津波による船舶の漂流とその対策に関する基礎研究

小林 英一*・久保 雅義*・鈴木 三郎*・越村 俊一**

A Basic Study on Evacuation Maneuver from Tsunami Attack

Eiichi KOBAYASHI, Masayoshi KUBO,

Syunichi KOSHIMURA and Saburo SUZUKI

Abstract

We are concerned about the occurrence of Tokai, Tonankai and Nankai earthquakes in Nankai Trough located at southern Japan sea area. The possibility of the occurrence is estimated as over 50 percent in these 30 years as of January, 2005. The tsunami by the earthquake attacks to the coastal area of Japan and generates not only the raise of sea surface but strong horizontal flow. The ships in the bay are forced to move by the current and such unexpected phenomena may occur as the addition of large force to a pier, uncontrollable lateral motion, collision to breakwater and drifting and grounding. It is very important to grasp the drifting motion of the vessel caused by tsunami current and make action guidelines against the attack for the prevention of sea disaster because such accidents bring serious results especially in the ports where dangerous cargoes are unloaded and loaded. From such viewpoints, basic analyses for ship evacuation maneuver from the tsunami attack were carried out and effectiveness of the action was shown.

Keywords : tsunami attack, drifting, grounding, collision, evacuation maneuver

キーワード: 操縦性、津波、船舶漂流、座礁、港外避難

1. はじめに

地球の表面を覆っているプレートはその下部に存在するマグマの対流により海嶺で新しく形成され一年に数センチ程度動き海溝やトラフといういわば溝で他のプレートの下に沈み込んでいる。ここでは沈み込む時の相互力によりしばしば地震が発生する。四国沖の南海トラフでは、記録に残るものとして 1605 年の慶長地震、1707 年の宝永地震、1854 年の安政南海および安政東海地震、1944 年の東南海地震、1946 年の南海地震などいずれもマグニチュード 8 ク

ラスの地震が継続的に発生している。そして 2005 年 1 月 1 日を基準にし今後 30 年以内に南海地震が 50%、東南海地震が 60%と高い確率で発生するとされている⁽¹⁾。この地震の発生に伴い津波が発生するがこれが周辺港湾に襲来すると水位の上昇と水平流れが同時に起こる。このような場合、港湾内の船舶は漂流したりバースに接触したり、また水位が下がった場合に底触することも考えられる。いずれの場合も港湾災害に結びつく可能性があるためこのような現象の解析・評価とそれに基づく対策の検討は災

* 正会員 神戸大学海事科学部 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1) kobayasi@maritime.kobe-u.ac.jp

** 非会員 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

害をできるだけ小さくするために重要な課題である。先の研究⁽²⁾において津波の来襲により積極的な操船を行わないと船体が漂流し底触する可能性を示したが、本研究では操船を行うことにより船体漂流を軽減できるかどうかについての検討をシミュレーション計算により行い、今後の減災対策絞り込みに資する基礎的なデータを整備することとした。

2. シミュレーションモデル

2.1 津波の計算

津波は地震により海底地形が変動することにより生ずる波である。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長波理論により、Fig. 1に示す座標系にて、連続の式と運動量保存の式を用い次のように表すことができる。

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

ここで

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

である。本論文ではこれを有限差分法にて解いた⁽³⁾。

2.2 船体漂流の計算

湾奥が急激に狭まっていたり、水深が急激に変化するような地形でなければ、港湾内に津波が来襲す

Fig. 1 System of coordinates of tsunami calculation.

ると一般的には水平流れが主体となる。そこで船体の挙動を表す運動方程式としては、船体と共に移動しその原点を船体重心とする Fig. 2 に示す座標系を用いる。船体長手方向に x 軸、それと直交する右手方向に y 軸、下方に z 軸をとり次のように表した。

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x) \ddot{u} - (m + m_y + X_w) vr \\ - (u_{c0} \sin \psi - v_{c0} \cos \psi) (m_y - m_x + X_w) &= X_H \\ (m + m_y) \ddot{v} + (m + m_x) ur \\ - (v_{c0} \cos \psi + u_{c0} \sin \psi) (-m_y + m_x) r &= Y_H \\ (I_{zz} + J_{zz}) \ddot{r} &= N_H \end{aligned} \right\} (2)$$

ただし

- m : 船の質量
- m_x, m_y : 船の前後方向及び左右方向の付加質量
- I_{zz} : z 軸回りの船の慣性モーメント
- J_{zz} : z 軸回りの船の付加慣性モーメント
- u, v : x, y 方向の速度成分
- u_{c0}, v_{c0} : 津波水平流の x_0, y_0 方向の速度成分
- r : z 軸回りの回頭角速度
- ψ : 回頭角
- $\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$: u, v, r の時間微分
- X_H, Y_H, N_H : 船体に作用する前後力、左右力及び z 軸まわりモーメント

また X_H, Y_H, N_H については津波により船体に流れ込む流れが船体近傍では一定方向からの流れで、次に示すいわゆる潮流抵抗で表現できるとした。また港湾内では、船底と海底の距離が喫水に比べて小さくなることもあるため Y_H, N_H については浅水影響も考慮した。

Fig. 2 Coordinate system of ship maneuvering simulation.

$$\left. \begin{aligned} X_H &= \frac{\rho}{2} L d U_c^2 C_{DX}(\theta_c) \\ Y_H &= \frac{\rho}{2} L d U_c^2 C_{DY}(\theta_c, H/d) \\ N_H &= \frac{\rho}{2} L^2 d U_c^2 C_{DN}(\theta_c, H/d) + N_r(r, H/d) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし

- L, d, H : 船の長さ, 喫水, 水深
 U_c, θ_c : 相対流速及び相対流向
 ρ : 海水密度
 C_{DX}, C_{DY}, C_{DN} : 前後方向, 左右方向の潮流抵抗係数及び潮流モーメント係数
 N_r : 回頭運動に伴うモーメント

そして(3)式で示す”流れ”の方向と大きさすなわち U_c, θ_c が時間と共に変化すると逐次(2)式の微分方程式を解き時刻歴計算を行うこととした⁽²⁾。

3. 計算条件

ここで想定する津波の発生モデルは、中央防災会議想定 of 東南海・南海連動型地震を採用した。また対象水域は先の研究⁽²⁾と同じ三重県尾鷲湾とした。計算対象の船舶はこの尾鷲湾内の東邦バースに接岸する一般的な大きさの Table 1 に要目を示すタンカーとし、計算の初期位置は Fig. 3 に示すようにバース付近の2つの状態とした。Case A はこのバースから離れ船首を北に向けた場合、Case B は着舷の直前にタンカーがバースに平行状態にある状態とした。なお載荷状態は操船が比較的時間難しいこと、喫水が大きい方が座礁しやすいことなどの面から、万一災害が起こった場合の影響が大きいと考えられる満載状態とした。

(3)式右辺の潮流抵抗係数としては類似船型の実験値⁽⁴⁾などを参考に Fig. 4 に示す特性とした。

Table 1 Principal dimensions of the VLCC

船長	265m
幅	44.2m
喫水	15.1
排水量	143,000t

Fig. 3 Initial ship position for evacuation maneuver simulation against the tsunami attack in Owase Bay.

Fig. 4 Current force coefficients

Fig. 5はCase Aの初期地点における津波による水位上昇量、東西方向及び南北方向の流速の時刻歴を示したものである。地震発生後約20分程度で最初の最大水位高約4mとなるが、その時刻までにもすでに水平流は徐々に増大しこの初期最大水面高となる時刻では南北方向は概ねゼロであるが西向き流速は1m/secに達している。すなわちこの位置では東西方向の流れが卓越していることになる。

Case Aの場合は、地震発生後積極的な操船を行わないと、緩やかな水平流れによりFig. 6に示すように津波第一波により西方に流され次に港外方向に引き戻され次にまた湾奥に押しやられこれを繰り返しながら北方に移動しやがて浅瀬で底触に至っている。Case Bの場合、Fig. 7に示すように船舶が流されやがてバースに接触するに至っている。

Fig. 5 Time histories of tsunami elevation and velocity components for east and north in Case A.

Fig. 6 Ship locus by tsunami attack in Case A⁽²⁾.

Fig. 7 Ship locus by tsunami attack in Case B⁽²⁾.

次に積極的な操船を行うことを考えてみる。Case Aの初期位置に船舶がある場合、一般的には主機は作動できる状態にある。南海トラフ上で地震が発生したことは、この尾鷲湾では直ちに認識できると考えられるから、早速港外に避難操船を行うと考える。これをシミュレーション計算で示すため、操舵については次式で示すような自動操船を考えた。

$$\delta = C_1(\psi - \psi^*) + C_2 r \quad (4)$$

ただし

δ : 司令舵角
 ψ : 方位角
 ψ^* : 目標方位角
 r : 回頭角速度
 C_1, C_2 : 比例乗数

すなわち予め設定した目標方位角 ψ^* に対して比例+微分制御を行う。今回の計算では比例定数 C_1, C_2

はそれぞれ試計算などの結果も参考に-10 と-100 とした。また目標方位角 ψ^* は、最も一般的と考えられる航路に適合するよう 80 度とした。また(4)式で示す指令舵角に対してはその他の外乱に対する余裕を残すため一般的な最大舵角 35 度とせず上限値を 20 度とした。これに対するシミュレーション結果について、Fig. 8 に舵角、船速、方位角、水位上昇の時刻歴を示す。また航跡を Fig. 9 に示す。これらから分かるように、概ね良好に港外への避難操船が実施できていることが分かる。

Case B はバース接岸状態で、かつタグが近域に居ることを想定したシナリオとした。具体的には地震発生後、10 分間は具体的な操船を行わず、10 分経過後に、30 トンの曳航力があるタグ二隻を船首尾に配置し沖合に引き平行離岸作業を開始すると共に、主機も作動させ、また操舵も行うとした。タグ平行曳航は地震発生後 10 分後から 5 分間実施するとした。

これに対するシミュレーション結果について、Fig. 10 にプロペラ回転数、舵角、タグ力、船速、方位角、水位上昇の時刻歴を示す。また航跡を Fig. 11 に示す。これらから分かるように、方位角にややふらつきがあるものの、概ね良好に港外への避難操船が実施できていることが分かる。

4. 考察

先に述べたように、南海トラフ上で巨大地震が発生した場合、それによる何らかの衝撃を感ずるであろうし、例えそれを見逃したとしても何らかの通信手段により、操船側には地震発生が殆ど瞬時に伝わると考えられる。Case A の場合では、そもそも港外にむけて進みつつある状態なので、主機作動および操舵作業は速やかに可能である。今回の計算では、操舵手による操船を模擬していないが、いわば目標針路からそれればそれに対して当て舵をとるという人が行う操船に対応した自動操船に依っている。この結果によれば、通常の航路に沿って港外避難操船を行えば、多少ふらつくものの安全に港外に出ることができると考えられる。

Case B の場合はバース位置に船舶があるときに地震が発生したというシナリオである。この時も先のケースと同様、地震を体感するのでその発生は認識できているという想定である。この時係留状況や諸々の事象確認に時間を要し、実際に船舶を動かすまで 10 分かかったというシナリオにしている。その後タグによる沖出し、自力操船により、港外避難が可能との計算結果を得ることができた。

Fig. 8 Time histories of tsunami elevation and velocity components for east and north in Case A.

Fig. 9 Ship locus in the evacuation maneuver from tsunami attack in Case A.

Fig. 10 Time histories of surface elevation, depth in calm and bottom clearance at ship position in Case B.

Fig. 11 Ship locus in the evacuation maneuver from tsunami attack in Case B.

この Case B はバース接岸直後と考えれば最も湾奥にタンカーが入っている時なので、これより手前、すなわち航路に沿ってタグに伴走あるいは曳航あるいは押されながら入港中の場合、地震発生後ただちに港外避難操船を行えば安全に避難できることを示唆している。ただ Case B については課題が多い。今回のケースでは近くにタグがいることにより地震発生から 10 分後はタグにより曳航するというシナリオだが、そもそもタグ自体が地震発生時にこのような短時間でこのバース近くまで来られるケースは少ない。

本論文で取り扱った Case A および Case B は様々な地震津波被災シナリオのごく限られた一つではない。Case A、Case B の結果からは、尾鷲湾の場合、出入港中の大型タンカーが自力で操船できる状態の時に地震が発生したならば、概ね安全に港外に避難できることを示唆するものではある。しかし実際の揚油中であれば、ごく近くにタグがいる場合でなければ港外避難は難しくなることも考えられる。

今後、この地震発生時の対応シナリオについては操船者（運航者）、タグ関係者、港湾関係者などの密接な協議・連携が必要である。またタグ操船者の安全も考えれば、入港船が自力で避難できる限界をより詳細に検討を行うことも対策の一つとして重要であろう。

また今回はいわゆるオートパイロットを計算ロジックに組み込んで計算を行ったが、この推定をより確実なものとするためには、実時間操船シミュレータなどを活用し、地震発生、津波来襲についてより実際に近い状況下で総合的な検証を行う必要がある。

5. 結論

本研究で尾鷲湾を対象として、南海トラフ上で発生する巨大地震に伴う津波の来襲を受けた場合の船舶への影響について特に避難操船の見地から検討を行った。この結果を纏めると次のようになる。

- (1) 尾鷲湾では、バース近くで津波来襲を受けた場合、積極的な操船を行わないと船舶が漂流し、座礁したり、バースに接触したりする。
- (2) 主機操作や操舵が直ちに実施できる状態の出入港中であれば、適切な操船を行うことにより安全に港外避難ができる可能性がある。
- (3) 今後操船者、タグ関係者、エネルギー基地関係者、港湾管理者などが、この避難操船について、シナリオ策定および対策についてより密接な協議を進める必要がある。
- (4) それぞれのシナリオについての対策検討に際し、本研究で試みたようなシミュレーションを援用することができる。
- (5) 今後操船シミュレータを活用しより現実的な環境下で津波来襲時の避難操船についての検証を行う必要がある。

謝辞

なお本研究は、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、関係者の方々のご協力・ご指導に御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 資料 (別表 1)
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/05jan_kakuritsu/index.htm, 2005.1
- (2) 小林英一・越村俊一・久保雅義：津波による船舶の漂流に関する基礎研究，関西造船協会論文集，第 243 号，pp.49-55，2005.3
- (3) Imamura, F.: Review of Tsunami Simulation with a Finite Difference Method, Long-Wave Run-up Models, World Scientific, River Edge, NJ, pp.43-87, 1996.
- (4) 日本海難防止協会編：超大型船操船の手引き，成山堂書店，pp.39，1976.

質疑応答

林美鶴（神戸大学）：

今回は地震発生後 10 分後から避難開始する条件で計算され、避難可能との結果でしたが、逆に何分位経過すると避難不可能にあるいは何分後までなら避難可能なのでしょうか。

小林英一：

御討論ありがとうございます。現在の結果からは明確には分かりません。今後様々なケースについての計算結果から判断する必要があると考えています。

鶴田三郎（東京海洋大学）：

シミュレーションでは出航（港）可能となったようですが、現実の場面においても出航可能と考えてもよろしいでしょうか。

小林英一：

御討論ありがとうございます。同じような場面ですと出航可能と考えています。ただその検証のためには操船シミュレータを使うなどさらに詳しい検討が必要と考えています。また実際の津波についてはこれと同じものが来るわけではありません。タグの援助も必要ですが、関係者が多岐にわたりますので、様々な場合について対応できるよう、関係者と協議しながら、本検討で実施した計算や、さらに大規模な操船シミュレータを使った検討、さらに避難操船マニュアルの整備などが必要と考えています。