

津波来襲時における船舶避難リスクマップの 提案と東京湾への適用

嶋原 良典¹・北 隆範²・多田 毅³・八木 宏⁴

¹正会員 防衛大学校准教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水一丁目10-20)

E-mail: shigi@nda.ac.jp

²非会員 防衛省沖縄防衛局 調達部 (〒904-0295 沖縄県中頭郡嘉手納町字嘉手納290-9)

³正会員 防衛大学校准教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水一丁目10-20)

⁴正会員 防衛大学校教授 建設環境工学科 (同上)

津波来襲時に海上を航行する船舶が安全な海域に避難するための船舶避難リスクマップを提案した。複数の津波イベントについて最大流速分布と操船限界流速の超過確率分布を求め、両者を1枚のマップ上に重ね合わせて可視化する手法により、従来の船舶の避難海域の設定では考慮されなかった潜在的に危険な海域の評価を可能にする。提案手法を東京湾全域に適用することで、相模トラフで想定される津波イベントに対し東京湾中央航路の全域、浦賀水道の西側および東京湾内湾の奥を推奨避難海域として抽出する一方、東京湾内湾の港湾部では津波リスクが高いことがわかった。さらに横須賀港を対象に船舶の性能毎に避難海域への移動の可否を検証し、移動が困難な場合、係留索を強化するなどの被害を軽減するための対策が必要であることを明らかにした。

Key Words : tsunami risk map for vessel evacuation, numerical simulation, Tokyo Bay, Port of Yokosuka

1. 背景と目的

津波来襲時に海上を航行する船舶は、津波により生じる被害から逃れるために早急に安全な海域に避難する必要がある。これまで港湾の津波ハザードの評価や船舶の避難海域設定に関する研究例^{1)~4)}はいくつかあるが、国交省⁵⁾は、船舶が津波から避航するためには津波により操船不能となる流速（以下、操船限界流速）が2ノット（約1 m/s）以下で、かつ碎波の影響のない（碎波に巻き込まれて転覆、圧流されない）十分深い海域への航行を推奨しており、上記の条件に基づき船舶の避難海域を事前に設定することは重要である。一方で、現行の避難海域の設定には「最大クラスの津波（L2）」を想定しているが、津波の発生場所等の条件によっては「発生頻度の高い津波（L1）」の方が強い流速が生じる可能性もある。すなわち、船舶避難には高・低頻度の様々な津波シナリオを統一的に評価することで、潜在的に危険な海域を抽出する必要がある。

そこで本研究では、複数の津波イベントを考慮し、津波外力と発生確率を同時に把握できる船舶避難リスクマップを新たに提案し、ケーススタディとして東京湾に適用した。同地域の船舶の推奨避難海域を示すとともに、実際に避難海域に移動する際の可否の検証と被害が想定

される場合の軽減策を提示することを目的としている。

2. 手法

(1) 概要

本研究で提案する船舶避難リスクマップの概要は以下の通りである。まず、発生頻度の異なる複数の震源モデルに対して津波数値計算を実施し、対象海域における全津波イベントの最大流速分布を求める。次に地震の発生確率を仮定し、全津波イベントに対して発生する操船限界流速の超過確率分布を求める。そして、津波流速の大きさに対してカラーマップを割当て、また、操船限界流速の超過確率に応じて濃淡を付けることにより、外力の大きさと生起確率を同時に把握できる船舶避難リスクマップが得られる。さらに同図に相対波高から得られる碎波限界領域を重ねることで、操船困難になるかつ碎波の影響を受ける可能性が小さい、津波時の推奨避難海域を抽出することが可能になる。

(2) 津波数値計算

a) 対象領域

東京湾全域の船舶避難リスクマップを作成するため津波の伝播計算を行った。本研究の対象地域である東京

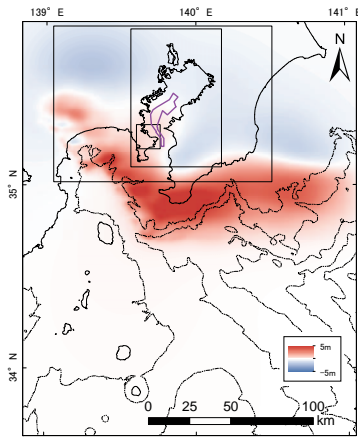


図-1 計算領域（270m格子，枠内：90，30，10m格子）と想定震源モデル（M8.5）による津波初期波形．コンターは水深1,000m毎に表示．

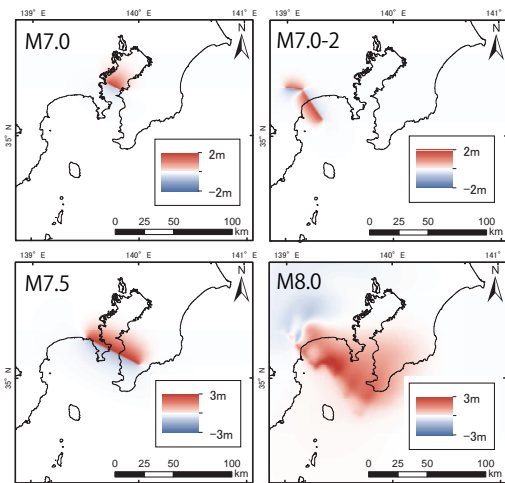


図-2 想定震源モデル（M7.0～M8.0）による津波初期波形

湾は，図-1に示すように南側の太平洋に向けて開けた湾であり，三浦半島の観音崎と房総半島の富津岬を結んだ線の北側（内湾）と南側の浦賀水道を含んだ海域（外湾）を指す．海底地形として，内湾部の水深は数十mオーダーと比較的浅いが，外湾になると急激に深くなる特徴を有する．また，同図中に紫線で示しているのは東京湾中央航路であり，東京港・横浜港・千葉港等に出入りする船舶が500隻/日以上航行する海上交通の過密海域である．同航路は非常災害時の退避推奨水域にも指定されているが，上記の理由から津波時における同航路の安全性について検討することは重要である．

b) 津波数値モデル

津波の伝播・遡上計算から東京湾内の津波波高と流速を算出した．支配方程式として非線形長波理論をStaggered Leap-frog差分法により数値的に解いた．地形データは内閣府公開のものを使用し，津波波減域を含む沖合から空間格子長を270，90，30，10 mまで順次小さくするように空間接続を実施した．各計算領域の範囲は図-1に示す通りである．津波の再現時間は地震発生から6時間，時間ステップは0.1秒とした．Manningの粗度係数

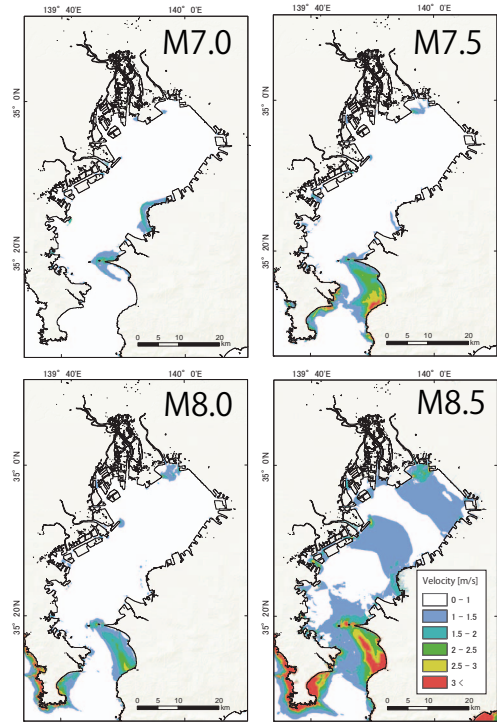


図-3 各震源モデルに対する津波の最大流速分布（30m格子）

は海域を0.025，陸域は遡上も考慮し，粗度を土地利用状況等に応じて与えた．津波時の潮位条件としては，朔望平均満潮位0.9 mに設定した．

c) 想定震源モデル

本研究では想定した震源モデルとして神奈川県津波浸水想定（平成24・27年度）を参考に⁹⁾，南関東近傍を震源とする「最大クラスの津波」に元禄型関東地震（M8.5）を，「発生頻度の高い津波」として大正型関東地震（M8.0），三浦—鴨川断層地震（M7.5），東京湾内地震（M7.0），神縄・国府津—松田断層地震（M7.0-2）を対象とした．なお，次章（3）では東京湾内で津波の影響が大きいと予想されるM7.0～M8.5の4イベントを採用し，神縄・国府津—松田断層地震（M7.0-2）は横須賀港の詳細評価（4）の際に使用した．各震源モデルにより生じる地殻変動量はMansinha and Smylieの方法により求めた．得られた津波初期水位分布を図-1と図-2に示す．

3. 東京湾全域の船舶避難リスクマップ

(1) 津波の最大流速分布

津波数値計算によって得られた，各震源モデルに対する津波の最大流速分布（30 m格子）を図-3に示す．これらの図より，地震の規模が大きくなるに従い流速は大きくかつ広範囲となることがわかる．全体的には外湾と三浦半島の西側で大きな流速が発生し，内湾では流速が小さくなる傾向が見られる．これは，浦賀水道から内湾側にかけて水深が急激に浅くなることから津波のエネルギーが浸入しにくくなるためと考えられる．ただし，内湾

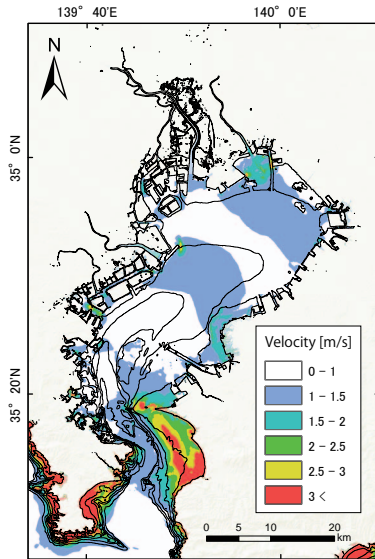


図4 津波の最大流速分布（全津波イベントの最大値）．コンターは水深 10 m 毎に 50m まで表示．

であっても横浜や川崎などの入り組んだ港湾部では流速が大きくなる海域が存在することに注意する必要がある．また、津波の発生域の違いも分布に大きく影響する．三浦—鴨川断層地震（M7.5）のように外湾の直下が震源の場合は同海域の流速が大きくなる一方で、大正型関東地震（M8.0）では相模湾が震源域となるため、三浦半島の西側で流速が大きくなる．

津波時における船舶の避難海域を設定する場合、危険域の見落としがないように全津波イベントの最大値を合算する必要がある．そこで以下の式に基づき、全津波イベントにおいてある地点 $Z(x, y)$ で観測される流速を重ね合わせることで、各地点で最大となる流速を抽出した．

$$V_z = \max(v_{1,xy}, v_{2,xy}, \dots, v_{i,xy}, \dots, v_{N,xy}) \quad (1)$$

ここで、 N はイベントの総数である．図-4に結果を示す．全体的には元禄型関東地震（M8.5）の影響が支配的ではあるが、局所的に他の津波イベントによって流速の大きくなる場所が存在することがわかる．

(2) 操船限界流速の超過確率分布

前節で求めた津波の最大流速分布から、特に浦賀水道ではほぼ全域にわたり操船限界流速（1 m/s = 約2 ノット）を上回ることがわかる．よって、従来の手法に倣い船舶の避難海域を設定する場合は、図中の白い領域のみが推奨避難海域となる．しかしながら、浦賀水道は平常時に航行する船数も多いため、全ての船が指定した海域に退避することは非常に困難であると言わざるを得ない．一方、浦賀水道ではM8.5の津波イベント以外の最大流速分布を見る限り、操船限界流速を下回る場合の方が多い．したがって、被災するリスクという観点から考えると、確率的に操船限界流速を超えやすい海域を明示すること

表-1 地震の発生頻度と再現期間

M	$p(M)$	再現期間（年）
7.0	4.50	26
7.5	1.42	81
8.0	0.45	379
8.5	0.08	2081

も重要であろう．そこで以下では、東京湾全域での操船限界流速の超過確率分布を作成することを試みた．

a) 地震の発生頻度の設定

地震の発生頻度の設定として、藤間・樋渡⁷⁾の既往研究を基に以下の関数形を用いた．

$$p(M) = p_0 10^{-b(M-M_0)} \quad (2)$$

ここで、 $p(M)$ は50年間におけるマグニチュード M の地震の発生頻度を表す．本研究で対象とする相模トラフ沿いの海溝型地震の再現期間は、地震本部の長期評価によるとM7クラスの地震では27.5年、大正関東地震（M8.0程度）では200年～500年、元禄関東地震（M8.2以上）では2,300年程度としている⁸⁾．そのため、本研究では上記におけるM7.0の再現期間と一致するようにパラメータを調整し、 $p_0 = 0.42$ 、 $M_0 = 8$ 、 $b = 1$ を標準設定とした．また、 $M > 8$ の範囲では地震の発生頻度が小さくなる傾向にあること⁷⁾を考慮し、M8.0とM8.5の地震では $b = 1.48$ とした．算出した $p(M)$ の値と、対応する再現期間を表-1に示す．

b) 操船限界流速の超過確率の算出

上記の仮定の下、全津波イベントに関して操船限界流速1 m/s（約2 ノット）を超える津波流速の発生確率を求める．各地震の発生確率 P_i を式(3)、ある地点 $Z(x, y)$ での操船限界流速を超える津波流速の発生の有無を表す変数を $I_{i,xy}$ とし式(4)のように定義すると、全津波イベントを通じて操船限界流速以上になる津波流速が発生する確率は式(5)のように表すことができる．

$$\sum_{i=1}^N P_i = 1 \quad (3)$$

$$I_{i,xy} = \begin{cases} 0 & (\text{if } V_z < 1 \text{ m/s}) \\ 1 & (\text{if } V_z \geq 1 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (4)$$

$$R_z = \sum_{i=1}^N P_i I_{i,xy} \quad (5)$$

ここで、 P_i は式(2)により求めた各地震の発生頻度 $p(M)$ を正規化した確率密度で表現している．

結果として得られた操船限界流速の超過確率分布は図-5ようになる．これによると浦賀水道の一部では発生確率が高めになっているものの、多くの部分で低い発生確率になっている．他方で、浅瀬が広がる富津岬付近と木更津港付近に関しては広範囲で高い確率を示しており、

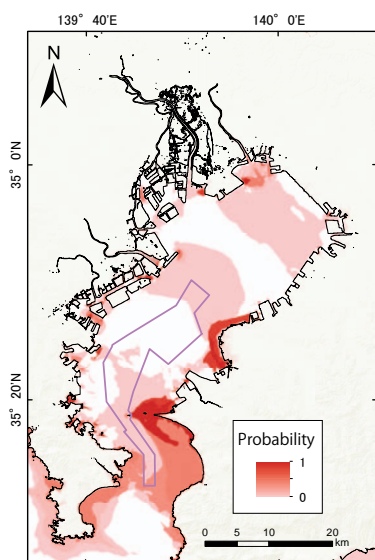


図-5 操船限界流速 (1m/s) の超過確率分布

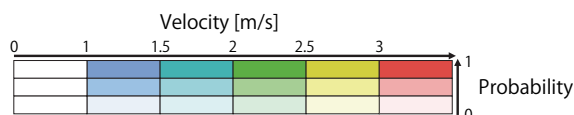


図-6 船舶避難リスクマップで使用するカラーマップ

また入り組んだ港湾部や大きく凹凸ある海岸線を持つ海域でも比較的に確率が高いといった特徴を見ることができる。

(3) 船舶避難リスクマップと推奨避難海域の抽出

津波の最大流速分布と操船限界流速の超過確率分布を組み合わせることで、船舶避難リスクマップを作成する。ハザードの大きさと発生確率を同一のマップ上で把握する手法として、多田⁹⁾はハザードの大きさを色合いで、確率の大きさを濃さ・明るさで表現するカラーマップを利用することにより、外力リスクの空間分布を評価する手法を提案している。本研究では多田の手法に倣い、津波流速の大きさとしてjet (青・緑・黄・赤) のカラーマップを基本とし、発生確率が大きくなると色が濃くなるような割り当てにした。具体的には図-6に示す通りであり、操船限界流速1 m/s未満は白、被害が発生する可能性が出てくる1 m/s以上を青とし0.5 m/s毎に色を変化させ、3 m/s以上は赤に統一する。そして、確率の大きさに対応して3段階の濃淡で設定した。

また、船舶の避難海域を定める際には同時に砕波の影響も考慮する必要がある。砕波条件には相対波高 (= 波高 / 水深) が用いられることが多く、緩勾配の海域であれば0.83程度、砕波段波を維持するためには水平床上で0.61~0.64以上とされている¹⁰⁾。本研究では、全津波イベントを合算した津波の最高水位と水深から相対波高を算出し、0.61 (砕波段波) の等値線を示すことにした。

以上の条件に従い作成した船舶避難リスクマップを

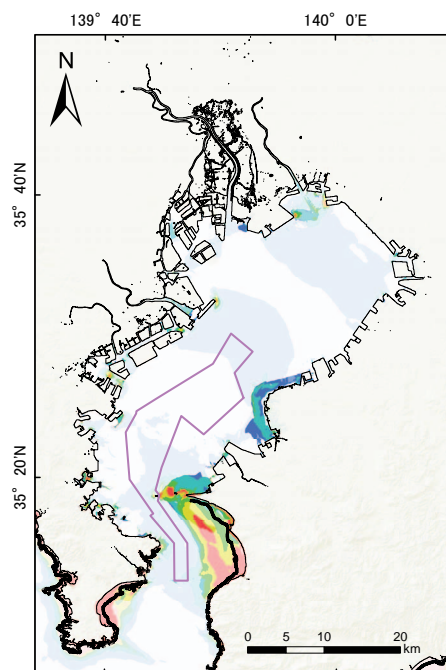


図-7 東京湾全域の船舶避難リスクマップと東京湾中央航路 (紫線内)。図中の黒太実線は相対波高 0.61 の等値線を示し、カラーマップは図-6に従う。

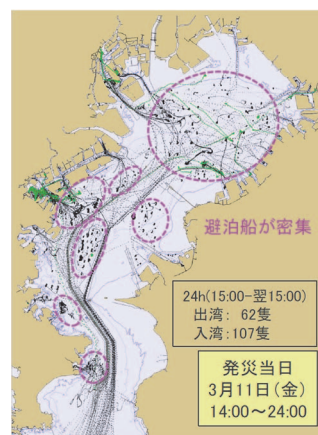


図-8 2011年東北津波来襲時の東京湾内での錨泊実態 (安部らより引用¹²⁾)。

図-7に示す。流速の大きさのみを情報として持つ図-4と比較すると、図-7は流速が同じ大きさであっても発生確率の濃淡によって津波リスクの特に高い海域が強調されることになる。また、砕波発生のある海域としては、三浦半島、富津岬や木更津付近、江戸川河口付近の水深10 m以浅 (水深分布は図-4参照) と限定的である。

同図を基に、避難海域を抽出することを試みる。まず、砕波の影響が小さい水深10 m以深の海域で、津波流速が1 m/s未満となる白い領域が挙げられるが、地震発生時の船舶の位置によっては避航が難しいこともあるかもしれない。その場合、青色であっても発生確率の低い淡い海域を次の候補とするなど、可能な限り操船不能となるリスクの低い海域を選択する。ここでは津波流速1.5 m/sか

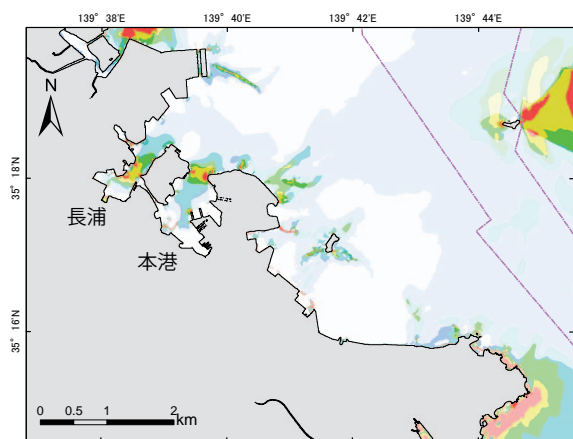


図-9 横須賀港の船舶避難リスクマップ（10 m 格子領域）。カラーマップは図-6に従う。

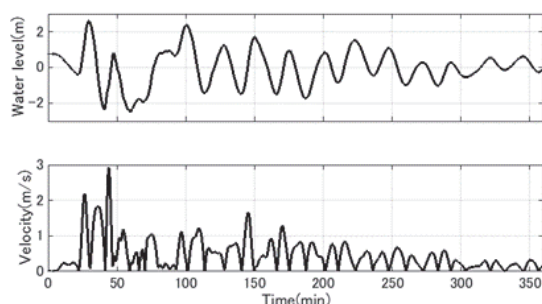


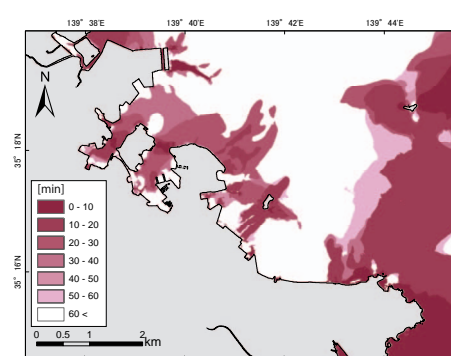
図-10 横須賀港・長浦地区内の津波水位と流速の時間波形（元禄型関東地震 M8.5）。

つ最も低確率の海域までを候補として許容すると、東京湾中央航路の全域、浦賀水道の西側および東京湾内湾の奥を推奨避難海域として抽出することができる。

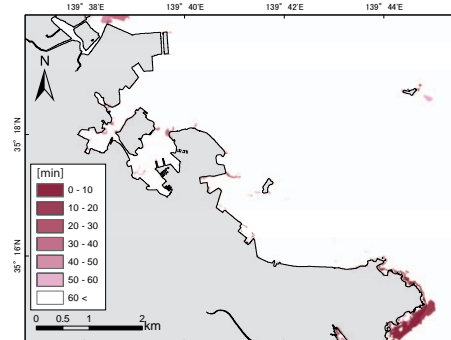
2011年東北津波の際、東京湾に停泊・航行中の船舶は湾内での避難のため錨泊を行っていたことが報告されている¹¹⁾。図-8は錨泊状態をAISデータにより解析した結果である。特に避泊船が密集した海域は提案手法で抽出した推奨避難海域と良く整合しており、その妥当性が確認できたと考える。一方で、横須賀港などの比較的津波リスクの高い海域でも避泊線が密集していた実態もあることから、本手法から得られる情報を基にリスクの高い危険な海域を事前に明示することで、津波による船舶被害を軽減するための効果的な対策が期待できる。

4. 横須賀港での船舶避難の可能性

3.の結果から、港湾部で津波リスクが高い傾向にあることが示された。津波発生時、港湾や漁港に停泊する船舶が推奨避難海域へ移動する必要があることを鑑みると、空間的な津波リスクと同時に津波の来襲時間についても詳細に調べることが必要である²⁾。ここでは、自動車運搬船や海上自衛隊の艦船等の大型船舶が多数停泊する横須賀港の長浦・本港地区を対象として空間解像度10 mの津波数値計算を行った。得られた津波リスクと操船限界



(a) 1 m/s の場合



(b) 3 m/s の場合

図-11 横須賀港における津波流速の最短出現時間

流速が発生する時刻から、船舶の避難可否の判断と取りうる対策について考察する。

まず、3.と同様の手順により作成した横須賀港の船舶避難リスクマップを図-9に示す。ここでは相模湾側で発生するM7クラスの津波イベントについても評価するため、2.(2)で示した全5ケースを震源モデルとして採用した。図から、同地域では長浦・本港の両湾の狭窄部で強い流れが高い確率で生じることがわかる。この結果から、長浦・本港地区に停泊している船舶は、津波来襲時には被災リスクの高い海域を通過せざるを得ない状況にあるといえる。ただし、長浦地区内での津波水位・流速の時間変化（図-10）を見ると、M8.5の場合第1波が最高水位となるのは地震発生から約30分後であり、その前後の流速は2 m/s、また最大の流速3 m/sに達するのは約50分後と時間にはある程度の余裕がある。そのため、速力が十分にある船舶は避航が可能であることも考えられる。そこで、20ノット（約37 km/h）未満と30ノット（約55.5 km/h）の性能を有する船舶について、斜め流れに対する保針限界の評価式（日本海難防止協会¹²⁾）から操船限界流速を算出するとそれぞれ1 m/s、3 m/sとなるため、これらが全津波イベントに対して最短で出現する時間を求めた。

結果を図-11に示す。閾値を1 m/sとした場合（図-11(a)）、長浦・本港地区の狭窄部では地震発生から10分以内に出現するため、速力20ノット未満の船舶は避難海域への移動が難しい。よって、係留索を強化する等の被害を最小限に食い止める対策が必要となる。一方、3 m/sの

場合は地震発生後約30～40分後に出現するものの、狭窄部の陸域付近のみと発生域は限定される（図-11 (b)）。よって、速力30ノットの船舶は狭窄部中央を航行することで、避難海域へ到達できる可能性が高い。このように津波リスクと船舶の性能等を比較することで避難可否の可能性を知ることができ、対策を検討することで津波災害時の減災につなげることが期待できる。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 複数の津波イベントの最大流速と操船限界流速の超過確率を同時に考慮した船舶避難リスクマップを提案した。これにより従来の津波避難海域の設定手法では考慮されなかった潜在的に危険な海域の評価が可能になる。
- (2) 提案した手法を東京湾全域に適用し、南関東近傍で想定される津波に対する船舶の推奨避難海域を示した。本研究で仮定した条件の範囲内では、東京湾中央航路の全域、浦賀水道の西側および東京湾内湾の奥を抽出することができ、2011年東北津波時の船舶避難の実態からその妥当性を確認した。
- (3) 横須賀港を対象とした検討から、港湾の狭窄部では特に津波リスクが高いことが明らかとなった。また船舶の規格・性能毎に停泊位置から避難海域への移動の可否を検証し、速力30ノットであれば狭窄部中央を航行することで避難海域へ到達できる可能性が高いこと、また、速力20ノット未満は移動が困難であり、係留索を強化する等の被害軽減のための対策が必要である。

今後の課題として、引き波による座礁の発生や津波渦の発生・規模の推定⁴⁾、津波継続時間等の諸現象についてリスク評価手法の構築が必要である。

謝辞：本研究のデータ整理等において、当時防衛大学校システム工学群建設環境工学科の学生であった高橋拓也君の協力にここで謝意を表す。

参考文献

- 1) 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検討, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1356-1360, 2006.
- 2) 大橋太郎, 越村俊一, 今村文彦: 津波来襲時の海上ハザードマップ作成要件の検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1351-1355, 2007.
- 3) Lynett, P. J., Borrero, J., Son, S., Wilson, R., and Miller, K.: Assessment of the tsunami-induced current hazard, *Geophysical Research Letters*, Vol.41, pp.2048-2055, doi:10.1002/2013GL058680, 2014.
- 4) Hayashi, M., Nakada, S., Abe, T., and Kobayashi, E., Influence of Eddy to the Vessel Evacuation from Tsunami, The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE-I-16-226, 2016.
- 5) 国土交通省海事局: 船舶運航事業者における津波避難マニュアル作成の手引き, 津波発生時の船舶避難体制の改善に向けた検討会, 2014
- 6) 神奈川県: 津波浸水想定について, <http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f532320/>, 参照 2017-04-20.
- 7) 藤間功司, 樋渡康子: 津波防災施設の最適規模と残余リスクを明示する手法の提案, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69, No.4, I_345-I_357, 2013.
- 8) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 相模トラフ沿いの地震活動の長期評価(第二版), http://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/subduction_fault/, 参照 2017-04-20.
- 9) 多田毅: 浸水確率の空間分布を考慮した浸水リスクマップの提案, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, I_1339-I_1344, 2016.
- 10) 松富英夫: 移動跳水(波状段波)発生条件の検討, 第33回水理講演会論文集, pp.271-276, 1989.
- 11) 安部智久, 野口孝俊, 内藤裕之, 谷本剛, 高橋宏直: 東京湾における津波来襲時での避難海域規模推計に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.782, 2014.
- 12) 日本海難防止協会: 平成 15 年度津波が予想される場合の船舶の安全確保に関する調査報告書, p.96, 2003. (2017.3.15 受付)

PROPOSAL OF TSUNAMI RISK MAP FOR VESSEL EVACUATION AND APPLICATION TO TOKYO BAY

Yoshinori SHIGIHARA, Takanori KITA, Tsuyoshi TADA and Hiroshi YAGI

A new type of tsunami risk map so that vessels evacuate to the safe area during tsunami warning was proposed. The method can evaluate risky sea area that was not considered by the conventional methods. Several tsunami simulations are conducted for several earthquakes, then the tsunami risk map is obtained by the combination of the maximum tsunami velocity map and the probability map that exceed the velocity to enable the steering of vessels from the results of all tsunami events. We created the tsunami risk map of entire area of the Tokyo Bay using the proposed method, and found the higher-risk area: the port or harbor inner of the Tokyo Bay. The vessels that are anchored in the port of Yokosuka were verified if they move to the safety zone in an incoming tsunami, the result indicated that several types of vessel required the countermeasures to reduce tsunami damages.