

# 津波来襲時の船舶避難に関する一検討

正員 米田 翔太\*<sup>1</sup>      正員 小林 英一\*<sup>2</sup>  
          越村 俊一\*<sup>3</sup>                  南場 昌平\*<sup>4</sup>  
          島之上 雅也\*<sup>5</sup>

A basic study of ship evacuation from tsunami attack

by Shouta Yoneda, *Member*    Eiichi Kobayashi, *Member*  
      Shunichi Koshimura        Shouhei Nanba  
      Masaya Shimanoue

## Summary

It is concerned about the occurrence of huge earthquake on Nankai Trugh off the coast of Shikoku such as Tokai, Tou-Nankai and Nankai earthquake. Tsunami attack by the earthquake will generate not only the raise of sea surface but strong horizontal current in the Osaka bay. There are some manuals for ship evacuation which describe only that ship in harbor should leave the port immediately. Moreover there are so many ships that are navigating and moving. Therefore, it is very important for marine disaster prevention to upgrade the manual of ship evacuation in tsunami attack. We carried out several kinks of preliminary simulation of ship evacuation from tsunami attack in Osaka bay for the purpose of contribution to the improvement of such manuals under the background. The results show that it is difficult for every ship to evacuate to outside of Osaka bay through Tomogashima channel and Akashi straits. But it is possible to evacuate to nearest anchorage zone of each port. The manual will be improved by piling such examinations as evacuation simulation

## 1. 緒 言

本州の南を走る南海トラフ上では過去に繰り返し、大きな海域地震が発生してきた。その地震は、地震そのものによる被害と共に、大きな津波を発生させ、太平洋沿岸地域の広い地域に多くの被害をもたらしてきた。また、近年発生が懸念されている東南海・南海地震の発生確率は30年以内に50～60%という高い確率となっており、地震・津波対策は緊急の課題となっている。

この時、陸上においては、津波が発生すると認識した場合、「速やかに沿岸から高台への避難する」という様な避難マニュアルが多く存在すると思われる。より詳しいものでは、避

難経路が規定され、連絡先などが記載された詳細なものが既に作られていると思われる。

一方、海域については、津波による水平流速と水位変化により、港湾内の入出港または離接岸中の船舶は漂流してバース衝突や底触などの事態が発生する可能性があり<sup>1)2)</sup>、地震による被害をより広める可能性がある。しかし、明確な避難マニュアルは規定されておらず、「港外に速やかに避難する」あるいは「パイロットの指示に従い、沖合に錨泊して津波をやりすごす」といったやや抽象的なもので、具体的な船舶の避難手順が明確に確立されているものはあまり無い。よって、先に示したように津波が港湾に来襲すると認識された場合、出航可能な船舶は直ちに港外へ避難し状況により錨泊するというのが一般的な考え方であると思われる。

このとき、本研究が対象とする大阪湾のような多くの船舶が航行・停泊を行っている海域では、ほぼ同時に多くの船舶が避航行動をとるが、航行水域が限られているため、海上交通が輻輳し円滑に避難できないことも考えられる。また船舶の避難行動が遅れると、港の出口付近や狭水路など、津波による水平流れが強くなる場所で、津波の来襲に遭遇してしまう危険もある。

\*1 今治造船(研究当時 神戸大学大学院自然科学研究科)

\*2 神戸大学大学院海事科学研究科

\*3 東北大学大学院工学研究科

\*4 JFE物流株式会社(研究当時 神戸大学海事科学部)

\*5 東洋信号通信社船舶情報営業部

原稿受理 平成18年9月8日

また、津波来襲中における避航操船に関しては、先の研究<sup>1)2)</sup>において、「積極的な操船」が必要であることが示されている。これは対象が尾鷲湾であったため、地震発生から津波来襲までの時間が20分程度と短く、積極的な操船のみが避難を可能であった。しかし、大阪湾に注目すると、予測されている震源域から遠いため、津波が来襲する前により多くの時間的余裕があると考えられる。

本研究ではこのような背景のもと、来襲までの時間に注目し、南海トラフで発生する地震による津波が多くの船舶が航行・停泊を行っている大阪湾に来襲した場合を想定し、好適な避難水域を検討するため、船舶の避難操船シミュレーションを行い、今後の具体的な船舶避難指針作成に資することとした。

## 2. 大阪湾の実情の把握

避航操船シミュレーションを行うに当たって、大阪湾内にはどれだけの数の船がどのような状態で存在するか、どのような航路を通っているか等の湾内の実状を検討するためにAISの受信データを用い調査を行った。

### 2.1 AISの受信データ

AISとはAutomatic Identification System(自動船舶識別装置)の略で、お互いの船舶が、航海情報として、喫水、積載危険物の種類、目的地、目的地到着時間、動的情報として、緯度・経度、位置精度、時刻、対地針路、対地船速、船首方位、回頭角速度、航海ステータス、静的情報として、MMSI(Maritime Mobile Service Identity=海上移動業務識別)、呼出符号、船名、IMO番号、船体長さ・幅、船舶の種類、アンテナ位置の情報の送受信を行うことで海上交通をより安全とする目的で搭載義務付けられた。海上交通をより安全とする目的だけでなく、針路や速力の正確なデータから、船舶の航行状況の調査にも用いることが出来る。

今回は、一例として2005年3月12日12:00時点でのAISデータから、シミュレーション対象である大阪湾内で航行又は停泊を行っていた船舶を抽出して後述のシミュレーションのための基礎データとして用いた。大阪湾内の船舶は合計30隻で、詳しい情報をTable 1, Table 2に示す。Table 1は船種別の分類で、貨物船、コンテナ船、タンカーがその大半を占めていることが分る。Table 2は場所による分類で、神戸港、大阪港、阪南港などに船舶が存在することが分る。同日の8:30~12:30のAISデータを用いて描いた航跡画をFig.1に示す。

これによれば、予想されていたことではあるが、友ヶ島水道-明石海峡、友ヶ島水道-大阪神戸港、明石海峡-大阪湾・神戸港それぞれの区間を航行する船舶が卓越している。また、

詳細な例としてLNG船「播州丸」の堺泉北港から友ヶ島水道通過までの航跡と、航行速度をFig.2に示す。このような解析により船舶の航行状況が時間的・面的に詳細に分析することが出来る。後述する船舶避難シミュレーションではこのAISデータに基づき、基本条件データの設定を行った。

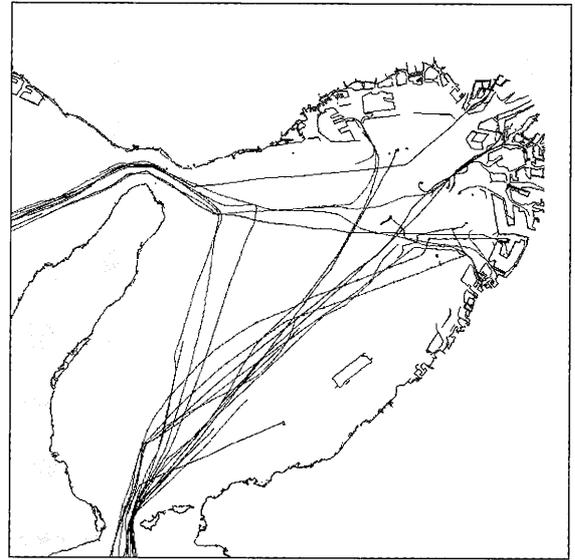


Fig.1 Loci of ship obtained by AIS analysis in Osaka Bay

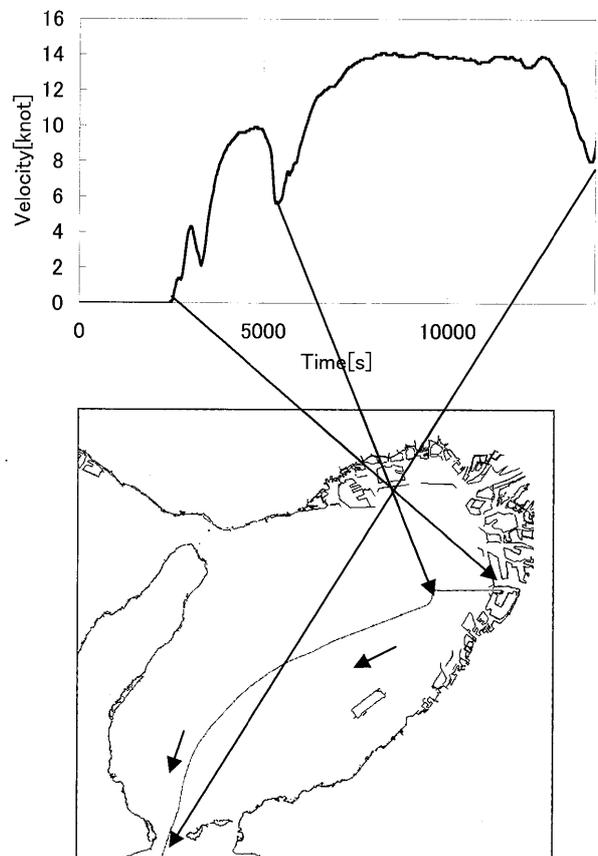


Fig.2 Locus of an LNG obtained by AIS

Table 1 Kind of ship in Osaka bay

Kind of ship	Number of ship
General cargo ship	9
Container ship	7
Chemical/Oil products tanker	6
Chemical tanker	3
Bulk carrier	1
Cement carrier	1
Dredger	1
Refrigerated cargo ship	1
Ro-ro cargo	1
Total	30

Table 2 Position of ship in Osaka bay

Position	Number of ship
Port of Kobe	10
Port of Osaka	7
Port of Sakai-Senboku	3
Port of Hannan	7
Center of Osaka Bay	3
Total	30

### 3. 津波シミュレーション

#### 3.1 対象とした地震と津波

南海トラフ上で発生した地震による津波が大阪湾に来襲した場合の様子を把握するため、津波シミュレーションを実施した。対象とした津波は、中央防災会議想定南海地震の津波波源モデルに基づいた。この断層モデルに基づき後述する津波計算式の初期値を与えた。

#### 3.2 津波の計算

津波挙動は水平方向の流速分布が水深方向に一様とした非線形波理論により、Fig.3 に示す座標系にて、連続の式と運動量保存の式を用いて次のように表すことができる<sup>3)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x_0} + \frac{\partial N}{\partial y_0} &= 0 \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_0} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_0} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x_0} + \frac{\tau_x}{\rho} &= 0 \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_0} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y_0} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y_0} + \frac{\tau_y}{\rho} &= 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで

- $\eta$  : 静水面からの水位上昇
- $x_0, y_0$  : 水平座標
- $\rho$  : 海水密度
- $\tau_x, \tau_y$  :  $x_0, y_0$  方向の海底摩擦
- $M, N$  :  $x_0, y_0$  の流量フラックス
- $t$  : 時間
- $g$  : 重力加速度
- $D$  : 全水深

本論文ではこれを有限差分法にて解いた。

具体的に、格子間隔は Fig.4 に示す(A)1350m、(B)450m、(C)150m、(D)50m の組合せを用い、大阪湾においては 50[m] を採用した。海底摩擦係数の値はマニングの粗度係数に基づき算出を行い、遡上計算は行わずに全反射とし、計算対象時間は地震発生後 5 時間とした。

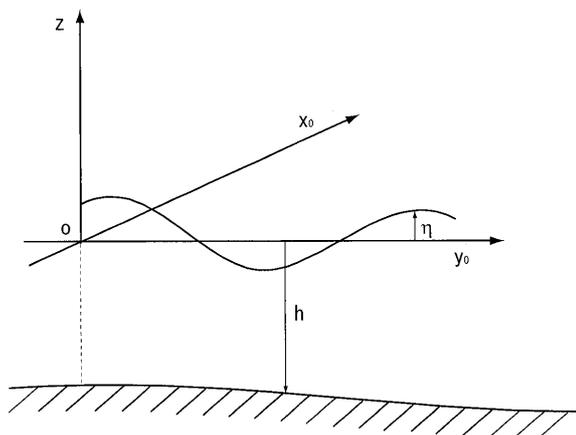


Fig.3 System of coordinates of tsunami calculation.

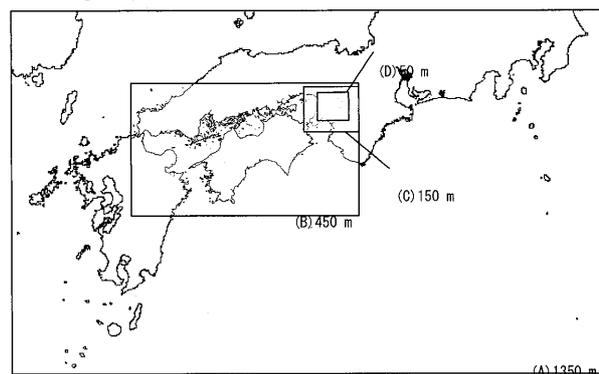


Fig.4 Area of simulation

#### 3.3 計算結果

津波シミュレーションより得られた最大絶対値流速の大阪湾内での分布を Fig.5 に、基準水位からの水位変動の最低水位を Fig.6 に、最大水位を Fig.7 に示す。また各主要海域での水位・流速変化を Fig.8~10 に示す。

Fig.5 によれば水平流の最大値は大阪湾の港外水域ではほとんどの部分で 0.4 ないし 0.6[m/s]程度で、高々 0.8[m/s]程度である。また、Fig.6 によれば水位変化の最大低下値は 0.8[m]程度であり、Fig.7 によると最大上昇値は 1[m]程度である。

一方で港内の水域では Fig.5 の最大流速の分布から、大阪港・神戸港付近の一部では水深が浅いことと防波堤などの影響で 2[m/s]以上の高い流速が発生していることが分る。また、同様にして Fig.6, Fig.7 の水位変化から、1[m]以上の大きな水位変化が発生していることが分る。

また、Fig.8 の友ヶ島水道における水位・流速の変化をみると、地震発生後、まずはゆるい南向きの引き波の後、約一

時間後に北向きの押し波が来襲している様子を読み取ることが出来る。同様にして、Fig.9, Fig.10のグラフからも津波来襲の様子を読み取ることができ、最大流速は1[m/s]程度であることが分る。

この計算結果によれば、大阪湾に津波が来襲すると沿岸部から離れた水域ではゆるやかな水位変化と水平流れ変化となるが、湾内や湾口部の防波堤付近では2[knot]以上の強い局所的な流れが生じ大きな危険を伴う。このためこのような水平流れとなる前に当該水域から避難する必要がある。

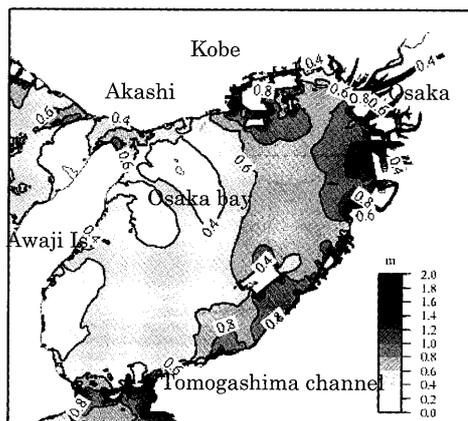


Fig.5 Horizontal distribution of the maximum velocity based on the tsunami simulation in Osaka Bay.

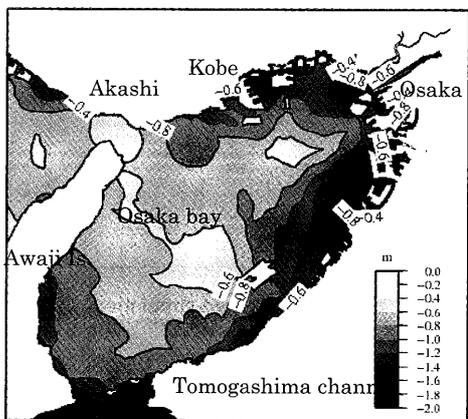


Fig.6 Horizontal distribution of the minimum surface elevation based on the tsunami simulation in Osaka Bay.

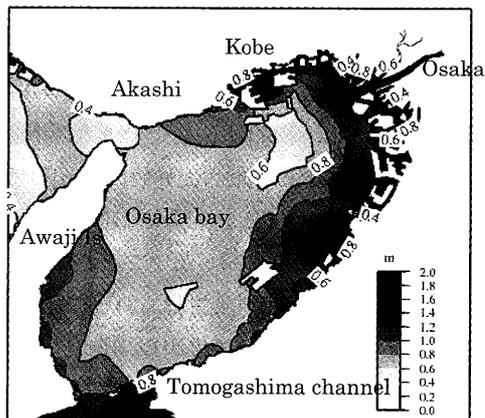


Fig.7 Horizontal distribution of the maximum surface elevation based on the tsunami simulation in Osaka Bay.

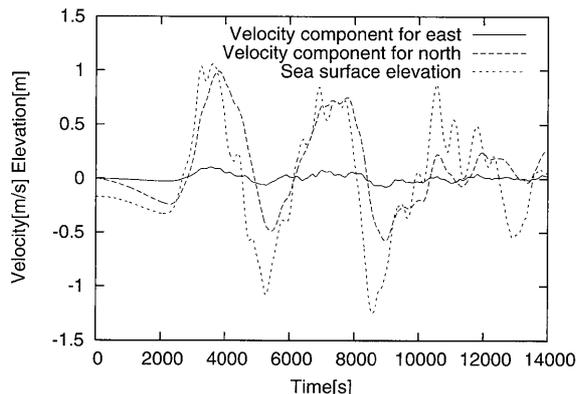


Fig.8 Velocity and elevation at Tomogashima channel

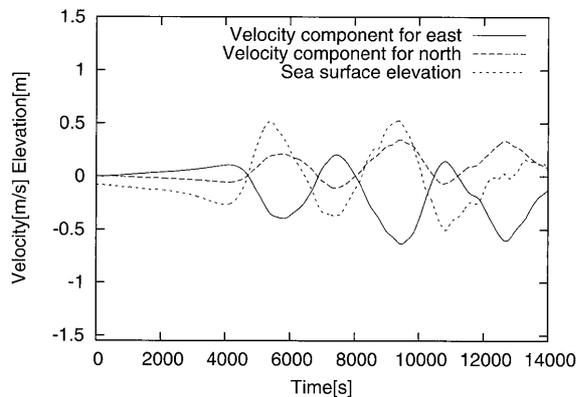


Fig.9 Velocity and Elevation at Akashi Straits

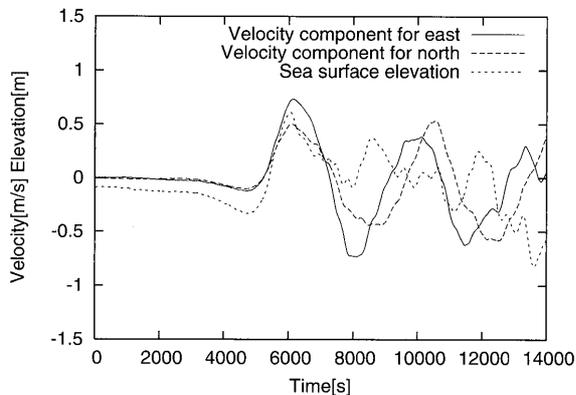


Fig.10 Velocity and Elevation in Kobe port

#### 4. 船舶避難の可能性

津波発生後、陸上の人や自動車と比較して、海上の船舶が避難を開始し、避難を完了させるまでに長い時間を必要とする。また、船舶に津波が来襲するまでの時間が短ければ、二次災害の方が懸念され、むしろ避難しない方が良い場合もあり得る。このような検討を行うためにまず大阪湾に津波が侵入する時間の推定が必要となる。

##### 4.1 津波来襲までの時間猶予

大阪湾の主要海域での水位・流速変化の結果から、各海域における津波第一波来襲時間を Table 3 に示す。地震発生後に最初に現れる緩い引き波は水位・流速変化共に小さいため

船舶への影響は無いと考えられ、その後の強い押し波の方が危険であると考えられるため、津波第一波来襲時間は押し波が来襲して、水位がピークとなる時刻とした。

この結果から、大阪湾においては地震発生後に津波が来襲するまでにある程度の時間的猶予が有ることが分る。

しかし、岸壁に接岸中の大型船が避難を行う場合、出航には一般的に30分かかるといわれている。しかし、Table 3の結果と比較すると、準備による遅れを考慮しても、ある程度の時間的猶予があることがわかった。

Table 3 The first tsunami peak time

Position	Time(min)
Tomogasima channel	54
Akashi straits	90
Kobe port anchorage point	83
Sakai Senboku anchorage point	116

#### 4.2 船員への連絡

船舶の避難を行う場合、実際に操船を行う船員が津波の来襲を知らされなければならない。しかし、海上の船員にとって地震は感知しにくいものであるため、津波来襲をすぐに予測することは困難である。よって、本研究では地震発生後、気象庁の津波予測が発表され、ポータルラジオ等を通じて船舶に伝えられるまでに10分かかると仮定した。

### 5. 避難海域の設定

#### 5.1 危険である時間の設定

Fig.8,9,10 が示すように、いずれの場合でも最初は緩やかな引き波が生じているが、これはその程度も小さく船舶への影響はほとんど無いと思われる。一方で、水位上昇の最初のピーク以降は水位の上昇・下降、水平流の増減と方向の変化が継続し、船舶にとって大きな影響をもたらすと考えられるので、4.1節で述べた津波第一波来襲以降を危険な時間であるとした。

#### 5.2 避難海域の設定

津波が湾内に来襲してきたとき、船舶の輻輳度が高い領域で津波を受けるより、水深が十分深く津波の影響度が低くかつ大洋への避航が容易な友ヶ島水道以南か、船舶の交通量が少なく比較的広い水域で漂泊など津波対応策がとりやすい播磨沖へ明石海峡を通過して避航することが良いと思われる。

そのため、友ヶ島水道以南と播磨沖の大阪湾外海域を第一の安全水域と考えた。

#### 5.3 湾内での安全水域の設定

船舶は大阪湾の外へ避難することが理想であるが、船舶の速度等の問題から、避難距離的・時間的に避難不可能で場

合も想定される。その場合、大阪湾内で出来るだけ安全な海域への避難を行わなければならない。

そこで、Fig.5より大阪湾、神戸港の港湾内・沿岸付近では2[m/s]以上の高い流速が発生しており、航路も狭いため危険であると考えられる。このため、港湾外の沖合への避難が必要である。港湾の沖合の流速はFig.5とFig.8~10より1[m/s]程度である。この程度の流速であれば安全であると考えられるため、本研究では台風避泊でも用いられ錨泊しやすい指定錨地を利用することを考え、大阪湾内の指定病地を安全であると仮定し第二の安全水域と考えた。

### 6. シミュレーション手法

#### 6.1 シミュレーション概要

シミュレーションの目的として、全ての船舶が避難開始点から避難完了点を通る時間を調べることにした。そこで、本研究では、シミュレーション手法として、待ち行列シミュレーションを援用した手法を用いた。このシミュレーションの特徴は、単純な「避難距離÷速度」で得られる様な避難時間と違って、航路の交差部を評価して航路上での混雑度を評価したシミュレーションが可能となっている。

この待ち行列シミュレーションを用いるにあたって、いくつかの仮定と簡略化を行った。

1. 避難開始点までの移動時間を30分
2. 船舶は指定された航路において並走・追い越しをせず一列で避難する
3. 速度は一定で避難
4. 船長はAISで解析した湾内船舶の平均船長とする
5. 閉塞領域は船長の10倍とする
6. 航路合流点では先入船を優先し、後続船は待機する

また津波シミュレーションによる水平流れは大阪湾の中央部では高々0.8[m/s]程度であり、避難時の想定船速よりかなり低く、本研究は避難海域を絞り込むための基礎的な検討であることを勘案し、船舶避難シミュレーションでは刻々の水平流の時間変化を省略して検討を行った。

#### 6.2 シミュレーション手法

一つの船はFig.11に示す前方に船長(L)の8倍、後方に船長の2倍の他船に侵入されない閉塞領域を持っているとし<sup>2)</sup>、この領域を領域通過時間分だけ占有し、その時間が経過すると船は避難先に向けて次の閉塞領域へと移動する。航路が交差する場合には進行方向の閉塞領域が他船によって占有されている場合はその場でとどまる。

この作業を繰り返すことによって全ての船舶が避難開始点から避難完了点まで通過するまでに必要な繰り返し作業数を求めることで全船避難の所要時間を求める。

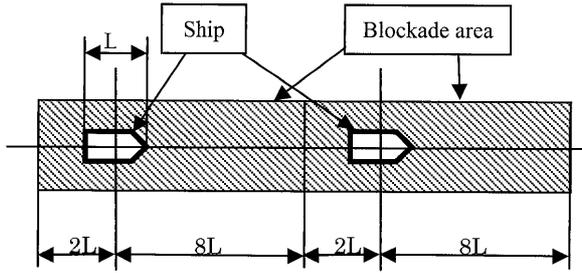


Fig.11 Blockade area of a ship

6.3 シミュレーション手順

1. 避難開始点と避難完了点の設定

AIS データの調査から、大阪湾における船舶の位置を求め、避難開始点とする。また、避難先の目標点を避難完了点とする。

2. 避難航路の設定

避難開始点と避難完了点とを結ぶ避難航路を Fig.1 に示す様な AIS データから描かれた航跡画を元に、実際に用いられている航路と同じ航路を用いて設定し、航路同士の交差点も求める。

3. 平均速度・平均船長の設定

AIS データより大阪湾における船舶の一般的な航行速度を平均速度とする。また、大阪湾における船長の平均を平均船長とする。

3. 閉塞領域の設定

平均船長から、閉塞領域の大きさを求める。

4. 航路のブロック分けと閉塞領域通過時間の設定

避難航路を閉塞領域の長さごとにブロック分けを行う。この時、この領域を通過する時間は閉塞領域÷平均船速から求められる。

5. シミュレーション実行

6. 避難所要時間の計算

避難所要ステップ数より避難所要時間は1閉塞領域通過時間と避難所要ステップ数の積で求める。

7. シミュレーション結果

本研究では2005年3月12日12:00時点での大阪湾内のデータを用いた。AIS データの調査より、平均船長は130[m]、大まかな平均船速は10[knot]であった。これより、閉塞領域は1300[m]、通過時間は4.21[min]とした。

Fig.12、Fig.13 に設定した避難航路を示し、その結果を Table 4、5 に示す。以上の結果より、湾外の第一安全海域の避難は時間的に難しいことが分る。しかし湾内の第二安全海域への避難であれば、津波第一波来襲前に避難を終えることができることがわかった。

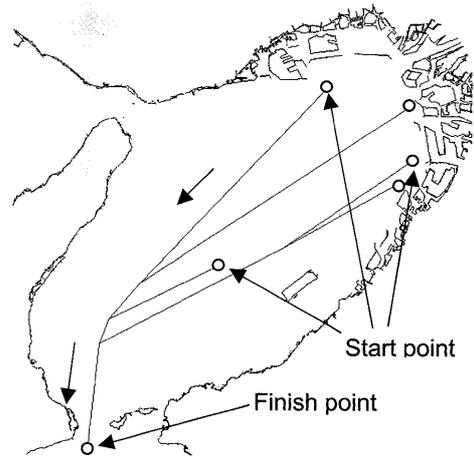


Fig.12 Ship evacuation routes for outside the bay

Table 4 Comparison of simulation time

Evacuation route	Time of passing through the channel	The first tsunami Peak time
Tomogasima channel	5h	54min
Akasi straits	3h30min	1h30min
Tomogasima channel and Akashi Straits	4h	54min

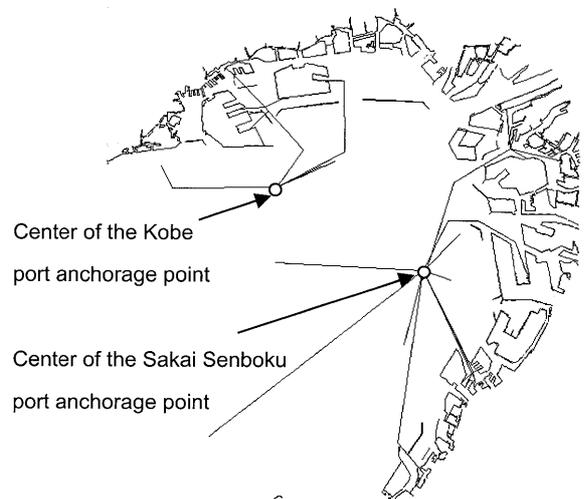


Fig.13 Ship evacuation routes for near the harbor

Table 5 Comparison of simulation time

Initial ship position	Time of arrival at anchorage point	The first tsunami peak time
Kobe port	1h30min	1h40m
Osaka port area	1h50min	2h
Sakai Senboku port area	1h20min	2h
Hannan port area	1h45min	2h

## 8. 結言

## 謝 辞

本研究では、大阪湾において、津波来襲時間と避難所要時間との比較を行った。

まず、津波来襲時間としては、友ヶ島水道を通過する時間が地震発生後 54 分で来襲することから、大阪湾内の船舶は約 1 時間の時間的猶予があることがわかった。この結果を基に避難所要時間のシミュレーションを行ったところ、友ヶ島水道と明石海峡を通過して湾外の第一安全海域へ避難することは、多くの船舶が避難途中で狭い海域である海峡で津波の来襲を受ける可能性があることが分った。しかし、第二安全海域である湾内の指定錨地への避難では多くの船舶が速やかに避難できれば津波来襲前に避難出来る可能性が高いことも分った。

以上のことから、近くの指定錨地への避難が一つの方法であると考えられる。

今後の課題として、実際の海域ではプレジャーボート・漁船・小型船舶など様々な船舶が存在する。このような船舶とどのように協調しながら安全に避難するか、あるいは出来るかなどについてより詳細な検討が必要である。また、津波の流速による航行速度の低下を考慮していない。このため避難所要時間は更に遅れる可能性がある。よって、津波の流速も取り込んだシミュレーションも今後行っていく予定である。

一方で避難開始が遅れると、湾内に津波が来襲する時刻と湾外に避難する時刻が合う場合も考えられる。このような時にはあえて避難しない方がリスクが小さいかもしれないので、遭遇する危険度も考慮した分析が必要であろう。

更に、指定錨地での錨泊時には  $1[\text{m/s}]$  程度の水平流れを受ける場合もある。そのような環境下では振れ回りが懸念されしかも台風避泊と異なり、一時間ほどの周期で流向が変化する。さらに走錨が起こらないかなどについても検討が必要であると考えられる。

また、船舶が友ヶ島水道付近や明石海峡付近を航行していた場合、大阪湾内へと入ることなく、湾外への航行を行えばよいと思われる。このような、船舶の位置による避難方法の違いも発生し、船舶の運動性能の違い等の「条件分け」もしくは「場合分け」を含めた詳細なシミュレーションを行い、より適切なマニュアルの作成が必要であると考えられる。

本研究は、文部科学省が推進している大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環として行ったもので、関係者の方々の御協力・御指導に厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 小林英一,越村俊一,久保雅義:津波による船舶漂流に関する基礎研究,関西造船協会論文集 第 243 号,平成 17 年 3 月, pp.44-56
- 2) 小林英一,久保雅義,鈴木三郎,越村俊一:津波による船舶の漂流とその対策に関する基礎研究,日本航海学会論文集 第 114 号,平成 18 年 3 月, pp.157-163
- 3) Imamura, F. : Review of Tsunami Simulation with a Finite Difference Method, Long-Wave Run-up Models, World Scientific, River Edge, NJ, 1996, pp.43-87
- 4) 日本造船学会:第 2 回操縦性シンポジウムテキスト,1970, p.142