

港湾物流機能維持のための 海域津波ハザードマップ開発に関する研究

A STUDY ON DEVELOPMENT OF MARINE TSUNAMI HAZARD MAP FOR CONTINUITY OF LOGISTIC FUNCTION IN PORT

増田光一¹・居駒知樹²・小泉佐和子³・増田光弘⁴
Koichi MASUDA, Tomoki IKOMA, Sawako KOIZUMI and Mitsuhiro MASUDA

¹正会員 工学博士 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

²博士 (工学) 日本大学准教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

³日本大学大学院理工学研究科洋建築工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

⁴正会員 博士 (工学) 東京海洋大学助教 (〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)

Most of the current tsunami hazard map is a forecast map of area washed by tsunami and it is said that this map is useful for rousing a sense of crisis of the resident. However, the hazard map that publishes information on the sea area of damage by the drifting ship and the wreckage is extremely few and the maintenance of the marine hazard map is not advanced. There is no research of developing the marine tsunami hazard map from the viewpoint of the continuity of logistic function in port. The objective of the present study is the development of the marine hazard map that can be supplied to continuity of logistic function in port at time of attack by tsunami and the case with the marine tsunami hazard map developed for Shimizu port is shown in the present paper.

In the case study, the present marine tsunami hazard map was made for the port authority and an navigator of the ship. The present hazard map aimed at situation change in harbors at time of attack by tsunami and information on the ship behavior and the danger of drifting container were shown in the map.

Key Words : *Tsunami, marine hazard map, simulation, logistic function, continuity*

1. 緒言

近年、産業形態の変化から産業防災計画の必要性が高まっている。産業防災計画における災害時の産業活動の維持と早期復旧に関するボトルネックとして、港湾物流機能が挙げられている。物流機能の停止はサプライチェーンの中で生産活動を行う企業にとって材料の調達が困難になる、製品の出荷ができないといった企業全体への影響が甚大である。宮本ら³⁾は、地震災害時の港湾の国際物流サービス維持に関する対策と検討を行い、災害時の物流サービスの停止の影響について述べている。

日本は自然災害のリスクを多く抱えており、また地震多発国であることから、これまで繰り返しその被害を受けてきた。1995年に発生した阪神・淡路大震災の際、産業界は工場の倒壊による被害を受けたほか、神戸港では岸壁の崩壊や、コンテナの海上流出により港湾機能が停止した。

現在、東海・東南海・南海地震の発生が懸念されている。これらの地震は震源が海域にある為、地震

発生時にはそれに伴う津波の来襲も想定される。さらに、津波が港湾内に侵入し船舶の航行や荷役施設へ影響を及ぼした場合、港湾物流機能の維持に重大な支障が発生する為、平常時から津波に対する心構えを持ち対策を行うことが被害軽減において重要である。事前対策であるハザードマップは、災害時の状況を把握する為に有効なツールの一つである。しかし、現在港湾物流機能の維持に着目したハザードマップの開発は行われていない。

そこで、本研究では津波来襲時の港湾物流機能の維持とそれに対する対策を検討するため、清水港をケーススタディに操船者と港湾管理者を対象とした海域津波ハザードマップの開発を目的とする。

2. 港湾物流機能維持

港湾物流機能における重要項目を挙げ、過去の被害事例を基に災害時の港湾物流機能の維持に関するボトルネックの点検を行った。

(1) 港湾物流機能

港湾物流機能は岸壁を境にして、陸側の港湾施設と海側の航路といった陸海の一連の機能により成り立っている。コンテナターミナル内に蔵置されたコンテナは、ガントリークレーンによりコンテナ船に積み込まれ、海上を航行し輸送される。よって、港湾物流機能を維持する為には、陸側のコンテナターミナルの正常な稼働、海側は船舶の航行が可能な航路の確保が重要である。

(2) ボトルネック点検結果

阪神・淡路大震災の際に、神戸港の物流機能が停止した要因に、地震による岸壁の崩壊や荷役機械が倒壊したことが挙げられる。さらに傾いた岸壁からコンテナ等が流出し航路を閉塞したため船舶の航行が不可能になったことも大きな要因である。また、漂流物の回収には特殊な作業船が必要であるため、バースを再開するために約三ヶ月の時間を要した。

現在全国の港湾において耐震強化岸壁の整備が進んでいる。しかし、岸壁が崩壊しなくとも津波による被害が懸念される。遡上津波により埠頭が浸水した場合、蔵置されたコンテナが海上へ流出する可能性が高い。また、津波は岸壁に係留された船舶の係留索を破断し、さらには流出といった被害も考えられる。これらが漂流物となり航路へ侵入した場合、船舶の航行に影響を及ぼし、港湾物流機能が停止する可能性が高い。これらのことから、本研究では港湾物流機能維持のボトルネックは航路の閉塞とする。

3. ハザードマップ

(1) これまでの津波ハザードマップ

津波被害に対するソフト対策の一つである津波ハザードマップは全国の市町村において整備が進んでいる。特に地震とそれに伴う津波の被害が懸念される太平洋沿岸域で作成が進んでおり、その内容は陸域の浸水予想域を掲載した津波浸水予測図が主たるものである。これらは、シミュレーション結果を示す位置づけにあり、マップを作成しても対象者である住民へ意図が伝わらない、理解が困難といった問題が起き、危険意識への働きかけには適さない場合があると考えられる。また、船舶被害や漂流物による被害といった海域の情報を掲載したハザードマップは極めて少なく、整備が進んでいないという現状もある。

既存の研究として、鈴木ら²⁾による海域津波ハザードマップの開発がある。ここで作成されたハザードマップは、津波伝播シミュレーションや船舶応答シミュレーション、コンテナ漂流シミュレーションを行った結果から可視化動画を作成し、船舶航行に関する危険海域を示している。これにより、津波来襲時の海域の状況が明らかになった。

しかし、これまでに港湾物流機能維持の観点から

津波ハザードマップの開発を行った例はない。

(2) 港湾物流機能維持の為の海域津波ハザードマップ

港湾物流機能維持の観点から、船舶の安全な航行のために航路の確保が重要である。そこで、航路閉塞の要因となる事象をハザードとして扱う。既存の研究から、ハザードとして、遡上津波による海上へのコンテナの流出、また津波による係留船舶の係留索の破断の項目を挙げる。これは、コンテナや船舶が漂流物となり航路に侵入した場合、船舶の航行に影響を及ぼすためである。ハザードとなる事象を取り除くためには、コンテナの流出と係留船舶の係留索の破断を防ぐための事前対策を行う必要がある。そこで、これらを取り扱う港湾管理者と操船者に対策を促すことが重要であると考えた。しかし、人間はイメージできない状況に対する適切な心がけや準備などは絶対にできない¹⁾ことから、想定される被害状況を把握していない者が事前の対策を行うことはできない。したがって、本研究は津波来襲時の港湾内の状況把握に主眼を置き、港湾管理者と操船者を対象とした海域津波ハザードマップの作成を行う。

4. 清水港

ケーススタディとして清水港を対象に海域津波ハザードマップの作成を行う。ボトルネックである航路閉塞の要因となるハザードについて検討を行う。

(1) 清水港概要

静岡県中部、駿河湾の西側に位置する清水港は、国際海上輸送網の拠点として特定重要港湾に指定されている。取扱貨物の上位 2 品目の輸入は LNG、金属鉱輸出であり、輸出は自動車部品、二輪自動車である。清水港の北側は、コンテナ貨物取扱地区である。新興津埠頭はスーパーガントリークレーンが設置された大規模なコンテナターミナルとして稼働し、袖師第一埠頭も 5 機のガントリークレーンが設置されたコンテナターミナルである。

Google Earth より取得した清水港北側の航空写真上に 15,000DWT 以上の係船能力の岸壁とそれを有する埠頭の情報を示した (図-1)。

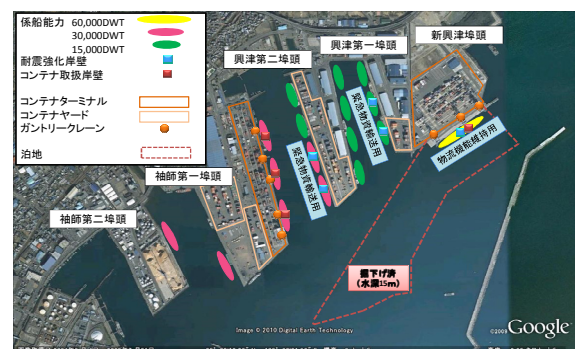


図-1 清水港 詳細図

新興津埠頭、興津第一埠頭、興津第二埠頭は耐震強化岸壁を有し、災害時にも操業可能である幹線輸送の核とされている。また、新興津埠頭の前面は水深15mに掘り下げられた泊地であり、大型の船舶が航行する際の実質的な航路として用いられている。

(2) 清水港のハザード検討結果

港湾物流機能のボトルネックは航路の閉塞である。清水港においてこれの要因となる事象をピックアップし、ハザードとする。まず、コンテナ等の陸域からの流出物による航路閉塞の可能性である。図-1に示している通り、清水港は岸壁の耐震化が進み、耐震強化岸壁が整備されている。特に新興津埠頭の新興津一号岸壁は、物流機能維持用の耐震強化岸壁であり、災害時にも利用が可能である。よって、これら岸壁の破損による漂流物の可能性は低く、ハザードに該当しないと考えた。しかし、岸壁が破損しなくとも、遡上津波により陸域の港湾施設が浸水した場合、コンテナ等が海上へ流出する可能性がある。静岡市防災ハザードマップによれば、東海地震による推定津波浸水域では清水港全域が0～2m以上の浸水深を示しており、埠頭に蔵置されたコンテナの海上への流出が考えられる。流出すれば津波により漂流することが想定されることから、海上へ流出したコンテナの漂流をハザードとする。また、係留船舶の係留索の破断に伴う漂流による航路閉塞であるが、既存の研究でその可能性が指摘されている。清水港は大型の船舶が多く入港することから、一隻でも航路へ侵入した場合の影響は大きい。よって、係留船舶の係留索の破断もハザードの対象とする。これより、今回清水港におけるケーススタディでは、海上へ流出したコンテナの漂流、係留船舶の係留索の破断の2事象をハザードとした。

5. 数値シミュレーション及び結果

津波来襲時の港湾内の状況を把握する為に、数値シミュレーション結果を用いる。まず、津波伝播シミュレーションにより時々刻々の水面変位と流速を求め、その結果を用いて船舶応答シミュレーション、コンテナ漂流シミュレーションを行い、ハザードである係留索の破断の有無と船舶挙動、航路へのコンテナの侵入について把握した。

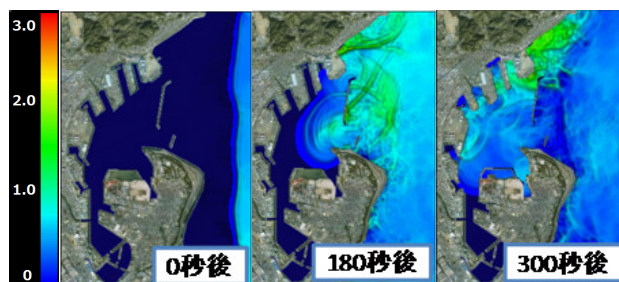


図-2 津波伝播シミュレーション結果

(1) 津波伝播シミュレーション結果

東海・東南海・南海地震が同時発生した場合を想定し、津波伝播シミュレーションを行った。清水港内の結果のスナップショットを図-2に示す。水面変位をコンターで表している。発生から60秒で津波の第一波が港湾の入口に到着し、180秒後に北側の埠頭付近に、300秒後には港湾内全域に侵入することがわかる。また、埠頭付近の最大波高は3～4m、最大流速は2～3m/s程度である。

(2) 船舶応答シミュレーション及び結果

a) 船舶運動応答シミュレーション

津波による船体運動は、津波の周期が長い為、上下揺れは、ほぼ波と一緒に応答すると考え、水平面内の応答すなわち左右揺れと前後揺れが卓越すると仮定し個別要素法を基に運動方程式を構成した。個別要素法(以後DEMと記す)による平面2次元領域の解析では要素を球体として取り扱うことにし、港湾内全域というマクロ的な解析を行う本研究においても船舶モデルを球体要素によって構成した。

b) 船舶のモデル化

平面2次元における船舶モデルの運動応答は合計3自由度であるが、本研究では船舶を球体として取り扱っているため見かけ上の回転運動を考慮することが出来ない。そこで本研究では船舶の見かけ上の回転運動を表現するために船舶を5つの要素で構成される連続体としてモデル化する。連続体の計算方法としては初めに要素群ではなく個々の要素を独立した要素として運動変位を算定する。この時点では要素群としての相対的な位置関係は変化してしまっているが、各要素の位置関係の変化は微小であると仮定する。次に要素群の位置を補正し、連続体の形状を再構成する。連続体の重心のX, Y方向の運動速度 u_g, v_g については(1)式を用いて各要素の運動量 F_{pi} の和から求める。

また、連続体を構成する軸角度に関しては算定した重心周りの各要素のモーメント M 及び慣性モーメント I を用いて(2)式より算定される角速度より求めるものとする。以上の操作を行なうことにより個々の要素の運動量、角運動量を保存した状態で連続体としての運動計算をすることが可能である。

$$\begin{cases} \sum m_{pi} \alpha_{xg} = \sum m_{pi} \cdot \frac{u_g^{t+\Delta t} - u_g^t}{dt} = \sum F_{xpi} \\ \sum m_{pi} \alpha_{yg} = \sum m_{pi} \cdot \frac{v_g^{t+\Delta t} - v_g^t}{dt} = \sum F_{ypi} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 m_p ：質量、 α_g ：加速度

$$I \cdot \frac{d\omega}{dt} = I \cdot \frac{\omega_g^{t+\Delta t} - \omega_g^t}{dt} = \sum M_{pi} \quad (2)$$

また、船舶のモデル化を行う際の連続体を計算する概念図を示す（図-3）。

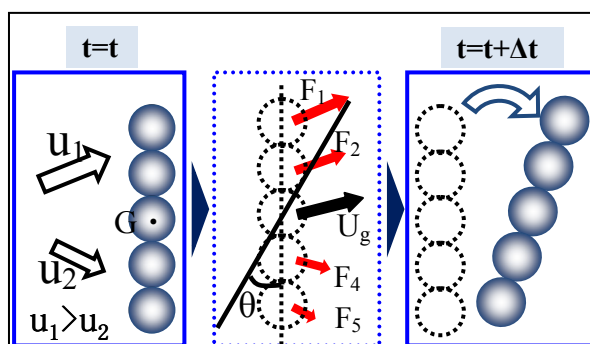


図-3 DEM 計算 概念図

c) 係留条件

岸壁に係留された船舶を表現するために(3)式により表される線形ばねを導入している。線形ばねは係留索張力 F_s 、ばね定数 k 及びばねの伸び δ で表される。ばねの伸びの算定には要素と係留点の水平距離だけでなく船舶が海面変動と同等の上下動をすることを考慮して海面変位 η を与えている。係留索が破断した状況を再現するために索張力が想定する係留索の破断荷重を超えた時刻以降は係留索が破断したと定義し、船舶モデルの運動計算に作用しないものとしている。

$$F_s = k\delta = k \cdot \sqrt{x_m^2 + y_m^2 + \eta^2} \quad (3)$$

d) 船体応答シミュレーション結果

コンテナ輸送の中心である、新興津埠頭、興津第一埠頭、興津第二埠頭、袖師第一埠頭において船舶応答シミュレーションを行った。

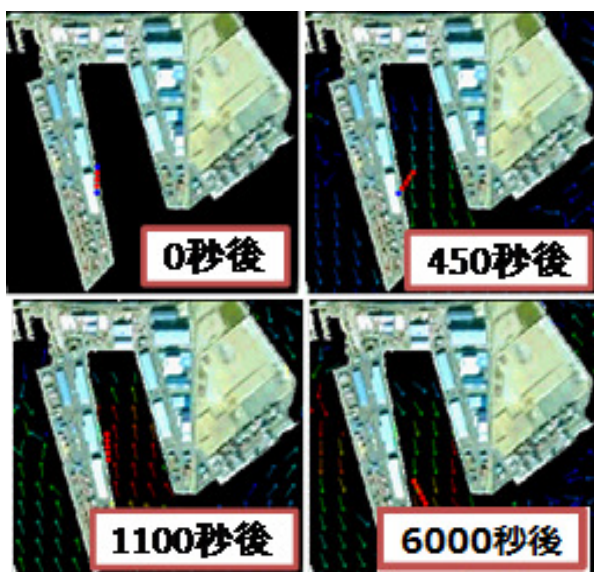


図-4 船舶挙動シミュレーション結果

岸壁の係船能力に応じて係留した状態の船舶を想定した。係留索はナイロンエイトロープを用い索径

ごとに破断荷重を設定し、ばね定数に係留索の伸びを乗じ求めた索張力がそれを超えた場合、破断したと判断した。図-4 に興津第二埠頭に係留された40,000DWT 級の貨物船のシミュレーション結果をスナップショットで示した。赤と青の球体の連帯が船舶を模擬したものであり、青が係留された状態、赤が係留されていない状態を表している。津波発生から約 540 秒後に後方の係留索が破断し、約 1080 秒後には前方の係留索も破断し、後に漂流する様子が確認できる。津波による水位変動と流速により船舶が動揺し、係留索に強い張力が生じたことから、係留索の破断に至った。

(3) コンテナ漂流シミュレーション結果

海上にコンテナが 16 個流出した状態を想定しシミュレーションを行った。ISO 規格の 40 フィート・アルミコンテナの貨物を満載にした状態を条件として与えた。航路へのコンテナの侵入がハザードであることから、漂流し航路へ侵入した個数をカウントした。またコンテナの初期配置により侵入個数が異なることから、10 ケースの配置パターンを用いそれぞれシミュレーションを行った。

シミュレーション結果の一つのスナップショットを図-5 に示した。黄色い球体がコンテナを表しており、港湾内を漂流し破線で示した航路内へ侵入することがわかる。また、10 ケースの結果から航路へのコンテナの侵入個数をカウントした結果を表-1 に示した。8 ケースの配置パターンで航路への侵入が確認された。漂流中に船舶と衝突する可能性もあり、流出したコンテナが漂流を始めた時点で危険度は高いと言える。

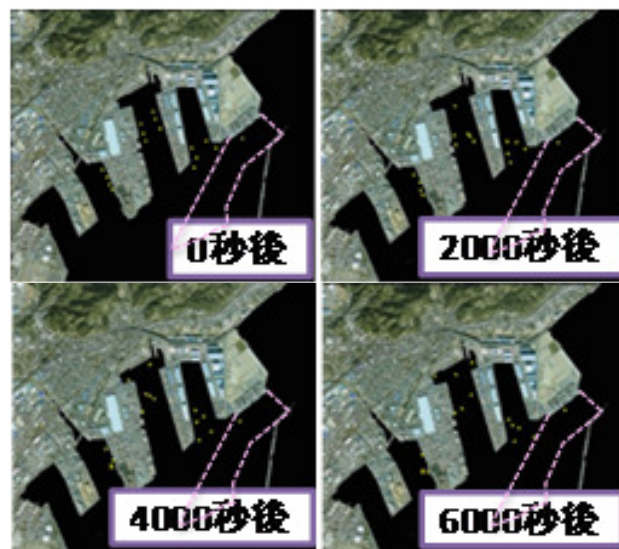


図-5 コンテナ漂流シミュレーション結果

表-1 コンテナ漂流数

| 配置パターン | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---------|
| コンテナ侵入個数 | 1 | 2 | 4 | 0 | 1 | 0 | 1 | 3 | 2 | 1 | 平均 1.5個 |

6. 海域津波ハザードマップ掲載項目

数値シミュレーションの結果を用いて、海域津波ハザードマップを作成する。時々刻々の港湾内の状況把握に主眼を置き作成するため、横軸を時間軸とし縦軸をそれぞれ事象ごとのハザードとし、状況変化を時系列的に示した。作成したハザードマップの範囲・条件、各事象について以下で説明する。

(1) ハザードマップ範囲

清水港全体図を示し、その中にハザードマップ内で扱う範囲を示した。青枠で津波伝播シミュレーション結果による海象を示した範囲を、赤枠で船舶応答シミュレーション結果による船舶挙動を示した範囲を、またオレンジの点で時系列的に水位変動グラフを示す地点を示した。

(2) 水位変動・津波伝播

埠頭付近の海上の水位変動をグラフで示し、青い点で第一波到着時と最大波高時をプロットし、その水位を表示した。さらに、港湾内を津波が伝播する様子を視覚的に掴めるよう、対象埠頭前面の海象のスナップショットを時系列的に並べた。

(3) 船舶条件

船舶応答シミュレーションで用いた船舶の条件を示した。岸壁ごとに係留できる船舶の種類とサイズは異なる為、その船種とサイズを示した。

(4) 船舶挙動

黄色いアイコンで船舶を表した。係留状態を青い丸、係留索が破断した状態を赤い罰で表している。ハザードである船舶の挙動と係留索の破断の有無について、船舶応答シミュレーション結果により示した。係留索破断時、最大流速時、漂流時等の様子とその時の流速をベクトルと数値で示した。時刻については水位変動のグラフ上に赤い点でプロットした。

(5) 漂流コンテナ

コンテナが埠頭から海上へ流出し、船舶と衝突する可能性、漂流したコンテナが航路へ侵入する危険性についてその情報を記した。

7. 海域津波ハザードマップ作成

清水港北側の埠頭ごとにハザードマップを作成した。埠頭の位置と係留された船舶の条件により被害状況が異なることが明らかになったため、以下にそれぞれ考察を行う。

(1) 新興津埠頭

物流機能維持用の耐震強化岸壁に、4,300～4,700TEU コンテナ船が係留された状態を想定した。

津波来襲後まもなくして後方の係留索が破断し、後に船舶が回転した。埠頭付近の最大水位が 3.01m、船舶にかかる最大流速は 1.80m/s であった。コンテナターミナルとして機能する埠頭であるため、遡上津波により蔵置されたコンテナが流出した場合、船舶との衝突、また埠頭前面の航路へ漂流コンテナが侵入する可能性が高い。

(2) 興津第一埠頭

緊急物資輸送用の耐震強化岸壁に係留した 12,000DWT 級の貨物船は、係留索が前後ともに破断し港湾内を漂流した。埠頭付近で 3.91m の最大水位、さらに船舶にかかる最大流速は 2.79m/s と他の埠頭よりも強い波を受けている。漂流する船舶とコンテナが衝突した場合、船舶の航行に重体な影響を与えると考えられる。(図-6)

(3) 興津第二埠頭

他の埠頭に比べ、小さな流速で 40,000DWT 級の貨物船の係留索が前後ともに破断した。これは瞬間的な流速だけでなく、水位変動と引き波と押し波による流速の蓄積による索張力の増大によるものと考えられる。コンテナが海上へ流出した場合、漂流船舶と衝突する危険性が高い。(図-7)

8. 結言

津波来襲時の港湾物流機能の維持とそれに対する対策を検討するために、清水港をケーススタディとして海域津波ハザードマップの開発を行った。港湾物流機能を維持する為にはコンテナターミナルの正常な稼働と船舶の航行が可能な航路の確保が重要であることが明らかになった。津波来襲時のボトルネックは航路の閉塞であり、ハザードはコンテナの海上流出と係留船舶の係留索の破断とした。ケーススタディでは、港湾管理者と操船者を対象にハザードマップを作成した。津波来襲時の港湾内の状況把握に主眼を置き、時々刻々と変化する海象と船舶挙動の情報、コンテナ漂流の危険性を示した。これより対象者らに想定される被害を知らせ、事前対策を促すことができる。

しかし、上記で挙げたハザードの他に漂流物が海底に沈み航路が閉鎖される。津波による防波堤、岸壁の倒壊といった物流機能停止の原因が考えられる。そのため、その他にどのような情報が必要なものであるか検討し、表示方法の更なる改良が必要となる。**謝辞:** 本論文を作成するに当たり、協力して頂いた日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻 住澤亮氏に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 目黒公郎, 村尾修: 都市と防災, 財団法人放送大学振興会, 2008

2) 鈴木雄太，増田光一，居駒知樹，大塚文和：港湾内の海域津波ハザードマップ開発に関する研究，日本沿岸域学会研究討論会 2009・講演概要集 No.22, pp107-110, 2009

3) 宮本卓次郎，新井洋一：地震災害に対応した港湾の国際物流サービス維持のための対策の提案—名古屋港における試行的実践と課題，沿岸域学会誌，第22巻第4号，pp93-104, 2010

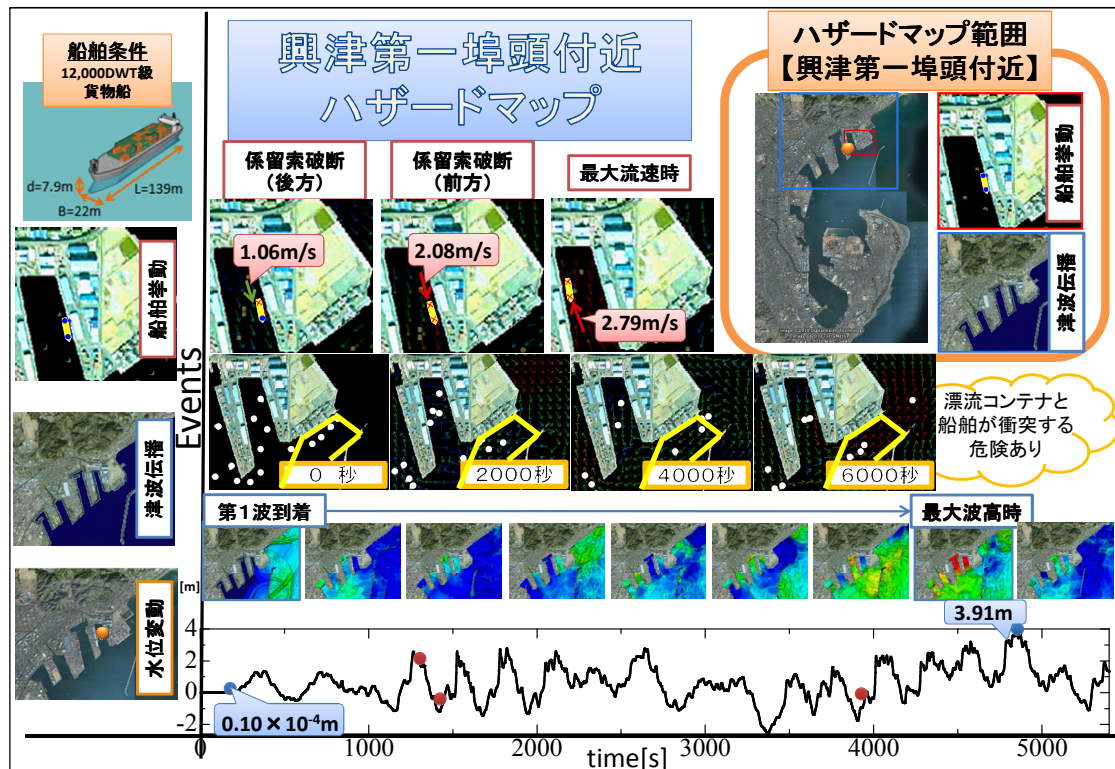


図-6 興津第一埠頭ハザードマップ

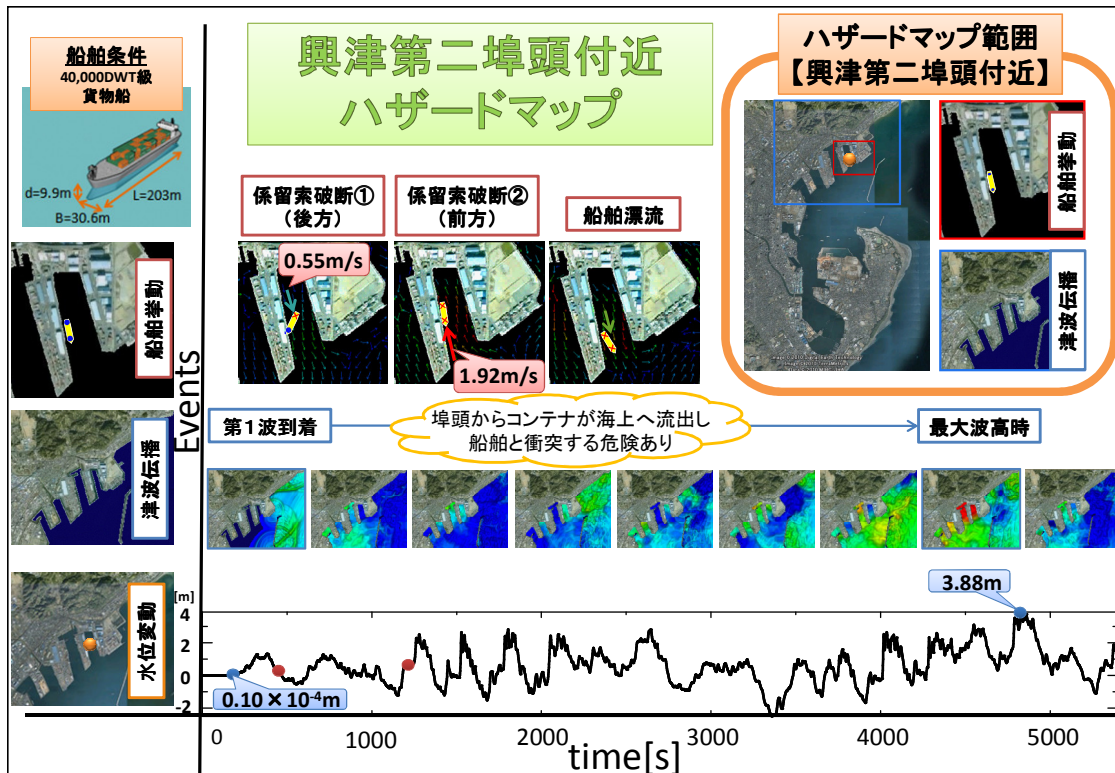


図-7 興津第二埠頭ハザードマップ