びの影響が相対的に大きく出たためである。津波入射角 0 度の場合、標準船舶は小型船に比べ係留索が長く、津波による水平方向（岸壁平行方向）の力による係留索の伸びが大きく、水位上昇による垂直方向の力による係留索の伸びが相対的に小さく評価され、結果として係留索張力について浮体式栈橋と固定岸壁との差があまり出なかったものと考えられる。つまり、浮体式栈橋による被害低減対策は、小型船には有効であるが、船が大きくなるとその効果は少なくなる。また、船が大きくなった場合の効果は津波の入射方向にも影響を受けることから、津波の入射方向と岸壁の向きの検討も必要になる。

（２）標準船舶よりも小型の船に対する係留索張力の補正の考え方

次に、標準船舶と小型船との間で、固定岸壁に係留された索張力の合計値を比較すると、津波入射角 0 度の時に、標準船舶は約 3,350 kN であるのに対し小型船は約 53 kN であり、90 度の時には標準船舶は約 2930 kN であるのに対して小型船は約 85.4 kN となっていた。標準船舶の係留索張力合計値は小型船のそれぞれ約 60 倍強、30 倍強となっている。3.3.2

（４）で記述したが、一般に、船舶に働く力は慣性力の変化（加速度×質量）に比例すると考えられるが、津波によって小型船も大型船も同じような加速度を受けた場合に質量の比が船に働く力の比に比例し、この力が係留索張力の合計値に反映されると考えることが出来る。今回のシミュレーションの条件では、船舶の質量の比は概ね 15 倍程度であり、小型船と標準船舶との係留索張力の比が 30 倍強から 60 倍強であるのに比べ、大幅に小さい。

津波入射角 90 度の場合の小型船の係留索張力は、岸壁に乗り上げた影響により岸壁乗揚げが無い場合よりも大きめに出ていると考えられるが、それでも係留索張力比（30 倍強）よりも質量比の方が小さくなっている。今回の計算結果に基づくと、標準船舶に働く係留索張力をもとに、小型船に働く係留索張力を補正する場合には、船舶の質量比を用いて補正すると安全側の補正值になることが明らかになった（表-4.2.4）。

表-4.2.4 津波による船舶係留力合計の倍率（MPS シミュレーション結果）

津波入射角	0 度	90 度
観光旅客船（小型船） a [kN]	52.9	85.4
標準船舶（3000DWT 級） b [kN]	3350	2930
張力の合計値の倍率 b/a	63.4	34.3

適用範囲や精度向上などについて更なる検討が必要であるが、このことにより、標準船舶を対象とした係留索張力が求まっているときに、標準船舶よりも小型の付属作業船の係留索張力の合計を求めようとした場合には、安全側の概略値を求める一つの方法として、質量の比（実際の排水トン比等）により標準船舶の係留索張力の補正する方法があることを明らかにした。

4. 3 岸壁海側アンカーによる乗揚げ防止効果の分析

前節では、浮体栈橋に船舶を係留することによる被害低減対策について分析したが、浮体式栈橋は、建設コストや設置空間の制約などの課題がある。一方、作業船は喫水が浅い船が多いこともあり、岸壁等への乗揚げを防ぐことが被害低減対策の重要な視点である。このため本節では、作業船の係留時に比較的頻繁に見られる係留方法で、荒天時対策として官公庁船などで実施されている沖側アンカーによる方法（船首・船尾等から岸壁と反対側沖側>にアンカーを取る方法）に着目し、岸壁等への乗揚げを防ぐ対策として MPS 法等を用いてその効果を分析する。

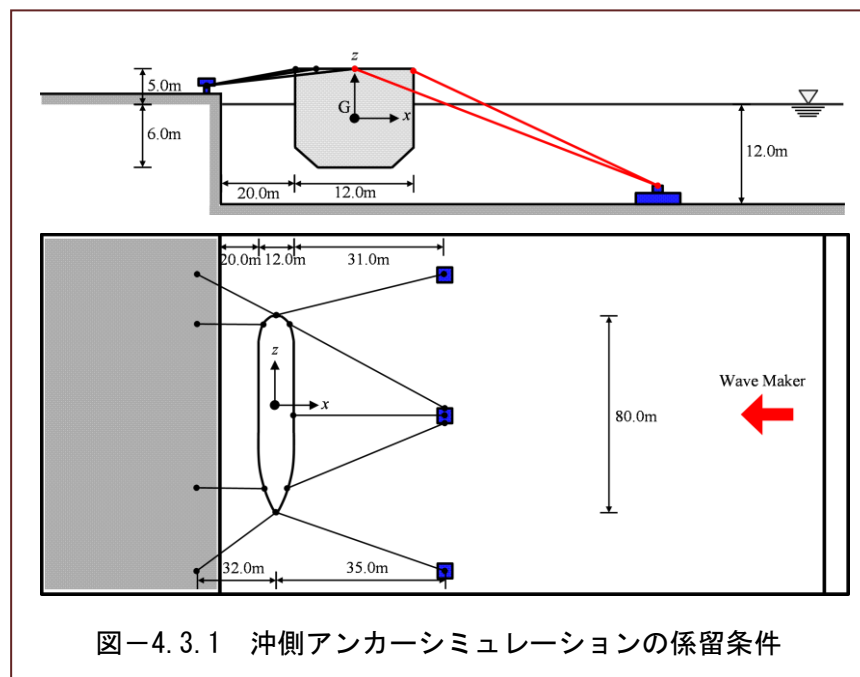
4.3.1 岸壁海側アンカーのシミュレーション条件の設定

岸壁海側アンカーによる船舶乗揚げ防止効果を分析するためのシミュレーション条件は、基本的には前節と同じ岸壁規模、天端高さ及び標準船舶を用いることとした。係留条件については、通常の岸壁への係留に加えて、船舶から見て岸壁の反対の海側にアンカーを取ることとした。係留索は、岸壁側には $\phi=40\text{mm}$ のナイロンエイトロープを使用し、海側アンカーは $\phi=100.0\text{mm}$ のワイヤロープを設定した。各係留点の索の本数は、岸壁側では船首側においてバウ

ラインに2本、スプリングラインに2本とし、船尾側においてはスターンラインに2本、スプリングラインに2本とした。また、海底アンカー点は合計で3点とし、その点に向かって船首、船尾及び船の中央からワイヤロープを展張することとした（図-4.3.1）。

検証する津波規模

は6.0mを超える規模とし、入射角度は固定栈橋に船舶を係留した際、乗り上がり問題が発生し得る可能性が非常に高い90度方向の入射角度とした。



4.3.2 数値シミュレーション結果と考察

(1) シミュレーション結果

海側アンカーを取ったシミュレーションを行った結果、岸壁直角方向の変位を見ると、

津波が岸壁から越流を始める頃から岸壁側に移動を始め、越流が大きくなるに従い変位は増え、最大 5m 弱程度に達するが、その後は若干変位が減少し、ドラスティックな変化は見られず、船が岸壁に乗り上げるような変位にはならなかった。これを、通常の岸壁に直接係留し海側アンカーを取らない場合と比較すると、通常の岸壁係留では越流が始まる初期の段階では岸壁側への変位は小さいが、岸壁へ船が乗り揚がる程度まで津波高が大きくなると、一気に変位が大きくなった。これは、通常の岸壁係留の場合は越流が小さい時は岸壁が岸壁側への水平変位を抑止しているが、越流が大きくなると船が傾くなどにより岸壁に乗りあがり、変位が大きくなるものと考えられる。これをグラフ化したものが図-4.3.2である。

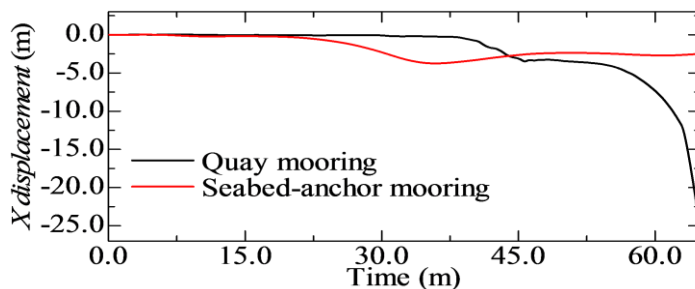


図-4.3.2 津波による船舶の岸壁直角方向の変位計算結果

この現象を、数値シミュレーションをビジュアル化することにより再現すると、通常の

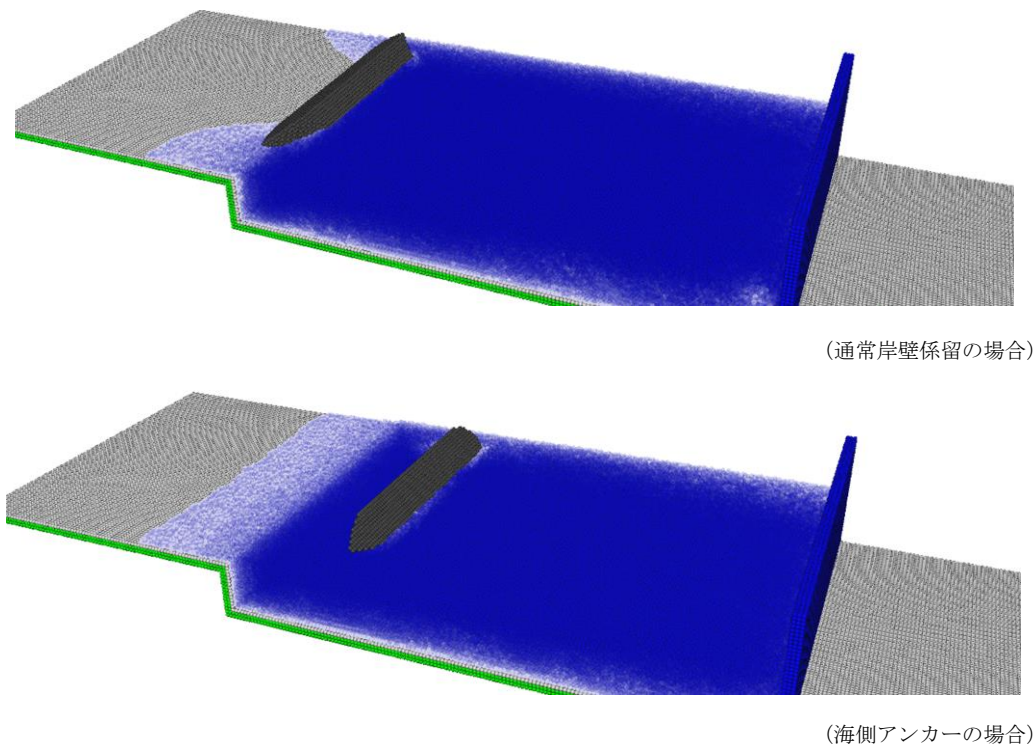


図-4.3.3 船舶の挙動シミュレーション結果のビジュアル化

係留索は、計算途中で係留索の破断が生じないよう大きめのものとし、ハリケンZクロススロープφ80mmを想定した。係留索諸元は表-4.3.3のとおりである。

表-4.3.1 離岸距離の検討ケース

離岸距離検討ケース							
X (m)	1.0	12.0	15.0	18.0	21.0	24.0	30.0

表-4.3.2 計算条件詳細

計算時間(sec)	500.0
時間刻み(sec)	0.01
出力時間刻み(sec)	1.0
総粒子数	107,317
粒子間距離(m)	0.2
浮体粒子密度(kg/m ³)	450.0

表-4.3.3 係留索諸元

係留索種類	ハリケンZクロスロープ°
索径(mm)	80.0
係留索自然長さ(m)	13.9
破断荷重(kN)	917.0
ばね定数(kN/m)	153.5
伸び率(%)	43.0
係留索本数	10

(2) シミュレーション結果

浮体の水平方向の重心の移動状況を見ると、津波の初期に0.6~0.7m程度岸壁の方向に移動するが、50秒前後で、津波が岸壁にぶつかり、その反射波の影響で沖側に移動し、最初のピークを迎える、その後一度岸壁側に移動した後に水位上昇の影響で徐々に沖側に移

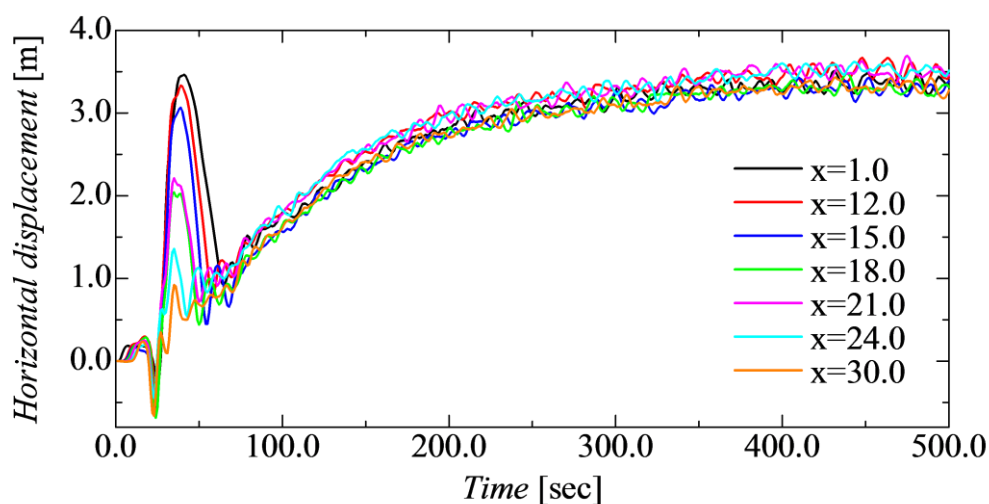


図-4.3.5 浮体の水平方向重心位置の軌跡

動して、最終的には3.0m強の移動が見られた。岸壁離岸別にみると、最初のピーク値が岸壁に近いケースは大きく、3.0m前後となるが、18.0~21.0m 離すと最初のピークは2.0m

程度となり、さらに離すと最初のピークはさらに小さくなる（図-4.6.5）。

係留索張力については重心移動とは異なり、初期に若干の変化はあるが、急激な変化は見られない。また、岸壁からの距離によって係留索張力の特性が大きく変化するような現象は見られなかった。（図-4.3.6）。

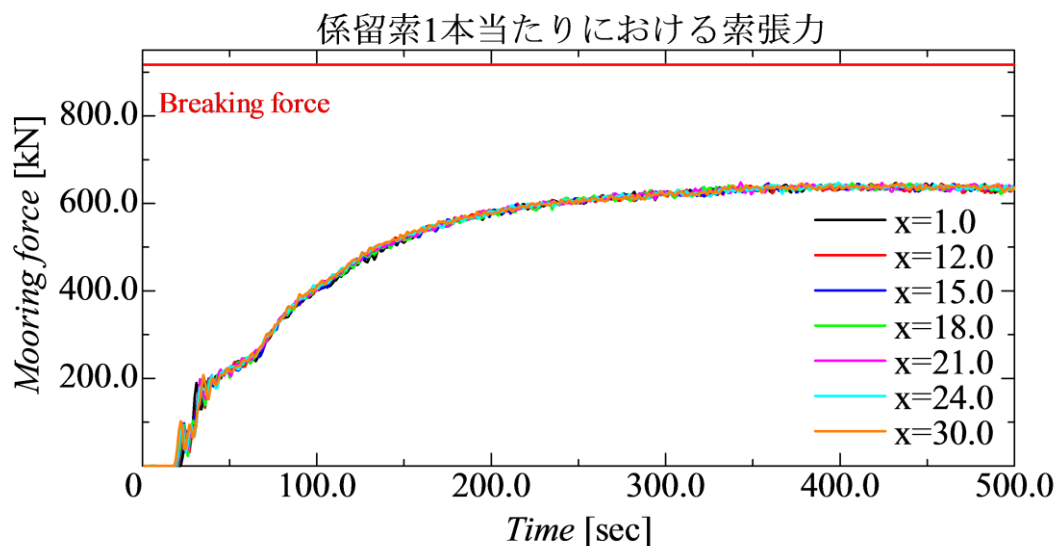


図-4.3.6 離岸距離別の係留索張力の変化

(3) 作業船と岸壁の距離に関する考察

上記シミュレーション結果から明らかなように、津波による作業船の岸壁等への乗り上がりを防ぐ対策として、海側アンカー係留を行う際に、岸壁の近くに係留した場合には、津波の侵入及び岸壁からの反射波の影響で、数m程度の重心移動があることが分かった。この移動は、係留索張力には大きな影響を及ぼさないことも明らかになった。今回の結果からは、岸壁から離す距離の係留索張力に対する影響は軽微である。しかし、津波により浮体自体の変位が数m単位で発生することが考えられるため、数mは岸壁からの離岸距離をとることが好ましい。

4. 4 作業船の係留方法の考え方のまとめ

本章では、津波被害の低減のための作業船の係留方法について、作業船の係留実態や被災を受けなかった事例分析、さらにはMPS法を用いた数値シミュレーション等により検討を進めてきた。これをまとめると以下の点を明らかにすることができた。

- ・津波により係留索の破断が危惧される際、係留索張力を低減する方法として、小型作業船の場合には、浮体式栈橋に係留することが有効である。
- ・比較的大きな作業船でも、津波入射の方向が岸壁法線に垂直の場合には、係留索張力を低減する方法として浮体式栈橋が有効である。
- ・浮体式栈橋の応用として、付属作業船などは大型作業船に直接横付けして複数係留されているが、浮体式栈橋への係留と類似の効果が期待できる。
- ・岸壁等への乗り上げの可能性がある時には、浮体式栈橋による方法と、岸壁海側にアンカーを採る方法が有効である。
- ・海側アンカーの場合には、津波による越流の影響を低減するため岸壁等から数m程度離して係留する方が好ましい。
- ・標準船舶の係留索張力が分かっている際に、標準船舶よりも小さい作業船の係留索張力を求める場合は、安全側の目安の値を求める一つの方法として、船舶の質量比により標準船舶の係留索張力を補正する方法がある。

これらの成果を5章の作業船の津波被害低減対策に反映させること

第5章 作業船の津波被害低減対策ガイドラインの提案

本章では、第2章から第4章の成果を踏まえて、作業船の津波被害低減対策の考え方としてガイドラインを提案する。まず、5.1節において既存の「津波来襲に対する作業船の安全確保に関するガイドライン」を整理し、これを踏まえて5.2節において作業船の津波被害低減対策ガイドラインを提案する。

5.1 「津波来襲に対する作業船の安全確保に関するガイドライン」の分析

社団法人日本作業船協会では、「津波来襲に対する作業船の安全確保に関するガイドライン²⁾¹⁾（以下「安全確保ガイドライン」という。）」を取りまとめている。概要については2.4.3項に示したが、この安全確保ガイドラインは、作業船の船員や作業員などの関係者を対象として津波来襲時にいかに非自航作業船等の安全を確保するかについて調査研究し、その成果をまとめたものである。また、時期としては津波来襲時を対象としており、今まさに押し寄せようとしている津波の脅威に対して、船長から作業員に至る全員が基礎知識を理解し、共通の認識をもってその対策にあたることの重要性を踏まえてまとめられたものである。

5.1.1 安全確保ガイドラインの内容

このため、津波に関する基礎知識や津波来襲時の被害、作業船の挙動にかなりの分量を費やしていることが一つの特徴となっている。また、安全確保に当たっては人命を第一に考え、避難することを基本に据えた対応を示しているのが今一つの特徴である。これらの内容を要約すると以下のとおりである。

① 地震と津波の基礎知識と過去の津波による被害

安全ガイドラインでは、最初に地震と津波の基礎知識を整理している。その内容は、地震のメカニズムや津波の性状、伝播速度、遡上と破壊力について示すとともに、発生確率の高い津波を伴う大規模地震を示している。また、過去の津波による作業船の被害として日本海中部地震時の能代港の被害や北海道南西沖地震時の久遠漁港でのFDの漂流事例を載せるとともに、避難事例や体験談を示している。

② 津波が及ぼす非自航作業船への影響

安全確保ガイドラインでは、次に津波が非自航船に及ぼす影響についてその挙動等を分析している。その内容は、港湾内の水域にアンカーリングにより4点係留している非自航式作業船（矩形の作業台船）を想定し、これをモデル化した上で係留船舶動揺シミュレーションを行い、津波作用時の動的特性を分析するとともに、係留している場所の水深及び係留索に作用する張力等について津波波高別に取りまとめている。また、その結果をもとに以下のような考察を加えている。

- ・大型作業船は、係留索を周囲に長く伸ばして係留している場合は、3m以下の津波には耐えうる可能性が十分ある。その場合でも、できるだけ水深が深いところに係留する方が安全である。
- ・3m以上の津波が予想され、水深が10m以浅の場所に係留している場合は、予想不能であり、危険と考えた方が良い。
- ・係留索が比較的細い中・小型の作業船は、浅いところに係留している場合も多く、2m以上の津波が予想された場合は、係留索（破断荷重が250kN程度のもの）が破断する恐れが十分考えられるので注意を要する。
- ・地形によっては、津波高が非常に大きくなる場所や流れが極端に速くなる場所もあり、危険だと思われる場所に係留している場合はできる限り移動して係留することを推奨する。心配な場合は津波シミュレーション等で検証することを薦める。
- ・作業している場所や係留している場所に関する情報は常に入手し、津波に備えた準備を怠ることの無いように注意する必要がある。
- ・係留方法が岸壁係留等、計算モデルと大きくかけ離れた場合は計算結果が全くあてはまらないので、十分に注意を要する。

これらの考察から分かるように、あくまでも水域でのアンカーリングにより係留している作業船を念頭にしているが、安全確保のために係留場所や係留方法について注意事項を示し警鐘を鳴らす性格のものとなっている。

③ 津波情報の入手と通信、連絡手段

この安全確保ガイドラインの性格を最も端的に表しているのが、津波情報の入手と通信、連絡手段を示している点である。その内容は、気象庁による津波警報等の状況や津波情報伝達システムの紹介をした上で、津波情報の早期入手の重要性を示すとともに、情報の入手手段を具体的に提示している。

④ 津波発生時の人員及び作業船の対応

安全確保ガイドラインの最も核心の部分であるが、津波の規模、到達時間等を想定して、非自航作業船に対する津波発生時の人員及び船舶の対応についてまとめている。この考え方は、2.5.3項や前述の本項の冒頭で記述した通りであるが、人命を第一に考えることを基本とし、その上で被災による船舶の破損、及びそれに付随する環境汚染などを最小限に止めるというものである。特に、人員や船舶を津波危険区域から安全区域又は安全海域に退避させることを考えるものであるが、船舶の避難を津波が到達するまでに完了することが難しい場合は、人員だけが避難し、船舶は係留状態で可能な限り養生することを表-5.1.1のとおりまとめている。

表-5.1.1 津波来襲時の人員および船舶対応 (日本作業船協会)

津波の状態		作業船の状態		作業中/係留中			備考
		船舶避難に要する時間					
				2時間以内	2~3時間	3~4時間	
大津波警報 3~10m以上	到達時間	2~3時間		船舶: 係留状態で可能な限り養生 (船舶の損壊・漂流の可能性あり)			・津波が2時間以内に来襲する場合、船舶は係留状態のまま、人員は速やかに退避する ・船舶から退避する場合、可能な場合は付属船舶などを利用して安全海域へ、無理な場合は陸上の安全区域へ迅速に退避する ・津波の到達時間が4時間以上の場合は、津波の規模、船舶退避に要する時間を考慮して、船舶・人員の動向について決定する ・津波注意報時の小規模な津波の場合は、津波の規模を考慮した上で人員の退避方法を選択する ・曳航中に津波が発生した場合には、津波の規模や到達時間にかかわらず、速やかに安全海域に曳航する
		3~4時間					
津波警報 1~2m	到達時間	2~3時間		船舶: 安全海域へ			
		3~4時間		人員: 安全区域又は安全海域へ			
津波注意報 0.5m	到達時間	2~3時間		船舶:係留状態で可能な限り養生 (船舶退避の必要なし)			
		3~4時間		人員:安全区域または安全海域へ (状況によっては船内待機)			
養生事項		全員乗船時		<ul style="list-style-type: none"> ・投錨作業(アンカー位置変更も含む) ・岸壁・隣接船舶との係留状況の見直し ・機械関係の養生 			・制限された時間内で必要な養生事項を実施する
		保安人員のみ		<ul style="list-style-type: none"> ・漏油防止対策 ・浸水防止対策 ・流出防止対策 ・電気類のショートによる火災対策 			
		無人		養生なし			

※表中記載事項の注意
 ・津波の到達時間は、情報を入手してから津波到着までの時間とする
 ・船舶退避に要する時間は、船舶を安全な海域まで曳航するのに要する時間とする。
 ・各非自航船舶には付属船として小型船舶があるものとする

5.1.2 安全確保ガイドラインの限界と課題

安全確保ガイドラインは、あくまでも津波来襲時の対応を基本としたものであり、稼働していない係留中の作業船などに対して被害低減対策を提案したものではない。また、アンカーリングによる係留について、いくつかの数値シミュレーションにより係留の安全性等について評価を行っているが、具体的な被害低減対策としては限定された条件での限定された内容となっている。さらに、対象者も主として船員や作業員など作業船に乗っている者を想定しており、さらに、対象時期も、津波来襲時を中心に記述されている。

このように、既存の安全確保ガイドラインは対象者や対象時期等がある程度限定されたものとなっている。作業船の津波被害低減対策の実効性を挙げるためには、対象者と対象時期を広げるとともに、本研究の成果や既往の知見等を盛り込み、広く関係者間で共有できる総合的なガイドラインを作成する必要がある。

対象者については、作業船の役割と公的性格を踏まえつつ、被害低減対策の効果をより広範なものとするために、作業船の船員や作業員、運行責任者などに留めることなく、実際の係留場所の調整に不可欠な港湾管理者や災害時に作業船を必要とする国の港湾整備部局の関係者も含むものとするべきである。

対象期間についても、津波来襲時は当然であるが、平常時からの準備や、港湾計画、施

設整備計画などの計画時まで広げることがより適切である。

以上を踏まえて、次節で安全確保ガイドラインが触れていない範囲まで対象を広げ、本研究の成果や既往知見を盛り込んだ総合的な作業船の津波被害低減対策のガイドラインを提案することとする。

5. 2 作業船の津波被害低減対策ガイドラインの提案

本節では、非自航式作業船等の主作業船を中心とした船の津波に対する被害を低減するため、作業船の津波被害低減対策ガイドラインを提案する。なお、主作業船以外についても対象とする主作業船と船団を組んで一緒に活動する付属作業船についても本ガイドラインに記述する。

5.2.1 用語の定義

ここでいうガイドラインとは、将来の大津波に対して作業船の被害を低減するための対策マニュアルの策定や、作業船の係留計画を策定するにあたって、基本的な考え方や基礎的な情報、今後対応すべき事項等を整理し取りまとめたものである。

5.2.2 ガイドラインの対象

作業船の被害低減対策の策定は、2.5節において示したように、震災後の緊急物資の輸送や港湾におけるBCP、更には港の復旧・復興に重大な影響を及ぼすものであり、それぞれの港の危機管理施策や港湾整備・管理・運営施策と一体として取り組むべきである。このため、単に作業船の船長や船員、作業員（以下「作業船船員等」という。）に依存するだけでは不十分であり、作業船の所有者や運行者、管理者等（以下「作業船運行者等」という。）はもちろんであるが、港の管理・運営を司る港湾管理者や国にとって重要な港湾施設の整備を担っている国土交通省の港湾局・地方整備局等の港湾関係者（以下「港湾管理者等」という。）も参画し、協力して取り組む必要がある。この意味で、本ガイドラインは、作業船の船長・船員・作業員、作業船の運航管理者及び港湾管理者等を対象とする。

また、作業船の被害低減対策は、5.1節において示したように、津波来襲時の安全確保は重要であるが、それだけでは不十分であり、平常時から万全の準備を心がけることが不可欠である。特に平常時では、作業船が稼働していない期間や工事の合間の時間に港内係留をしている際の対策が重要である。さらに、現状の港湾形状や港湾施設の状況を前提とした場合にはその対策に限界があるため、将来を見据えた港湾計画の策定や施設整備計画策定時などのいわゆる計画時

画時も対象として考えおくべきである。このため、時期については、津波来襲時、平常時及び計画時の3つの段階を対象とする。

本ガイドラインの対象とする対象者と時期とを、従来の「安全対策

	津波来襲時	平常時	計画時
港湾管理者	津波被害低減対策ガイドライン (今回提案)		
作業船運航者等			
作業船船員等			
	安全確保ガイドライン (既存)		

図-5.2.1 ガイドラインの対象範囲

ガイドライン」と比較したものが図-5.2.1である。従来のガイドラインが津波来襲時の船長や作業員が中心であったのに対し、本ガイドラインは、計画時、平常時からの作業船の運航管理者や港湾管理者の対応も含めた総合的なものとした。

5.2.3 被害低減対策における役割分担

作業船の被害低減対策を実効あるものとするためには、港湾管理者等、作業船運行者等、作業船船員等の被害低減対策をそれぞれの立場で実施する関係三者（以下「被害低減対策関係者」という。）が相互に協力しつつ、各々の役割を果たすよう努めなければならない。津波来襲時、平常時及び計画時における被害低減対策関係者の主な役割は以下に示すとおりである。

（１）港湾管理者等の役割

1) 津波来襲時

- ・津波来襲に関係する情報の提供
- ・地震・津波などによる港湾の被害や危険性の情報提供

2) 平常時

- ・作業船の係留場所選定のための必要情報の提供及び係留場所の許認可（係留場所選定に必要な係留船舶津波ハザードマップの整備を含む）
- ・津波来襲に備えた連絡体制及び連絡に必要な施設等の整備
- ・作業船の津波被害低減対策のための指針・要領・マニュアル等の整備

3) 計画時

- ・作業船の被害低減に配慮した港湾計画づくり
- ・作業船の被害低減に有効な施設整備計画づくり
- ・作業船の被害低減に関する研究の促進、技術開発の支援

（２）作業船運行者等

1) 津波来襲時

- ・津波に関する情報の収集
- ・作業船船長等への警戒、退避等の指示・連絡
- ・津波来襲後の被害状況等の確認

2) 平常時

- ・津波来襲に備えた連絡体制及び連絡に必要な機材等の整備
- ・津波来襲に備えた指針、要領、マニュアル等の整備及び訓練の実施
- ・津波及び津波来襲時の作業船の挙動に関する基礎知識の周知
- ・作業船係留場所及び係留方法に関する連絡・調整、申請等
- ・作業船の津波被害低減のための調査・研究・技術開発

3) 計画時

- ・作業船の係留場所等に関する要望・必要事項等の港湾管理者等への提供

- ・津波被害低減のための津波等に関する基礎知識の周知・共有
- ・津波来襲時に備えた情報収集体制、連絡体制等の整備
- ・事業継続計画（BCP）の策定、港湾BCPとの連携
- ・被害低減のための調査・研究・技術開発

(3) 作業船船員等

1) 津波来襲時

- ・津波に関する情報の収集
- ・船舶・人員の安全海域または安全区域への避難、可能な限り船舶の養生

2) 平常時

- ・津波及び津波来襲時の作業船の挙動に関する基礎知識の習得、共有
- ・津波来襲に備えた情報収集及び連絡体制の整備及び訓練の実施
- ・作業船の係留場所及び係留方法の選定

3) 計画時

- ・作業船に関する必要情報の作業船運行者等、港湾管理者等への伝達

これらを一括したものを表-5.2.1に示す。

表-5.2.1 作業船の被害低減対策関係者の役割分担

	津波来襲時	平常時	計画時
港湾管理者等	<ul style="list-style-type: none"> ・津波来襲に関係する情報の提供 ・地震・津波などによる港湾の被害や危険性の情報提供 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業船の係留場所選定のための必要情報の提供及び係留場所の許認可（作業船の係留場所選定に必要な係留船舶津波ハザードマップの整備を含む） ・津波来襲に備えた連絡体制及び連絡に必要な施設等の整備 ・作業船の津波被害低減のための指針・要領・マニュアル等の整備 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業船の被害低減に配慮した港湾計画づくり ・作業船の被害低減に有効な施設整備計画づくり ・作業船の被害低減に関する研究の促進、技術開発 ・港湾BCPへの位置づけ
作業船運航者等	<ul style="list-style-type: none"> ・津波に関する情報の収集 ・作業船船長等への警戒・退避等の指示・連絡 ・津波来襲後の被害状況等の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・津波来襲に備えた連絡体制及び連絡に必要な機材等の整備 ・津波来襲に備えた要領・マニュアル等の整備及び訓練の実施 ・津波及び津波時の作業船の挙動に関する基礎知識の周知 ・作業船係留場所及び係留方法に関する連絡・調整・申請等 ・作業船の津波被害低減のための装備・機材等の改良・改善 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業船の係留場所等に関する要望・必要事項等の港湾管理者等への提供 ・津波被害低減のための津波に関する基礎知識の研修計画立案 ・津波来襲時に備えた情報収集及び連絡等の計画策定 ・事業継続計画の策定、港湾BCP等への参加 ・被害低減のための調査・研究・技術開発
作業船船員等	<ul style="list-style-type: none"> ・津波に関する情報の収集 ・船舶・人員の安全海域又は安全区域への避難、可能な限りの船舶の養生 	<ul style="list-style-type: none"> ・津波及び津波時の作業船の挙動に関する基礎知識の習得・共有 ・津波来襲に備えた情報収集及び連絡体制の整備及び訓練の実施 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業船に関する必要情報の作業船運航者、港湾管理者等への伝達・意見交換

5.2.4 津波来襲時の対応

津波来襲時の対応としては、5.1.1に記述した安全確保ガイドラインに示しているように、人命を第一に考え、その上で被災による船舶の破損及びそれに付随する環境汚染などを最小限に止めることを基本方針とする。

すなわち、作業船船員等は、津波警報または大津波警報が発せられた際に、津波危険区

域内において作業船が工事等のため稼働中している状態であれば、津波到達時間が船舶避難に要する時間より長い場合は、安全海域への退避を基本として対応することとし、また、津波到達時間が船舶退避に要する時間より短い場合は、人は陸上の安全区域または安全海域に避難することとする。これらの対応の詳細は、5.1.1の「表-5.1.1 津波発生時の人員及び船舶の対応」を用いるのが適切である。

なお、稼働していない作業船の場合は、安全が確認できるまで不用意に近づかないことが重要である。

津波来襲後には、船員や作業員等のスタッフの安全確認や作業船の被害の有無を含む被害状況等を把握し、事前に定めている連絡体制に基づき報告を行う必要がある。

作業船運行者等は、適切な情報を収集し、作業船船員等に連絡するとともに、退避など必要な避難・警戒に関する指示を行うこととする。また、作業船船員等から報告を受けた被害の有無等について港湾管理者等に報告することが適切である。

港湾管理者等は、作業船運行者等に、津波に関する情報を伝達するとともに必要に応じて港湾内での被害や危険性の情報について連絡するものとする。また、津波の危険性が去った後は、津波被災後の航路啓開や災害復旧の計画づくりの参考とするために、被害の有無や程度について連絡を受けるなどの情報交換をすることが適切である。

5.2.5 平常時の対応

平常時の作業船の津波被害低減対策においては、稼働中の作業船を対象として人員や船舶の安全を確保するための対応を準備しておくことと、稼働していない作業船を対象とし

て適切な係留場所や係留方法を選択することの2つが重要である。稼働中の作業船のための平常時の対応では、被害低減対策関係者は協力して、津波や作業船の津波被害に関する基礎知識の周知・共有を図るとともに、連絡体制・連絡方法の構築と連絡に必要な設備等の整備に努める必要がある。また、稼働していない作業船のための平常時対応では、適切な係留場所と係留方法の選定に努める必要がある。さらに、被害低減対策のための指針・要領等を整備し、訓練を実施することや、広く港湾関係者を含めた調整や情報共有の場を必要に応じ設けることなど、被害低減対策のための可能な限りの準備を整えることが好ましい。これらの平常時の対応項目を図-5.2.2に示す。

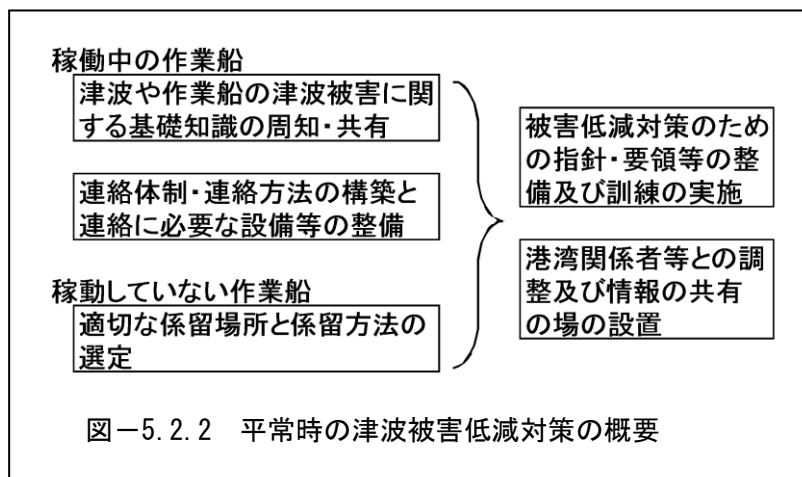


図-5.2.2 平常時の津波被害低減対策の概要

図-5.2.2に示す。

これらの対応では、一般船舶の対応と類似の部分も多くみられるが、特に作業船として特徴的な点が、港湾等に係留されている稼働していない作業船における対応である。作業船は2.2.3に示したように稼働していない期間が比較的長いという特徴があり、この間は、作業船に船員や作業員は居ない状態で港湾内に係留されることとなるため、津波が来襲しても短時間で退避等の対応が難しい。これについては、第3章及び第4章において津波の影響や被害低減対策の詳細な手法や知見を示してきたが、津波による作業船の被害を低減できるように適切な係留場所と係留方法を選定することが欠かせない。その具体的な方法については、作業船の係留場所の選定については5.2.5において、また、係留方法については5.2.6において示すとおりである。被害低減対策関係者はそれぞれの役割を踏まえた上で、協力して係留場所と係留方法の選定にあたるのが特に重要である。

5.2.6 港湾内の作業船係留場所の選定

作業船の係留場所の選定では、被害低減対策関係者間での情報交換を基にして係留場所の候補地をリストアップした上で、係留船舶津波ハザードマップを用いて、候補地の絞り込みを行い、5.2.6に示す係留方法の選定を参考として、候補地における係留が問題ないかを確認した上で、最終的な係留場所を決定する。候補地の絞り込みまでの具体的な内容は以下に示すとおりである。

(1) 港湾内の津波の特徴の理解

津波は、地震の規模や地盤変化の形状によりその規模は異なる。また、同じ波源の津波でも、海底の水深や地形によって港湾の入り口まで伝播した際の挙動が異なるため、港湾に与える影響も変わってくる。さらに、港内に侵入した津波は、港の水深や航路、泊地などの水域の形状、防波堤などの形状により異なる挙動を示す。

このため、津波係留場所の選定に当たっては、津波の挙動を可能な限り予測し、その結果を用いて、適切な場所を選定する必要がある。

(2) 係留の可能性のある候補地の選定と候補地に関する詳細情報の入手

係留場所については、港湾管理者や水産関係者等から事前に収集した情報収集をもとにして、係留することができる候補地（以下「係留候補地」という。）をリストアップする。候補地については、水深や海底土質に関する情報や、周辺の係留施設の配置や規格、所有者など、さらに詳細な情報を把握しておく必要がある。

(3) 数値シミュレーション等による港内の津波挙動の予測

近年、海溝プレート境界型の地震による津波については、正確な地理（地形）や、津波断層面の情報を与えることにより、時間的にも平面的にも精度の良い予測をすることが可能になる津波シミュレーションが開発されている。津波来襲時の港内の状況を把握するためには、このような津波シミュレーションを用いることが適切である（詳細については第3章を参照）。

津波断層面については、内閣府による南海トラフの巨大地震モデル検討会³⁷⁾が11ヶ

スの断層パラメータを公表しており、当面の間は、これらのパラメータを基にするのが好ましい。また、全てのケースについて計算することにより様々な津波に対して港内係留を考えている港湾（以下「当該港湾」という。）内の津波の挙動を把握する考え方もあるが、実際の係留場所や係留方法は津波の状況に応じて変え難いことを考えると、当該港湾付近の津波高が大きくなる津波断層面を数ケース選定し、これを基に港口付近の津波波高が最大となるシミュレーションを津波海域ハザードマップ作成用に用いることが現実的である。

海底地震による津波初期水位を算定する方法としては、Mansinha and Smylie (1971) の解析解によって算出した海底地盤の変位を用いて津波初期水位を算定するのが一般的である。

津波シミュレーションにおいては、作業船の挙動や係留に影響を与える要素として港内の岸壁や護岸周辺での津波波高と、津波による流速が重要である。このためには、岸壁や護岸を乗り越えて津波が内陸に侵入する遡上計算が可能なモデルを採用することが重要である。また、計算するメッシュの大きさについては、大領域、中領域、小領域の3段階を設定する方法が一般的である。その際の小領域のメッシュの大きさは、港内の船舶の挙動などを評価できる程度に細かく設定するべきである。第3章では最小メッシュの大きさを30mとすると船舶の挙動の評価を行うことができた。

港内の津波シミュレーション結果を基に係留船舶津波ハザードマップの作成するにあたっては、いくつかの着目する要素が考えられる。一つは、最大の津波高（以下「最大津波高」という。）及び陸域で最大浸水深さ（以下「最大浸水深」という。）であり、二つ目は津波による最大流速（以下「最大津波流速」という。）で、三つめは、船舶応答計算による係留索張力の最大値（以下「最大係留索張力」という。）である。

これらのそれぞれの特徴は表-5.2.2に示すとおりである。

表-5.2.2 係留船舶津波ハザードマップ作成時の着目要素と特徴

着目要素	内容	特徴
最大津波高及び最大浸水深	津波伝播・遡上シミュレーションによる係留場所における津波高の最大値	主として岸壁や護岸への乗り上げ被害発生判断材料となる。なお、係留状況によっては引き波時の船舶の重要による係留索の切断判断材料の一つにもなる。
最大津波流速	津波伝播・遡上シミュレーションによる係留場所における津波流速の最大値	主として係留索の破断による流出及び漂流物等の衝突による被害発生判断材料となる。
最大係留索張力	船舶応答シミュレーションによる係留させた船舶の係留索に働く張力の最大値	主として係留索破断判断材料となる。また、増しもやいなどの対策を検討するためのデータの一つにもなる。

岸壁への乗揚げを検討するには最大津波高が重要な要因となり、係留索の破断や障害物の衝突を検討するには津波最大流速が重要な要因となる。また、増し舳などの係留対策の検討を行う上では、係留張力の最大値を用いると、被害低減対策の評価を行い易いという利点がある。

係留船舶津波ハザードマップを作成するにあたっては、このような着目要素の特徴を理解することが重要である。

(4) 係留船舶津波ハザードマップによる係留候補地の絞り込みと要検討事項

上記(3)により作成した係留船舶津波ハザードマップを基にして、(2)にて選定した港湾内の係留候補地の津波の状況を把握し、それぞれの候補地における被害発生の可能性を検討する必要がある。被害発生の可能性については、3.2.3(1)において記述したように、津波による候補地周辺の最大津波高及び最大浸水深、最大流速、最大係留索張力の値をもとに、表-5.2.3に示す以下の判断基準を用いることができる。

表-5.2.3 被害発生の概略判断基準と対策の留意点

着目要素	被害発生の概略判断基準	対策の留意点
最大津波高及び最大浸水深	岸壁等の前面の最大津波高が作業船の喫水+HWLから岸壁等の天端までの高さ以上となる。	岸壁等への乗り上げを防ぐような係留方法の検討。乗り上げを防ぐ新たな係留施設の建設の可能性の検討。
最大津波流速	岸壁等の前面の津波による最大流速が3m/s以上となる。	増しもやいなど係留索による係留方法の検討。流速が大き過ぎる際には係留場所として不適切の判断
最大係留索張力	係留索張力の最大値が係留索破断強度以上となる。	増しもやいなど係留索による係留方法の検討。係留索の破断を防ぐため新たな施設等の建設の可能性を検討

すなわち、最大津波高については、岸壁や物揚げ場、護岸等（以下「岸壁等」という。）の前面の最大津波高が「作業船の喫水+HWLから岸壁等の天端までの高さ」を超えると乗揚げ被害が発生する可能性が高くなる。また、最大浸水深については、喫水を超えると乗り上げ被害が発生する可能性が高くなる。

また、最大流速については、過去の船舶の被害事例から岸壁等の周辺の流速が3m/sを超えると係留索の破断が発生する可能性が高くなる。

さらに、最大係留索張力については、係留索破断強度が津波による想定される係留張力の最大値を超えると係留索の破断による船の漂流被害が発生する可能性が高くなる。

被害発生の可能性がある場合には対策の検討が必要である。対策を検討するにあたっての留意点についても表-5.2.3に示すが、津波高が概略判断基

表-5.2.4 係留候補地の評価表

着目要素	概略判断基準未滿	概略判断基準以上	
		対策可	対策困難又は不可
最大津波高及び最大浸水深	0	1	2
最大津波流速	0	1	2
最大係留索張力	0	1	2

準を超えた場合は、乗揚げを防ぐような係留方法の検討が必要であり、最大流速が概略判断基準を超えた場合は、増し舳などの検討が必要であり、最大係留索張力が概略判断基準を超えた場合は、増し舳や係留索の破断を防ぐような新たな施設などの検討が必要である。

これらの判断の目安と、被害低減対策が取れる可能性を基に、候補地を絞り込むための手法の一つとして、表-5.2.4を用いて、係留候補地に点数を付け、1項目でも2点以上がつかない場所を候補地として絞り込み、合計点数の低い場所をより有力な候補地として選択することを提案する。有力な候補地について、対策（被害低減対策）が必要な場所については具体的な対策の検討を行うとともに、対策港湾管理者及び水域利用者や施設所有者等の関係者等との調整を行い、最終候補地を決定することとする。なお、被害低減対策としては、次項5.2.7を参考とすることができる。

（5）既存の成果等を活用した簡便な考え方

以上（1）から（4）の過程を経て候補地の選定を行うことが適切であるが、今回の提案と同じ手法のシミュレーション結果が無い場合や、検討に十分な時間が無い場合なども考えられる。この際に少しでも作業船の被害低減に努めることが大切である。このため、簡便な考え方として、既存の研究の成果を参考とし、港湾の形状や水深の特徴を踏まえて、係留候補地として注意すべき場所について、まとめたものが以下のとおりである。

- ① 港口部が防波堤などで狭くなっている港では、防波堤の先端周辺付近は押波時、引波時ともに津波による流れが早くなる傾向にあるため、港口部の防波堤先端周辺は係留場所として好ましくない。
- ② 港湾内において陸上地形や岸壁、護岸、港内波除堤などが航路側にせり出しているような形状で特に航路幅が狭くなっている場所周辺は、やはり津波により流れが速くなるため係留場所として好ましくない。
- ③ 楕形の形状をした岸壁では楕の先端部付近の流速が早くなる可能性が高いため、係留場所としては好ましくない。
- ④ 港湾を取り巻く地形がV字谷で奥に行くほど狭くなる形状をしている場合は、津波のエネルギーが港奥に行くほど集積し、津波高などが非常に大きくなる可能性が高いため、このような地形の場合には湾奥部は係留場所として好ましくない。
- ⑤ 津波の波高が高く、陸上への浸水深が2m程度を超える場合には、喫水の浅い作業船は岸壁等に係留するだけでは陸上に乗り上げる被害が生じる可能性があるため、陸上乘揚げを阻止できるように岸壁等の反対側にアンカー等が取れるスペースを確保できない場所は好ましくない。
- ⑥ 防波堤内の泊地等が作業船の係留候補地となっている場合には、津波により大きく作業船が振動又は移動する可能性があることやアンカー展張のために広い空間が必要になるため、空間的な余裕のない場所は好ましくない。

あくまでも暫定的なものではあるが、以上を係留候補地の選定（絞り込み）のための参考とすることができる。一連の作業船係留場所の選定のフローを図-5.2.3に示す。

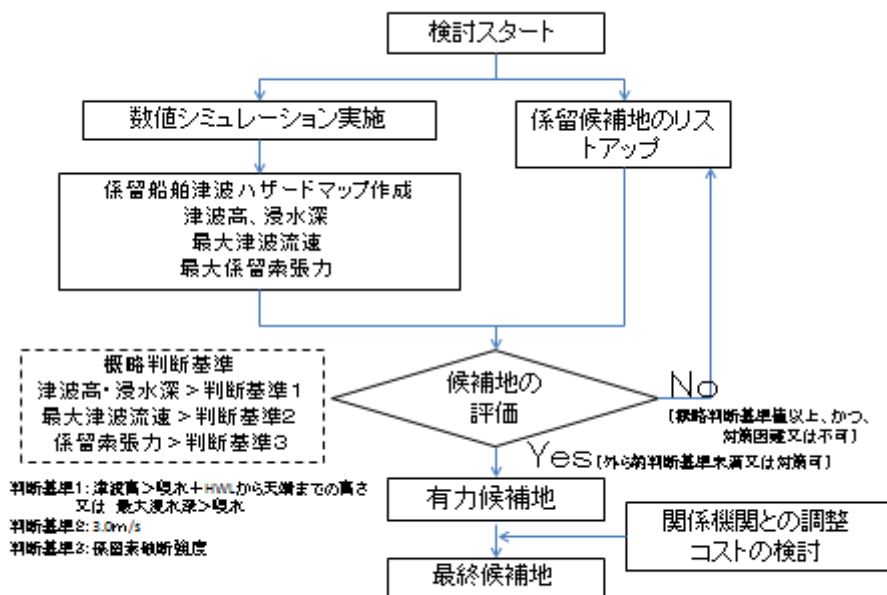


図-5.2.3 作業船係留場所の選定のフロー

5.2.7 作業船の係留方法の選択

作業船の係留場所の選定が終われば、次に係留方法を決める必要がある。ここでは、係留方法を決めるための考え方とその方法を示すものとする。

(1) 係留方法の実態に応じた係留方法の選定

係留方法については、4.1節に示した既存の作業船の係留実態をみると、岸壁等に直接係留する方法と、水域の海底地盤上にアンカーリングする方法、その他専用の係留ドルフィン等に係留する方法などが散見された。これらの係留実態を前提として、それぞれの係留方法に応じた被害低減対策を考えておく必要がある。そこで、岸壁等に作業船を係留する場合に、係留索破断対策として増し舳いによる方法、岸壁等への乗揚げ防止対策として船舶から見て岸壁反対側に沖側アンカーを取る方法、および係留用に新たに浮体式栈橋を設ける方法を示すこととする。また、一般的に行われている水域へのアンカーリングについても参考として配慮事項等について示すこととする。さらに、小型の付属作業船についての被害低減対策についても触れることとする。これらの被害低減対策ごとの係留方法をまとめたものが図-5.2.4である。

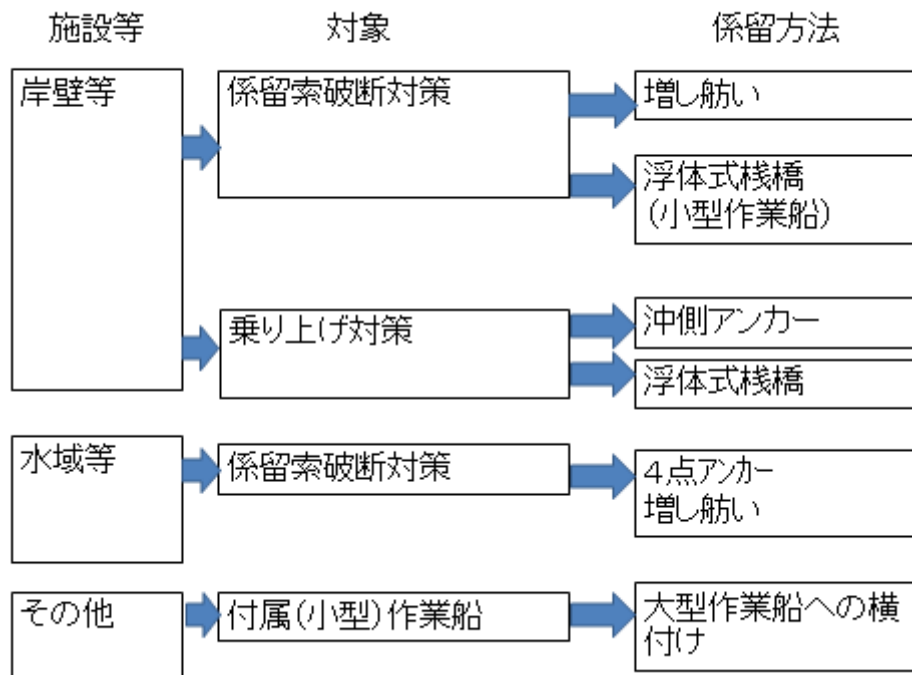


図-5.2.4 被害低減対策と係留方法の関係

(2) 岸壁への増し舳いによる方法

船舶の漂流条件として、岸壁等に係留している作業船が津波により流速 3m/s 以上の流れを受けると⁷⁾、舳いの破断が発生する可能性が生じてくる。また、係留船舶津波ハザードマップにおいて最大係留索張力が通常の係留状態での索の破断強度を上回る場合は、係留索が破断することが考えられる。このような場合の対策としては、増し舳いにより係留索に働く力を分散し、全体の係留力を上げることを考えるのが基本である。

係留力を上げるためには、係留索の張り方が重要である。係留索が短いと許容できる伸びが少ないため、早く破断することが考えられ、また、係留索の長さがバラバラであると、短い係留索に力が集中し、短いものから一本ずつ破断していく可能性が考えられる。さらに、張り方についても緩いものとピンと張ったものが混在するとピンと張ったものから破断する可能性があり、緩みすぎる船の動揺により衝撃的な張力が働く可能性もある。このため、係留に当たっては、係留索が極端に短くならないように展張し、複数展張する際には、同程度の長さとなるようにすることが重要である。また、係留時の張力が同じ程度になるように張っておくことも重要である。なお、押波時だけでなく引波時にも大きな流れが発生する可能性があるため、船の前後に同じ係留力となるように展張することが基本である。

増し舳いの上限は、係船柱の耐力や、船が持っている係留のための装置の数により決ま

るが、あらかじめ予想される最大係留索張力に安全率を見込んで多めに増し舳いを展張するのが好ましい。

以上、増し舳いによる係留力の強化方法と、留意事項について示したが、鹿島港のタグボートの漂流の事例¹⁸⁾ でみられるように、同じように増し舳いをしていても流速や波の状況によっては係留索が破断し船が漂流する場合があります、増し舳いによる対策だけでは限界があると考えられる。特に大きな流れが生じるなど、津波による擾乱が大きい場所では、その傾向が顕著にでると考えられる。この対策としては、波除堤などにより抜本的な港の形状を変える対策を検討する必要がある、1事業者や1企業の対応だけでは困難である。

(3) 沖側アンカーによる方法

港内の津波の津波高が喫水と水面から天端までの高さとの和を超えると、乗揚げによる被害が発生する可能性がある。これに対して岸壁側へ増し舳いをしていても効き目が無いことは明らかであり。この対策としては 4.5.2 で示したとおり、船から見て岸壁等の反対側（沖側）の船首及び船尾にアンカーリングすると効果的である。

この際には、アンカーリングする空間があることが第一であり、また、空間があったとしても航路など船の航行に障害が無いようにする必要がある。アンカーリングの空間をできる限り小さくするためには、一般に作業船の係留において占有水域を小さくするための工夫として良く見られる方法であるが、岸壁に近い側のビットから沖側にアンカーを取り係留索をクロスさせて係留する方法（図-5.2.5）もある。このように、沖側アンカーの設置については場所の条件に適した工夫をすべきである。

また、乗り上がり対策の場合は、作業船の係留位置が岸壁に近すぎると、反対側に沖側アンカーを取ったとしても、津波波高により岸壁に船体の一部が乗上げる可能性も考えられる。このため、ある程度岸壁から離して係留することが現実的であると考えられる。岸壁に近い場合は、4.6.3 に示したように津波が岸壁や護岸を越流する際に急激な係留張力が発生する可能性があるため、アンカーの係留索への負担を低減する意味でも効果的である。岸壁等からの距離については、シミュ



図-5.2.5 係留索をクロスさせた事例

東京港中央防波堤内側のFD(google map より)

レーション結果より津波により 20m 程度離すと越流発生時の急激な船の変位や係留力の増加が緩和されるため、20m 程度離すことが好ましい。なお、岸壁の場合は防舷材等の接岸に対する衝撃緩衝材があるが、護岸や防波堤の内側などに係留する場合は、防舷材のような正規の衝撃緩衝施設が無いことも多いため、ある程度の距離を設けて係留することが現実的である。

以上は岸壁等へ作業船を横付けした場合の対策であるが、縦付けの場合も同様に岸壁等からある程度離れた場所に係留することに留意すべきである。

(4) 浮体式栈橋等への係留による方法

乗り上げ防止対策として、有効な方法が浮体式栈橋へ係留する方法である。この方法については、4. 2節において、マリンゲート塩釜の遊覧観光船を浮体式栈橋に係留している際に津波が来襲し遊覧観光船が被害を受けなかったことや、MPS法を用いたシミュレーションにより、その効果を確認している。この浮体式栈橋による方法は、浮体式栈橋の規模が大きくなると建設コストが多くなることや、常時利用されることを考えると、潮位差の大きい太平洋側の港の港奥や内湾内の港で用いることが現実的であり、比較的小型の作業船において用いるのが現実的である。

浮体式栈橋を用いる場合には、津波により浮体式栈橋自体が漂流しないような構造であることが重要である。このため、想定される最大規模の津波波高に対しても漂流が発生しないような設計を行う必要がある。

また、浮体式栈橋に抛らない場合でも、大きな津波波高に対して追従が可能な係留施設（例えば係留杭で潮位変動に対する追従性がある係留方法を備えているもの）を用いることにより同じ効果を期待することができる。

(5) アンカーを使った係留による方法

水域施設で作業船の係留を行う場合は、アンカーリングにより係留されている場合が多くみられる。この方法については「津波来襲に対する作業船の安全確保に関するガイドライン」においても3,000DWTの船を想定して、津波時の動揺量及び係留索に作用する張力の検討を行っており、これを参考にすることができる。この場合には、占有する水域を広くとる必要があり、アンカーリングのための空間の確保が不可欠である。また、空間の制約が大きい際には、アンカーリングの方法をクロスにする工夫をすることにより、ほぼ同じ効果を上げることができる。

上記ガイドラインでは、モデルの適用範囲を、「(津波高×2) / 水深の値」が0.8未満の場合としており、この範囲外では浅海域のため津波が砕波すること等により衝撃的な波力が発生する可能性があるため、一般的に係留場所としては好ましくない。しかし、係留場所が他に見当たらない場合などには、アンカーの把駐力が十分に大きくまた係留索の強度が十分にある作業船の場合には、多少係留位置から移動することを許容すれば津波による漂流を防げる可能性もあるため、より詳細な検討を行うことも無駄ではない。

なお、作業船の係留実態を見ると、大きな作業船に小さな作業船を横付けで係留している事例が多くみられる。また、土運船などは複数の土運船を連続して繋ぎ留めている事例も多い。これらは、ある意味で浮体式構造物に係留していることと同じ効果を期待できる場合がある。ただし、この際にはお互いの作業船同士を固縛することと併せて、一体となった作業船全体が漂流することの無いように、必要な係留索強度や把駐力等の検討を行う必要がある。

（６）付属小型作業船の被害低減対策

以上（１）から（５）までで、比較的大きな主作業船を中心として被害低減対策の具体的方法や留意事項を示してきたが、小型の付属作業船については、自航式のものが多く、一般の小型船の津波対策を参考とすることが適切である。

ただし、上記（５）において示したとおり、浮体式栈橋に固縛することによる被害低減と類似の効果を出す方法として、主作業船に直接固縛係留することも一案である。特に津波波高が大きい際には、小型船は岸壁等への乗り上げや、津波による巻波等による沈没などが発生しやすいが、大型の主作業船に係留することにより、岸壁等への乗揚げや巻波の影響を緩和できるため、被害を低減できる可能性は高くなる。

5.2.8 港湾計画等の計画時の対応

津波来襲に対して、平常時の対応だけでは十分な被害低減対策を行うことができない場合がある。例えば、港湾が狭く作業船の係留場所の候補地となる十分な空間が見当たらない場合や、津波による波高や流れが大きいため増し舳いなどの係留方法の工夫だけでは必ずしも十分な対策になり得ない場合などがそれにあたりと考えられる。

このような場合には、港湾管理者等は、港湾計画段階から作業船に係留することができる広い水域のある作業船船溜まりなどの適切な空間を確保することや、施設整備段階において浮体式栈橋等の係留施設を整備するなどの、計画時の対応を積極的に行うよう努めるべきである。

作業船は、航路啓開や災害復旧はもちろんであるが、港湾工事や漁業工事などの公共事業で利用されることが多く、港湾の開発や整備時にも不可欠な公的な使命を帯びることの多い船である。しかし、通常の港湾で行われている貨物輸送や旅客輸送などを含む経済活動においては使われることが無いため、港湾の整備や利用が進む中で係留場所が失われる可能性や、十分に配慮されないまま係留場所を転々とせざるを得る可能性がある。仮にこのような状況になった場合には、津波に対して十分な被害低減対策を取ることは難しくなる。港湾管理者等は、このような作業船が置かれている状況に特に配慮して、作業船運行者等と相談し、港湾計画や施設整備計画において必要に応じて作業船の係留場所や施設を位置付けるように努めるべきである。

5.2.9 調査・研究・技術開発

（１）係留船舶津波ハザードマップ等の技術情報の高度化

本ガイドラインでは、津波による作業船の被害を低減できる係留場所の選択を行うため係留船舶津波ハザードマップの利用の適切性を示した。しかし、現時点では係留船舶津波ハザードマップが整えられている港は必ずしも多くはない。また、数値シミュレーションの手法も今後さらに進歩することも考えられる。このため、今後、主要な港湾における係留船舶津波ハザードマップの整備を進めるとともに、技術の進歩に合わせて、随時更新し

ていくことが重要である。

また、係留場所選定における概略判断基準や具体的な係留方法についても、本ガイドラインにおいて一定の知見を示した。しかし、今後の技術の進歩、高度化に合わせて、これらの値や方法についても必要に応じ見直しを進めることが重要である。

(2) より安全な作業船の研究開発・技術開発等

東海地震や東南海地震、南海トラフ地震などの巨大地震はいつ発生するか予測は困難である。しかし、これらの巨大地震とそれに伴う津波が港などの太平洋沿岸域を襲った際には、港湾の拠点とした緊急物資の輸送はもちろんであるが、我が国の経済の早期復興のためにも、港湾機能の回復は重要であり、このために作業船に期待される役割は多大である。津波に対する作業船の被害低減対策は我が国にとって重要な施策の一つであるといえる。

しかし、一方で、我が国の作業船の船齢は高く更新時期になっている船も多い。また、地震に対する被害低減対策は重要な課題ではあるが、それ以外にも船員や作業員の高齢化や、作業効率の向上、より難度の高い工事への対応などの課題を抱えている。これらの課題に対応するため、作業船の更新や修理に合わせて作業船事態の安全性向上や機能向上などについて研究開発・技術開発を行うことも重要になってきている。

今後、作業船に関する研究開発・技術開発を積極的に進め、その成果を活用し、津波被害低減対策に生かしていくことが望まれる。

第6章 作業船の津波被害低減対策ガイドラインの効果と課題

本節では5. 2において策定した大規模地震に伴う津波来襲に対する作業船の被害低減対策のためのガイドラインの効果と課題について記述する。

6. 1 ガイドラインの効果

6.1.1 作業船の被害低減対策の実効性の向上と応用

従来、作業船は、津波来襲時に港外への退避か作業船の船員の安全な場所への退避を中心とした対応しか示されていなかった。しかし、作業船の津波被害低減対策ガイドラインを取りまとめたことにより、常時からの適切な係留場所の選定や係留方法の工夫を示した。これにより、津波来襲時には港外退避が難しい作業船の被害低減対策が具体的に進むことになり、被害低減の実効性が上がることとなる。

本ガイドラインが示した重要な点は、作業船の津波被害低減対策を単に作業船の船員等や運行者にのみ依存するのではなく、港湾管理者等も関わる必要があることを明確にしたことである。このことも、作業船の被害低減対策の実行性を大きく向上させることに有効である。

港湾管理者等の関与の必要性を明確に示したのは、震災後の港湾機能の早期回復が、港湾周辺の被災住民はもとより背後地域の経済やより広域の経済・産業活動を行う企業等にとって、最も重要なリスクマネジメントの一つであるためである。つまり、航路啓開や港湾施設の災害復旧に不可欠な作業船について被害低減対策を図ることは、港湾管理者が果たすべき重要な役割の一つであると言える。

このように作業船の津波災害時の重要性が再認識されることにより、港湾計画や事業計画などの計画時や、通常時からの作業船被害低減対策が検討されることになる。この結果、津波災害時に早期に航路啓開や災害復旧の活動に参加できる体制を構築することができ、次項で記述するように大規模地震に対する準備に大きく貢献することとなる。

なお、このガイドラインは単に作業船に留まらず、一般の貨物船や旅客船などにとっても参考とできる場所である。ガイドラインを応用することにより作業船以外の船舶の被害低減対策の策定にも役立てることができる。特に、係留船舶津波ハザードマップを主要な港湾に整備することは、一般貨物船等にとっても海域の危険性を定量的に評価するための重要な基礎情報となり得る。

6.1.2 大規模地震に対する準備への貢献

(1) 南海トラフ巨大地震等の大規模地震対策

今後発生が予想される東海地震、東南海地震、南海地震など南海トラフで発生する巨大地震については、中央防災会議の南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループは、最大クラスの地震・津波として東日本大震災を超える広域の想定震源断層域を設定しておりその津波高等の推計を11ケース行っている³⁷⁾。この推計結果をみると、この南海トラフ

巨大地震が発生した場合には東日本大震災時と同程度以上の規模の津波が発生することが考えられている。特に、南海トラフ巨大地震では、産業集積が非常に高い三大湾や、東海地方に大きな津波が来襲する推計となっている（図-6.1.1）。同ワーキンググループでは被害想定も行っているが、平成24年8月29日に発表された第一次報告では、東海地方が大きく被災するケースで死者8.0～32.3万人、近畿地方が大きく被災するケースで5.0～27.5万人、四国地方が大きく被災するケースで3.2～22.6万人、九州地方が大きく被災するケースで3.2～22.9万人となっており、いずれも東日本大震災の死者数を遥かに上回り、2倍から20倍にも及ぶ大きな被害が出る予測結果となっている⁹⁾。また、全壊及び焼失棟数でも、東日本大震災を大きく上回る被害が想定されており、太平洋沿岸地域の被害は東日本大震災時の被害を超える過去に例を見ない大きな規模となる可能性が十分に考えられる。

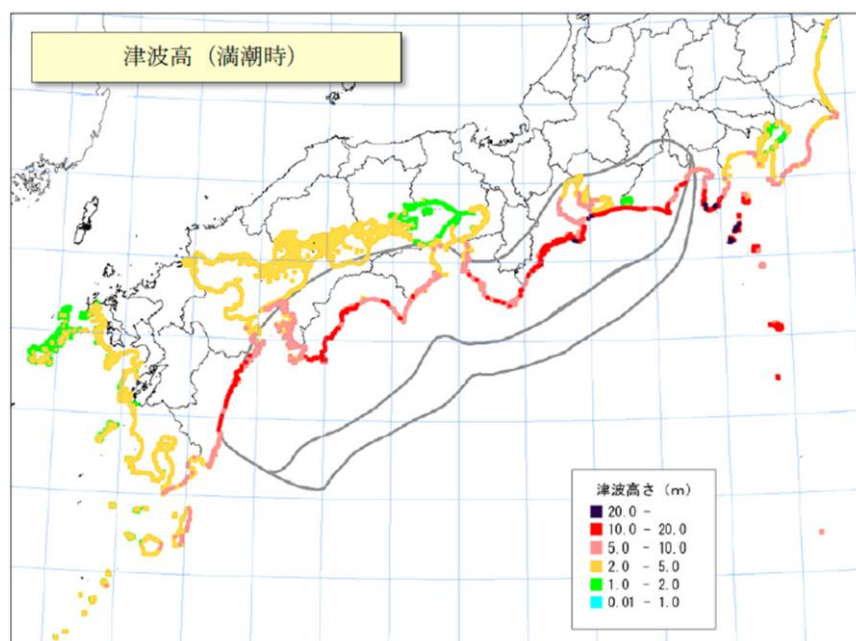


図-6.1.1 南海トラフ巨大地震の津波高分布予測（ケース①⁸⁾の例）

この際に、港湾を利用した救援や緊急物資の輸送、生活物資の搬入、更には産業活動に欠かせないサプライチェーンの早期回復のためにも、東日本大震災時以上に港湾機能の早期回復は将に国家的な重要課題である。このためには、航路啓開や災害復旧に必要な作業船団を健全な状態で確保することが不可欠である。

本ガイドラインは、国家的な重責を担う作業船の被害低減対策を充実させることを通じて、我が国を挙げての大規模地震対策の実効性を向上させることに貢献するものである。新たな大規模地震災害後の緊急物資の海上からの支援や、国や地域の経済活動に欠かせない港湾の早期機能回復をより確実なものとする効果が期待できる。

（2）非常災害時の港湾機能の維持の・早期回復施策のバックアップ

国は、東日本大震災の経験を踏まえて、非常災害時に港湾機能を維持し、事前防災・減災対策を充実するために、平成25年6月に港湾法の一部を改正する法律を公布した。この法律は、首都圏直下地震や南海トラフ巨大地震などが発生した際に、三大湾（東京湾・大

国の関係機関、港湾管理者、物流を担う事業者、荷主となる企業等の関係者が協働して取り組む。さらに、その他非常事態あるいは非常事態が予測される場合に適切な対処措置が講じられるように、関係機関と連携しつつ、常時からの情報共有、災害時における港湾施設の被災情報を迅速に共有するシステムの構築及び定期的な訓練の実施を進める。』

このような基本方針を受け、多くの港湾において港湾 BCP が策定されている。筆者が九州地方整備局の副局長として指揮をとった九州地方管内の港においても、「九州東岸地域の港湾における地震・津波対策検討会議」を設置し、細島港、宮崎港、油津港において港湾事業継続計画を策定させた。

また、我が国を代表する輸出産業が集積する伊勢

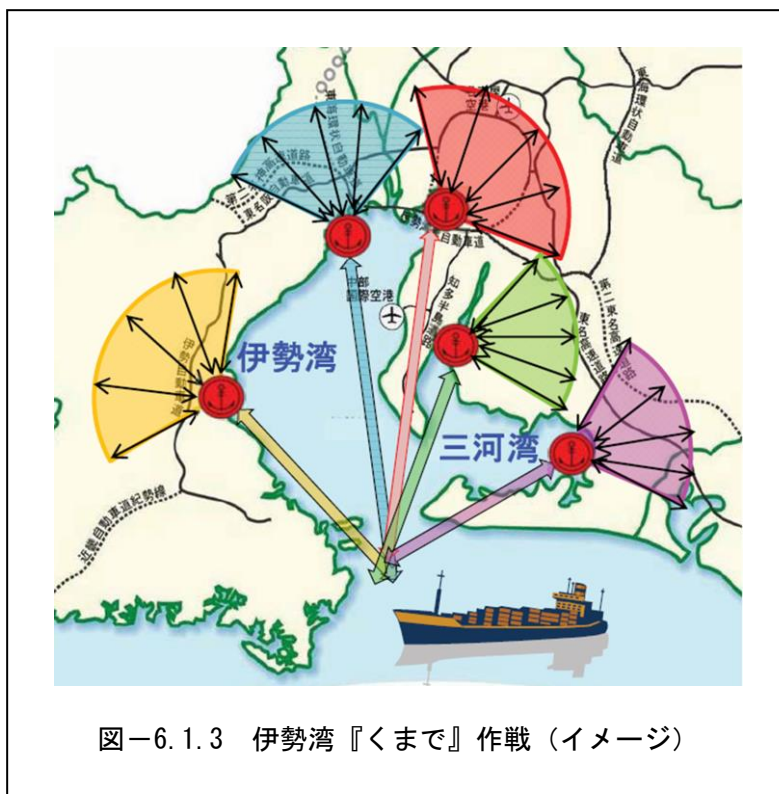


図-6.1.3 伊勢湾『くまで』作戦（イメージ）

湾では、中部地方整備局が「伊勢湾『くまで』作戦（仮称）」（図-6.1.3）を策定している。この中では、初動体制の一つとして各港の航路啓開を行い、海上輸送ルートを確認することを位置付けている。

このような港湾 BCP において、その前提としていることが、津波が発生しても作業船団が健全な状況で残っていることである。

本ガイドラインは、全国の港で策定されている港湾 BCP を機能させるためにも有効なものであり、航路啓開や港湾の災害復旧の隘路を打開するものとして、ガイドラインに基づく具体的な行動が早期に行われる必要がある。

以上のように本ガイドライン策定によって、作業船の被害低減対策の実行が上がるだけにととまらず、津波に対する地域の様々な主体のリスクマネジメントの質が向上することになる。また、作業船以外の船にとっても被害低減対策の質を向上させることにつながる。この意味で本ガイドラインの効果は単に作業船の被害低減対策にとどまらない広範な効果が期待できるといえる。

6. 2 ガイドラインの課題

本ガイドラインの策定により 5.3.1 項で述べたように、大きな効果が期待されるが、今後さらにガイドラインの実効性やその質を向上させていくことが重要である。このための主な課題は以下のとおりである。

まず、本ガイドラインの実効性を上げるために、ガイドラインの考え方を港湾整備の政策や施策に具体的に盛り込むことが重要である。このためには、港湾を整備する港湾局をはじめとした国や港湾管理者が本ガイドラインの趣旨を踏まえてマニュアル化や基準化に取り組むことが求められる。特に係留船舶津波ハザードマップについては、陸域の津波ハザードマップと同様に、大津波の来襲の可能性の高い主要な港湾においては今後逐次整備を進め、作業船の津波被害低減のために、また作業船以外の船への応用も含めて、有効活用を促すべきである。また、本ガイドラインの普及を踏まえて、港湾施設等の津波被害予測と連動させることにより、津波の来襲に備える意味から、航路啓開計画や災害復旧計画の内容をより充実させることがより重要になる。

ガイドラインの質を向上させるためには、本研究において提案した幾つかの考え方についてより精度を上げていくことや改善に取り組むことが重要である。例えば、係留場所の選定に用いた津波高さや津波流速などの概略判断基準の考え方について、より精度を上げていくことが考えられる。また、係留索張力の補正の考え方についても、より広範に活用できるように更なる工夫を行うことも重要である。係留方法の考え方については、具体的に係留索の選定ができるように、より精度の高い定量的な分析について検討することや、係留場所の水深や防舷材、係留柱、地盤条件等の要素についても加味した分析をするなど、深度化を図ることが重要である。

なお、本研究は大津波が発生した場合のリスクマネジメントの一環として、作業船の津波被害低減対策を捉えてきたが、作業船が抱える今日的課題は他にもあり、特に係留場所については大津波の来襲に備える視点だけで決められるものではないことを考えると、長期的な視点に立って、今後の作業船の係留場所の在り方や作業船の管理の在り方の検討が進められ、その中で本研究成果が生かされることを望むものである。

第7章 結論及び謝辞

7. 1 結論

本研究では、東日本大震災後の航路啓開作業における作業船の重要性の認識を契機として、初めて作業船の津波被害低減対策について総合的に取り組み、その内容をガイドラインとして取りまとめたものである。本研究の主たる結論は、以下のとおりである。

- ①作業船の津波災害時啓開作業の実態分析を通じ、その意義と公共性の認識を共有した。
- ②係留船舶津波ハザードマップを提案し、港湾計画と管理において適切な作業船係留場所の選定方法を明らかにした。
- ③津波来襲時における浮体式係留方法および沖側アンカー等の有効性を明らかにした。
- ④関係者が共有する津波被害低減のためのガイドラインを提案し、その有効性を明らかにした。

東日本大震災から5年目を迎えようとしているが、この震災から得られた教訓を風化させること無く後世に伝えるとともに、災害に対してより粘り強い社会に変えていくべく不断の努力を重ねることが東日本大震災を経験した我々の使命であろう。本研究の成果が多くの関係者に共有されることにより、作業船の津波被害低減対策が進展し、大規模地震に対するリスクマネジメントが従来以上に充実することを切に望むものである。

7. 2 謝辞

本研究をまとめるにあたり、多くの方々にお世話になるとともに、貴重なご指導、ご鞭撻を受けた。

日本大学理工学部海洋建築工学科（以下「海洋建築学科」という。）の増田光一教授には、本研究の全般にわたって丁寧かつ熱心なご指導を頂くとともに、取りまとめにあたり係留船舶津波ハザードマップの開発やMPS法などについて専門的な視点からご教示を受けた。日本大学理工学部海洋建築学科の居駒知樹教授には、取りまとめに当たりの確なご助言を頂いた。日本大学の井野洋一客員教授には、研究の考え方や進め方、まとめ方など全般にわたり示唆に富むご意見を頂いた。また、元一般財団法人港湾空港総合技術センター専務（現三井住友建設株式会社顧問）佐藤孝夫博士には本研究の基本的な意義についてご示唆を頂いた。数値計算等の解析にあたっては、海洋建築学科の村田一城氏、星野智史氏の協力を得た。東日本大震災時の作業船の航路啓開活動の分析では、横浜国立大学の宮本卓次郎特任教授、一般財団法人港湾空港総合技術センターの志村浩美調査役にご協力頂いた。

資料の作成にあたっては、国土交通省九州地方整備局港湾空港部、東北地方整備局港湾空港部、社団法人埋立浚渫協会、一般財団法人港湾空港総合技術センターのご理解とご協力をいただいた。

ここに改めて深く感謝の意を示すとともに心からのお礼を申し上げたい。ありがとうございました。

【参考文献】

- 1) 警察庁緊急災害警備本部：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置，2015 年 2 月 10 日広報.
- 2) 内閣府：平成 23 年版防災白書，図 1-1-4.
- 3) 東北地方整備局港湾空港部：東北港湾の復旧・復興状況
(<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/kakyoin/info/into001.html>) .
- 4) 高橋重雄，戸田和彦ら：2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，PARI, No.1231, 2011 年 4 月.
- 5) 経済産業省大臣官房調査統計グループ経済解析室：被災地域に所在する港湾からの輸出状況，産業活動分析（平成 23 年 7 月～9 月）.
- 6) 海上保安庁災害対応水路測量班：航路障害物調査，海洋情報部研究報告第 49 号，2012 年 12 月 20 日.
- 7) 大野正人，宮本卓二郎，志村浩美，米原吉彦：大津波被災後の港湾における航路等の啓開作業の方法と必要な機材に関する研究，沿岸域学会誌，Vol.27, No.1, pp.37-48, 2014.
- 8) 中央防災会議，防災対策推進検討会議，南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の地震像，2013 年 5 月.
- 9) 中央防災会議，防災対策推進検討会議，南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告），2012 年 8 月 29 日.
- 10) 日本建設機械施工協会：日本建設機械要覧 2013 年版.
- 11) 一般社団法人 日本作業船協会：現有作業船一覧 2013 年版.
- 12) 岡本修：東日本大震災時の港内船舶の被害実態，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol69, No.2, I_73-I_78,2013.
- 13) 富田孝史，廉慶善，鮎貝基和，丹羽竜也：東北地方太平洋沖地震時における防波堤による浸水低減効果検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol68, No.2, I_156-I_160, 2012.
- 14) 日本海難防止協会：海と安全，No.522, 2012 春号，2012, p118-125.
- 15) 国土交通省近畿運輸局：津波に遭遇した船の行動事例集，2011, p41-47.
- 16) 日本海難防止協会：海と安全，No.522, 2012 春号, p115-117.
- 17) 徳島県庁：資料 3 津波等による被害及び対策事例，東日本大震災による浮棧橋・係留艇の被災状況，www.pref.tokushima.jp/docs/2011110200219/.../siryou3.pdf.
- 18) 社団法人日本航海学会「東日本大震災検討会議講演資料集」：2013 年 5 月 16 日.
- 19) 海上保安庁：東日本大震災への対応の記録,平成 24 年 1 月,
http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/jisin/20110311miyagi/120123_taiou.pdf.
- 20) 社団法人日本港湾協会：よみがえれ港湾 3.11 東日本大震災の記録，情報誌「港湾」

平成 24 年 3 月号別冊,2012 年 3 月 25 日発行.

- 2 1) 社団法人日本作業船協会：津波来襲に対する作業船の安全確保に関するガイドライン，2009 年 3 月.
- 2 2) 首藤伸夫；津波対策小史，津波工学研究報告，2000 年，第 17 号，pp.1-19.
- 2 3) 東北地方整備局：沿岸部と背後地の連携による総合的な津波被害軽減方策検討委員会，2005 年.
- 2 4) 山本正明，中山哲巖，坂井淳，三橋宏次：日本海中部地震津波による漁港内の漁船被害，1985，第 32 回海岸工学講演会論文集，pp.460-464.
- 2 5) 中屋行雄，津田宗男，青野利夫，杉浦秀之、本多将人：港湾内に進行する津波の推定と係留船舶への影響評価の試み，海洋開発論文集，第 21 巻，2005 年 7 月.
- 2 6) 米山治男，大垣圭一：清水港を対象とした数値計算による係留船舶への津波影響の評価，港湾空港技術研究所資料 No.1190，PARI，March 2009.
- 2 7) 増田光一，居駒知樹，恵藤浩朗、村田一城，宮本卓二郎，大野正人：港湾における浮体式栈橋を用いた船舶の津波被害低減法に関する基礎的研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集，2014.
- 2 8) 片山敏孝，村澤直樹，高柳省一，岩佐雅教，松下圭吾：津波来襲時における漁船の避難対応に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.b2-65，No.1，pp.1331-1335，2009.
- 2 9) 風間隆宏，中村隆，伊藤敏朗，大塚浩二，佐藤勝弘，今津雄吾：津波による船舶被害軽減のための避難海域に関する研究，土木学会海岸工学論文集，第 51 巻，pp.1356-1360，2006.
- 3 0) 河田恵昭，新名恭仁，原田賢治，鈴木進伍：津波による船舶被害の評価手法の提案，土木学会海岸工学論文集，第 51 巻，pp.316-320，2004.
- 3 1) 京浜港船舶津波対策協議会：船舶津波対策実施要領，2005 年 8 月 25 日施行.
- 3 2) 大分港長・大分海上保安部長：津波対策実施基準，2010 年 7 月 1 日.
- 3 3) 金澤剛，小竹康夫，松村章子：津波作用時に一点係留中船舶に発生する係留張力に関する実験的研究，土木学会第 63 回年次学術講演会（平成 20 年 9 月），2-194，pp389-388.
- 3 4) 星野智史，増田光一，居駒知樹，大野正人，村田一城：津波作用時における港湾内の船舶を対象とした海域津波ハザードマップに関する基礎的研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集第 19 号，2014A-GS11-90.
- 3 5) Steketee.J.A： On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium，Can.J.Phys.36，pp.192-205，1958.
- 3 6) YOSHIMITSU OKADA： INTERNAL DEFORMATION DUE TO SHEAR AND TENSILE FAULTS IN A HALF-SPACE，Bulletin of the Seismological Society of America，Vol82，No.2，pp1018-1041，April 1992.

- 37) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）平成 24 年 8 月 29 日発表。
- 38) 増田光弘，南清和，増田光一：津波来襲時における岸壁に係留された船舶の防災・減災対策に関する研究（その 2），第 128 回講演会（2013 年 5 月 30 日，31 日），日本航海学会講演予稿集第 1 巻 1 号，2013 年 4 月 27 日。
- 39) 海難防止協会：津波が予想される場合の船舶安全確保に関する調査研究報告書，平成 15 年。
- 40) 日本海難防止協会：大地震および大津波来襲時の安全対策に関する調査研究報告書，2012 年。
- 41) 日本作業船協会：作業船設計基準，日本財団図書館，
http://www.zaidan.info/library/seikabutsu_print_view.do
- 42) S. Koshizuka and Y. Oka ; Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nucl. Sci. Eng, 123, pp.421-434, 1996.
- 43) 越塚誠一；粒子法，計算力学レクチャーシリーズ，5，日本計算工学会編，丸善株式会社，2005.
- 44) 増田光弘；津波中の浮体挙動解析への粒子法の適用性に関する研究，日本大学博士論文，2010.
- 45) 相田康洋，増田光一，居駒知樹，惠藤浩朗；MPS 法における津波作用時の浮体 - 流体連成解析手法（その 1 3 次元 MPS 法における慣性モーメントの取扱法と基礎的検証），日本建築学会，10018，2013.