正員 村山雅子^{*1} 正員 小林英一^{*2}
 水ノ江隆志^{*3} 近藤英昭^{*4}
 越村俊一^{*5} 正員 大澤輝夫^{*2}

Marine evacuation traffic at tsunami attack in congestion area

by Masako Murayama, *Member* Eiichi Kobayashi, *Member*
 Takashi Mizunoe, Hideaki Kondo,
 Shunichi Koshimura, Teruo Osawa, *Member*

Summary

In the near future, it is estimated that the Tōnankai and Nankai huge earthquake will occur along the Nankai Trough. The earthquake generates tsunami attack over a wide range such as Seto Inland Sea where is dotted with islets and so many ships are navigating. In addition that many ships evacuate from port areas to safe area when the tsunami attacks. Sea traffic congestion is concerned about in such the evacuation.

In this study, first, we analyzed the traffic density in Bisan Seto on the basis of AIS received data. Then we carried out several kinds of preliminary simulation of ship evacuation from tsunami attack in Bisan Seto for the purpose of consideration of evacuation scenarios. An algorithm of collision avoidance by reducing propeller rotation was introduced to the ships evacuation simulation. Finally, it is found that many ships can evacuate to safer place on time when the tsunami attack in Seto inland sea in safe.

1. 緒言

近い将来、東南海・南海地震が発生することが予測されており、この地震に伴い広い範囲に津波が来襲するとされている。この津波は紀伊水道および豊後水道から瀬戸内海に侵入し、緩やかな水位上昇・下降と場所により水平方向の強い流れになる可能性がある。津波は沿岸域に長時間にわたり繰り返して来襲し、第2波、第3波が第1波よりも波高が高くなるとされている。一方、津波は波長が長いので、外洋においては航行中の船舶に対しての影響は無い。そこで、津波来襲時には、船舶は港外避難することが推奨されているが、船舶が一斉に避難を開始すると、場合により海上交通に混乱が生じることが予想される。特に輻輳海域においては、避難海域

まで安全に移動するために交通流の管制が必要になることも考えられるが、緊急時の海上交通の管制についての研究例は少ない。中でも瀬戸内海においては、東南海・南海地震による津波の影響が少ないと考えられていることから、地震・津波に対する具体的な検討があまり行われていない。しかし、瀬戸内海は危険物輸送船をはじめ多くの船舶が航行する上、小島が点在し狭く、水深が浅い海域であることから緊急時の対策について指針が必要である。

ある特定の船舶が所定の避難経路に沿って円滑に操船できるか、さらに到着した避難対象水域に錨泊した場合、安全に津波をやり過ごすことができるかについて、瀬戸内海を対象とした先の研究^{1),2)}において検討された。

本研究では、これに引き続き東南海・南海地震に伴う津波が瀬戸内海に来襲した場合を想定し、複数の船舶が一斉に避難を開始した時の海上交通流について、動的シミュレーションを行い検討した。さらに、避難時に輻輳がみられたときには、減速により避航するアルゴリズムを加え、輻輳海域において船舶が安全に避難できることを示し、避難シナリオの策定における基礎的なデータ整備に資することとした。

*1 富山高等専門学校電子情報工学科

*2 神戸大学大学院海事科学研究科

*3 大日本スクリーン製造株式会社

(研究当時 神戸大学大学院海事科学研究科)

*4 瀬戸内海海上安全協会

*5 東北大学大学院工学研究科

2. 対象海域

瀬戸内海は海域が広いことから、研究の第一段階として対象とする海域をさらに絞りこむこととした。海上交通安全法により幅轄する海域における船舶交通について、特別の交通方法を定めている 11 航路のうち、備讃瀬戸東航路、備讃瀬戸北航路、備讃瀬戸南航路、宇高東航路、宇高西航路、水島航路の 6 航路が備讃瀬戸海域にある。このことから、備讃瀬戸海域における航行は、瀬戸内海の中でも特に航行が難しい海域であると考え、本研究では Fig.1 に示す備讃瀬戸海域を対象に検討した。対象海域は、東経 $133^{\circ} 22'12''$ から $134^{\circ} 27'36''$ 、北緯 $34^{\circ} 06'00''$ から $34^{\circ} 40'48''$ の範囲とした。

Fig.1 Area of simulation

3. 通航実態

シミュレーションを行うにあたり、備讃瀬戸海域における海上交通量の状況を把握するため、AIS（船舶自動識別装置）の受信データをもとに調査を行った。

3.1 AIS 受信データ

備讃瀬戸海域における船舶について、2008 年 8 月 13 日の 0 時から 24 時までの 1 日間に AIS が受信したデータを船舶の MMSI（海上移動業務識別）により分析し、1 時間ごとの時間帯別の船舶数を比較した。これを Fig.2 に示す。船舶数のピークは 20 時～21 時の間で 198 隻であるのに対し、3 時～4 時、5 時～6 時の間は最も少なく 172 隻であり、26 隻の差があった。16 時～22 時の間は 190 隻を超える船舶があるのに対し、2 時～7 時の早朝には 180 隻未満と少なくなっていた。

また、AIS が受信したデータには、「航行中」・「錨泊」・「係留」・「機走」など操船状況を示す Navigation_status フラグがある。そこで、全データの中から、操船状況が「航行

中」であるデータについて MMSI により分析し、時間帯別の航行船舶数を比較した。これを Fig.3 に示す。

航行船舶についてみると、ピークは 17 時～18 時および 20 時～21 時の間で 108 隻であるのに対し、5 時～6 時の間は最も少なく 80 隻であり、28 隻の差がある。全体的に 15 時～22 時までの間は 100 隻以上の航行船舶があるのに対し、2 時～7 時の早朝の時間には 90 隻未満と少なくなっている。

Fig. 2 Number of ship by AIS time analysis

Fig.3 Number of navigation ship by AIS time analysis

4. シミュレーション初期条件

備讃瀬戸海域における津波発生時の複数船舶の避難状況について、後述する避難操船シミュレーションプログラムを用いて計算を実施した。避難開始時刻は、避難目的海域の検討、出航準備などの時間を考慮し、津波発生時刻から 30 分後とし、船舶の隻数および船型、位置情報については、2 章で述べた 2008 年 8 月 13 日の AIS 受信データを基に設定した。

4.1 対象船舶

前章において、20 時～21 時の時間帯に船舶数が多いこと

が確認された。本研究では幅輾度について検討するため、2.2 節で分析した AIS 受信データのうち、船舶数がピークである 20 時～21 時の船舶データを用いた。今回は、航行中の船舶について検討した。Fig.3 に示す通り、AIS 受信データにおいて、操船状況を示すフラグが「航行中」になっている船舶は 108 隻あったが、AIS 装置の操作手違いなどにより実際には航行していない船舶が含まれていることから、このうち位置情報により移動が確認できた 81 隻のデータを用いた。

4.2 計算海域

備讃瀬戸海域は範囲が広く、航路数および航行船舶数が多いことから、シミュレーション計算にあたり、水島航路を含む東側の海域を備讃瀬戸東側海域、水島航路よりも西側の範囲を備讃瀬戸西側海域として東西に海域を分けて検討した。船舶データについては、Fig. 4 の四角枠で囲む東経 133° 51'00"から 134° 27'36"、北緯 34° 18'00"から 34° 40'48"の範囲内を通航した船舶を備讃瀬戸東側海域、Fig. 5 の四角枠で囲む東経 133° 22'12"から 133° 51'00"、北緯 34° 06'00"から 34° 37'48"の範囲内を通航した船舶を備讃瀬戸西側海

Fig. 4 Area of simulation(Eastern part of Bisan Seto)

Fig. 5 Area of simulation(Western part of Bisan Seto)

域の対象船舶とした。ただし、福山港周辺の海域における船舶については、より広い海域である燧灘海域へ避難することを想定し、本研究では、Fig. 5 の太枠で囲む東経 133° 22'12"から 133° 30'00"、北緯 34° 21'36"から 34° 37'48"の範囲内にある船舶を対象外とした。

今回の計算においては、備讃瀬戸東側海域の対象船舶は 57 隻、備讃瀬戸西側海域の対象船舶は 24 隻である。

4.3 船舶の初期位置

本研究では、4.1 節で述べた通り 2008 年 8 月 13 日の AIS 受信データのうち、船舶数が最大であった 20 時～21 時の時間帯のデータを使用し、船舶が避難開始する初期位置には、AIS 受信データにおける船舶の 20 時の位置データを設定した。Fig.6, Fig.7 に船舶の初期位置を示す。

Fig. 6 Initial positions of ship for the evacuation simulation
(Eastern part of Bisan Seto)

Fig. 7 Initial positions of ship for the evacuation simulation
(Western part of Bisan Seto)

4.4 避難海域

津波来襲時における避難海域は、先行研究¹⁾において想定・検討され、安全に津波をやり過ごすことができることが確認された避難海域を設定した。Fig.4, Fig.5 の丸印①から⑨

に避難海域を示す。目的地とする避難海域は、4.3 節で示した各船舶の初期位置から最も近い海域のうち、船の正横方向よりも後方への変針は危険が大きいことから回頭角度が 90 度を超えない範囲に船舶ごとに設定した。

また、初期位置が対象海域の東端周辺にあり東方向に航行している船舶、初期位置が対象海域の西端周辺にあり西方向に航行している船舶については、設定した避難海域①～⑨へ向かうよりも、広い海域である播磨灘、燧灘への避難する方がより安全であるとし、各海域を避難海域として設定した。Table 1 に、各避難海域に設定した船舶数を示す。

Table 1 Number of ships in each safety area

Safety area	Number of Ship	
	Bisanseto East	Bisanseto West
①	0	0
②	0	0
③	0	8
④	0	12
⑤	19	4
⑥	9	0
⑦	6	0
⑧	10	0
⑨	7	0
Other	6(to Harimanada)	0(to Hiuchinada)

4.5 避難経路

津波来襲時における避難経路は、先行研究¹⁾において想定・検討された避難経路を設定した。Fig.8, Fig.9 に避難経路を示す。各船舶の 20 時の初期位置から、最も近い避難経路のうち、船の正横方向よりも後方への変針は危険が大きいことから回頭角度が 90 度を超えない経路を船舶ごとに設定した。

Fig. 8 Evacuation routes(Eastern part of Bisan Seto)

Fig. 9 Evacuation routes(Western part of Bisan Seto)

4.6 船型による区分

計算時の船型モデルは、AIS で受信した船舶データのうち、船長をもとに 499ton、3,000ton、10,000ton、160,000ton の 4 つの階級に区分した。Table 2 に船型別の対象船舶数を示す。備讃瀬戸東側海域の対象船舶 57 隻を区分すると、船型が 499ton の船舶は 12 隻、3,000ton が 40 隻、10,000ton が 3 隻、160,000ton が 2 隻であった。備讃瀬戸西側海域の対象船舶 25 隻を同様に区分すると、船型が 499ton の船舶は 1 隻、3,000ton が 21 隻、160,000ton が 2 隻であった。計算時の船種モデルは、船型別に漁船、タンカー、RORO 船、VLCC とし、標準的な船舶の緒元をモデルシップとして与えた。

Table 2 Type of model ship

Type (ton)	Length(m)	Number of Model Ship	
		East area	West area
499	0～65.5	12	1
3,000	65.5～110	40	21
10,000	110～173.5	3	0
160,000	173.5～	2	2
Total		57	24

4.7 津波流・潮流

外乱として、津波流および潮流を与えた。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き、後述する津波計算式により求めた。また、備讃瀬戸海域における潮流を後述する数値計算により求めた。

4.7.1 津波計算

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樣とした非線形長波理論により、Fig. 10 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。

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

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より解いた³⁾。

Fig. 10 System of coordinates of tsunami calculation

4.7.2 潮流計算

潮流としては、備讃瀬戸海域において西向きの流速が大きい2006年10月8日17時から9日17時の24時間のものを援用した。なお、潮流の計算は、POM(Princeton Ocean Model Version pom2K)を使用し、開境界での潮位は、NAO.99b 潮汐予測システムを用いた。

5. 避航操船

幅輦する海域において、船舶が一斉に避難海域へ向かうため、一部で船舶同士の衝突の危険が生じる可能性がある。そこで、衝突の危険がある接近が見られたときには避航操船するアルゴリズムをシミュレーションプログラムに加えた。

各船舶は、「警戒距離」、「警戒領域」、「避航義務」、「減速」の順に操船判断を行うものとした。操船判断は毎秒行った。

5.1 警戒距離

自船が航行中に他船の存在を認知した時、自船から他船までの距離が近い時には警戒が必要である。他船の動向を確認し、警戒が必要かどうか判定する必要がある時の自船から他船までの直線距離を警戒距離とした。警戒距離の判定は、2船間の距離とTCPA(Time of Closest Point of Approach : 最接近時間)をもとに行う。自船(Ship1)と相手船(Ship2)が Fig.11 に示す位置関係にある時、2船の TCPA は次の式(2)により求める。

$$TCPA = \frac{D(V_0 \cos \alpha + V_t \cos \beta)}{V_0^2 + V_t^2 + 2V_0 V_t \cos(\alpha - \beta)} \quad [\text{sec}] \quad (2)$$

V_0 : 自船の速力[m/sec]

V_t : 相手船の速力[m/sec]

D : 2 船間の距離[m]

α : 自船から見た相手船の相対方位角

β : 相手船から見た自船の相対方位角

Fig.11 Positional relation of two ships

TCPAが0より小さい時、2船は遠ざかっているといえる。そこで、次の条件式(3)(4)をどちらも満たすとき、「警戒必要」とし、次節5.2の通り「警戒領域」判定を行う。

$$D \leq K_1 L \quad (3)$$

$$TCPA \geq 0 \quad (4)$$

K_1 : 比例定数

D : 2 船間の距離[m]

L : 自船の船長[m]

今回のシミュレーションにおいては、次節で述べる警戒領域の前方と後方距離の合計を警戒距離とし、比例定数を $K_1 = 20$ として計算した。Fig.12 に自船と相手船の距離 D および自船からの警戒距離 $K_1 L$ の関係を示す。

Fig.12 Distance of caution

5.2 警戒領域

自船は前方 8L、後方 2L、左右各 2L の範囲内を他船に侵入されない閉塞領域として持つとされている⁴⁾。閉塞領域内に侵入しないために避航措置を開始する領域として、自船の船長が L[m] のとき、前方 K_2L 、後方 K_3L 、左右各 K_4L を自船の警戒領域 (K_2, K_3, K_4 は比例定数) とした。

Fig. 13 に、自船の閉塞領域および警戒領域を示す。Fig. 13 の斜線部分は自船の閉塞領域である。他船が自船の警戒領域内に位置するときは、次節 5.3 のとおり「避航義務」判定を行う。閉塞領域の範囲を警戒領域として設定し、予備シミュレーションを行ったところ、5.4 節で述べる減速による避航をしても衝突の危険を感じる接近を避けることができなかった。このため、前方・後方について段階的に係数を増やし、

Fig.13 Area of caution

今回は前方 16L、後方 4L の領域を設定した。左右方向については、今回は航路を設定しており、追い越しおよび行き会いはないため 2L とし、今回のシミュレーションにおいては、比例定数を $K_2=16, K_3=4, K_4=2$ として計算した。

5.3 避航義務

避航義務は、海上衝突予防法に基づき判定する。ただし、本研究では、航路を指定していることから「行き会い」および「追い越し」は行わないものとした。

次の 2 つの条件のいずれかに当てはまる時、自船に避航義務があると判定した。

- 1) 相手船が自船の前方にあるとき
- 2) 相手船が自船の右舷方向にあり、相手船が自船方向に近づいているとき (自船から見た相手船の相対方位角が 0 度から 180 度のとき、相手船が自船方向に近づいていると判断する)

5.4 減速による避航

避航の方法として、本研究では避難経路を指定しており、多くの船舶が航行する海域を対象としていること、地震・津波発生という気象状況下の航行を想定していることから、針路変更および追い越しは行わず、減速により避航するものとした。5.1 節から 5.3 節で述べた条件により自船に避航義務があると判定したとき、プロペラ回転数を変えることにより、自船速度を減速する。本研究では、1 回の避航操船においてテレグラフを 1 段階切り替えるものと考え、プロペラ回転数の減少は 80% とした。

操船判断は毎秒行うが、船舶は操船が船舶の行動に現れるまでの時間が長いため、減速処理を行ってから 30 秒間は、同じプロペラ回転数を維持するものとした。

6. シミュレーション結果

避難シミュレーション計算における津波発生から船舶が避難海域に到達するまでの時間 (避難時間) について、海域ごとの平均時間および最大時間を Table 3 に示す。

Table 3 Time of ship evacuation

	East area [min]	West area [min]
Average Time	81	99
Max Time	144	157
Tsunami arrival ⁵⁾	120~150	150~720

船舶の避難航跡は概ね指定した航路に沿っており、良好に指定海域までの避難操船が実施できた。Fig.14 に対象船舶のうち、ある1隻の船舶の避難航跡の一例を示す。Fig.14の座標系は UTM 座標系(53 帯)を採用した。

Fig. 14 Ship trajectory of a ship evacuating westbound

5章で述べた避難操船の判定は、シミュレーションにおいて1秒ごとに行った。Table 4に避難操船の判定結果を示す。1秒ごとの判定時に自船から見た警戒範囲内に他船があった回数の合計であり、自船から見た警戒範囲内に2隻以上の他の船舶がある場合でも1回としている。Table 3, Table 4から、備讃瀬戸東側海域において、全ての対象船舶57隻が目的地である避難海域に到着するまでの避難時間144分間に、他船が自船の警戒距離内にあると判定したのは90,951回であったことがわかる。備讃瀬戸西側海域においては、すべての対象船舶24隻が目的地である避難海域に到着するまでの避難時間157分間に、他船が自船の警戒距離内にあると判定したのは59,567回であった。

また、備讃瀬戸東側海域と西側海域では対象船舶数および避難時間が異なるため、自船から見て他船が「警戒距離」、「警戒領域」、「避航義務」にあった時の平均間隔を次の式(5)、(6)により求めた。求めた平均間隔をTable 5に示す。

$$1 \text{ 隻ごとの平均判定回数} = \frac{\text{判定回数[回]}}{\text{海域ごとの対象船舶数[隻]} \times \text{[回/隻]}} \quad (5)$$

$$\text{平均判定間隔[秒/回]} = \frac{\text{海域ごとの平均避難時間[秒]}}{1 \text{ 隻ごとの平均判定回数[回/隻]}} \quad (6)$$

Table 4 Number of detection of collision possibility

Order	East area	West area
Caution distance	90,951	59,567
Caution area	10,247	3,245
Burdened	3,569	1,097
Slowdown	223	95

Table 5 Mean time to detection of collision possibility

Order	East area [sec]	West area [sec]
Caution distance	3.0	2.4
Caution area	27.0	43.9
Burdened	77.6	130.0

その結果、備讃瀬戸東側海域において、他船が「警戒距離」内にあったのは3.0秒に1回、「警戒領域」内にあったのは27.0秒に1回、自船に「避航義務」があったのは77.6秒に1回であり、備讃瀬戸西側海域において、他船が「警戒距離」内にあったのは2.4秒に1回、「警戒領域」内にあったのは43.9秒に1回、自船に「避航義務」があったのは130.0秒に1回であり、どちらの海域においても高い頻度で判定していることがわかった。

7. 考察

シミュレーション計算の結果から得られた海域ごとの船舶の避難時間について、中央防災会議「東南海・南海地震等専門調査会」において想定された0.2mの津波が到達するまでの時間⁵⁾と比較した(Table 3)。一部の船舶は避難海域への移動中に津波が到達する可能性があるが、船舶の避難航跡が概ね指定した航路に沿っていることから、既に沿岸部を離れ沖合を航行中のため、津波を安全にやりすごすことができたと言える。

航行中の船舶は、他船と衝突の危険がないかについて常に自船から一定距離内にある他船との距離、速度、針路を確認し、衝突の危険を避けなければならない。本研究では、避難船舶が安全に航行できたことを示す指標の一つとして、他船との衝突の可能性について判定回数を確認した。船舶同士の接近について、船舶の航跡から両海域共に一部で幅輦が見られ、「警戒距離」・「警戒領域」・「避航義務」の避難操船の判定頻度は高かったものの、減速による避航を行ったことにより安全に指定海域まで避難できることが船舶ごとの航跡から確認できた。

8. 結言

本研究では、備讃瀬戸海域における通航実態について AIS 受信データを用いて調査し、そのデータを用いて複数船舶が緊急時に一斉避難した場合の交通流について、動的シミュレーションによる計算を行った。得られた結果をまとめると以下ようになる。

1. 備讃瀬戸海域における船舶数は、AIS によりデータを受信した船舶に限定しても、いずれの時間帯でも 170 隻以上あり、交通量の多い海域である。
2. 津波・潮流の影響下においても各船舶の避難航跡は指定した航路に沿っており、概ね良好に指定海域までの避難操船が実施できた。
3. 船舶同士の接近について、船舶の航跡および避航操船判定の頻度から両海域共に一部で輻輳が見られたものの、減速による避航を行ったことにより安全に指定海域まで避難できることが船舶ごとの航跡から確認できた。
4. 津波発生から船舶が避難海域に到達するまでの避難時間を見ると、一部の船舶は避難海域への移動中に津波第一波が到達する可能性があるが、船舶の避難航跡が概ね指定した航路に沿っていることから、既に沿岸部を離れ沖合を航行中のため、津波を安全にやりすごすことができたと言える。
5. 今回、シミュレーション計算を備讃瀬戸東側海域と西側海域に分けて行った。避難海域が 1 つの海域を除き異なること、東側海域と西側海域における避難経路が異なることから東西の海域間における船舶の干渉はほぼなかったと言える。
6. 今後の課題として、今回は航行中の船舶データを基にシミュレーション計算を行ったが、航行中の船舶に加え、港内に停泊中の船舶が一斉に港外に避難する場合についても検討する必要がある。

謝 辞

本研究の一部は、(社)瀬戸内海海上安全協会平成 20 年度瀬戸内海における緊急時避難船舶の交通流に関する調査検討の一環として行ったもので、関係者の方々のご協力・ご指導に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 小林英一, 斧田康佑: 備讃瀬戸海域における津波来襲時の船舶避難に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第 5K 号, 2007, pp.37-38
 - 2) 小林英一, 池上 隆, 斧田康佑, 大澤輝夫, 米田翔太, 越村俊一, 水ノ江隆志: 瀬戸内海における津波来襲時の船舶避難について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第 6 号, 2008, pp.293-294
 - 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
 - 5) 中央防災会議: 「東南海・南海地震などに関する専門調査会第 16 回」, 資料 3-2, 2003.12
-