

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

風間隆宏¹・中村 隆²・伊藤敏朗³
大塚浩二⁴・佐藤勝弘⁵・今津雄吾⁶

津波による船舶被害軽減のための避難海域設定手法について検討を行った。まず、中央防災会議各専門調査会によって公開されている「海岸での津波高さ」を用いて、簡易的に避難海域水深を設定する手法を提案し、気仙沼湾を対象とした津波シミュレーション結果と比較した結果、その妥当性を確認した。また気仙沼湾において避難海域への到着可否を検討した結果、湾奥部から避難の場合は、避難海域に到達する前に津波に遭遇する可能性があることが認められた。さらに人命第一を考えた船舶避難行動に関する考え方を提示し、避難海域及び避難行動のルールは地域の実情を踏まえ関係者が協議し設定することの重要性を指摘した。

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ島西方沖地震津波が周辺各国に甚大な被害を及ぼした事は記憶に新しい。この津波災害では、人的被害に加え多くの漁船など小型船舶の被害が顕著であった。我が国においても、1983 年の日本海中部地震・津波では、漁船の転覆により 10 名の死者行方不明者が発生している（土木学会、1983）。

過去の津波災害時における小型船舶、特に漁船の避難行動をみると、漁船を津波から守るために港外への避難行動（沖出し）をとる場合が多い（山本ら、1985；田中ら、2004）。また河田ら（1994）によれば、日本海中部地震の際に、ほぼ 100% の漁業者や船主が地震発生後港に船舶の確認に向かったと報告されている。漁業者にとって漁船は非常に貴重な財産であるが、人命を第一に考えた場合、事前に設定した陸上避難場所または避難海域に速やかに避難することが極めて重要である。

近年、津波被害対策としてハザードマップの作成が各地域で進みつつある。しかし、これらのハザードマップは陸上の浸水域や避難場所を示したものが中心である。このため、海上の避難海域に関する検討を行うことは、津波に対する防災対策の重要な課題のひとつである。

そこで本研究では、津波による漁船等の小型船舶被害軽減を図ることを目的として、簡易的な避難海域の設定手法の提案を行う。また宮城県気仙沼湾をケーススタディとした津波シミュレーションを行い、その結果と比較することにより簡易的な避難海域設定手法の妥当性を検証する。さらに避難海域への移動の可否に関する検討、

近地津波を対象とした避難行動に関する考え方について提示する。

2. 小型船舶の安全な避難海域の条件

避難海域として必要な条件、すなわち小型船舶が津波来襲時に安全である条件は（1）碎波に巻き込まれて転覆や圧流されない水深（碎波が発生しない水深）であること、かつ（2）津波により生じる流れによって操縦不能となる限界流速以下であることとし、具体的には以下のように想定した。

（1）碎波が発生しない水深

岩瀬ら（2001）による水理実験の結果によると、津波の碎波点の波高と水深の関係は以下の式で示されると報告されている。

$$\frac{H}{h} = 0.83 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 H は碎波点の波高 (m)、 h は水深 (m) である。

また（社）全国漁港漁場協会（2003）では、有義波を対象としているが、碎波を以下の式で区分している。

$$\frac{H}{h} \leq 0.5 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 H は堤体前面波高 (m)、 h は堤体前面水深 (m) である。

以上より想定津波高さ（津波波高 = 2 × 津波高さ）の 4 倍以上の水深が、碎波が発生しない水深の目安となると考えられる。

（2）小型船舶が操舵不能になる限界流速

津波流速によって船舶が操舵不能となる限界流速についての知見は乏しく、特に漁船等の小型船舶に対する検討は殆ど見られない。日本海難防止協会（2003）による一般的貨物船（500 t 程度）に対する試算によれば、船速が津波流速の 5 倍以上であれば斜め 12 度の流向に対しても保船可能であると報告されている。

これを参考にすると、津波流速が 1 m/s 以下の場合、

1 正会員 理修 (財)漁港漁場漁村技術研究所
2 工修 水産庁漁港漁場整備部防災漁村課
3 正会員 工修 水産庁漁港漁場整備部防災漁村課
4 正会員 (財)漁港漁場漁村技術研究所
5 正会員 工修 (財)漁港漁場漁村技術研究所
6 工修 (財)漁港漁場漁村技術研究所

船舶速度が5 m/s (18.5 km/h : 約10ノット)程度あれば保船可能であり、小型船舶の場合は操船性が良いため保船は容易であると考えられる。小型船舶は10ノット程度で走行することは十分可能と考えられることから、ここでは小型船舶が操舵不能となる限界流速を1 m/sと想定する。

3. 避難海域水深の簡易的な設定方法

避難海域水深としては、例えば田中ら(2003)は20-30 m以深、佐藤(1984)は50 m以深、今村(2004)は200 m以深を推奨している。ここでは、対象地域に襲撃する沿岸域の津波波高に応じた避難海域の設定方法、すなわち一律の水深ではなく各地域で想定される津波高さから前述の避難海域の条件を満たす水深帯を簡易的に設定し、これを避難海域設定の目安とする方法を提案する。

各地域の想定地震に対する想定津波高さは、中央防災会議各専門調査会によって公開されている「海岸での津波高さ」が比較的容易に利用可能であるのでこれを用いる。

まず砕波が発生しない水深は、想定津波高さの4倍以上の水深が目安となる。例えば想定津波高さ3 mの場合、避難海域水深は約12 m以深と想定できる。

次に小型船舶が操舵不能になる限界流速以下となる水深を想定する。避難海域の水深における津波高さは、公表された沿岸域での津波高さから次のグリーンの式により推定する。

$$\eta h^{1/4} = \eta_1 h_1^{1/4} = \eta_2 h_2^{1/4} = \text{一定} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 η は津波高さ、 h は水深である。

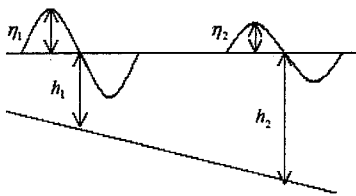


図-1 グリーン式概念図

中央防災会議各専門調査会の津波シミュレーションデータをみると、「海岸での津波高さ」は概ね水深10 m以下における結果である。そこで想定津波高さを水深10 mにおける津波高さとして仮定すると、グリーンの式を用いて各想定津波高さに対する津波高さ和水深の関係が得られる(図-2)。例えば、図-2より想定津波高さが3 mの場合、水深50 mの海域の津波高さは約2 mと推定される。

津波流速を式(4)の線形長波式を用いて水深とそこでの津波高さより推定すると、図-3に示す想定津波高さ

に対する水深と津波流速の関係が得られる。

$$U = \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 U は津波流速、 g は重力加速度である。

図-3より津波流速が操船不能となる限界流速以下となる水深以深の海域が避難海域と目安となる。限界流速を1 m/sとすると、例えば想定津波高さ3 mの場合には避難海域水深は42 m以深となる。

表-1に、図-3から求めた津波流速1 m/s以下となる水深と砕波が発生しない水深を示す。これを比較すると、避難海域水深の設定に際しては津波流速1 m/s以下となる水深が支配的な要因になると判断できる。

以上の方法より中央防災会議各専門調査会によって公開されている「海岸での津波高さ」を用いて簡易的に避難海域水深の設定が可能である。

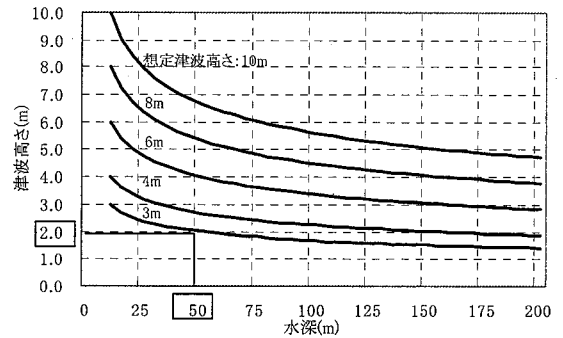


図-2 各想定津波高さに対する水深と津波高さの関係 (想定津波高さ：水深10 mでの津波高さ)

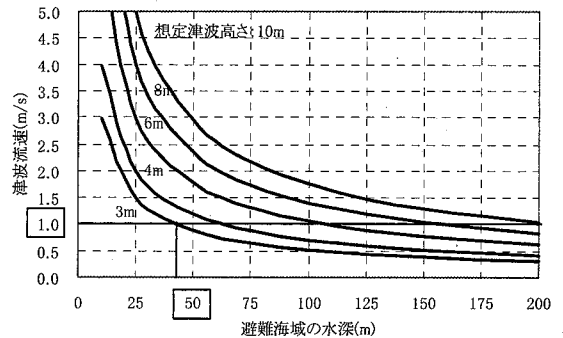


図-3 各想定津波高さに対する津波流速と水深の関係 (想定津波高さ：水深10 mでの津波高さ)

表-1 各想定津波高さに対する避難海域水深

想定津波高さ (m)	限界流速以下水深 (m)	砕波水深 (m)	避難海域水深の目安 (m)
3	42	12	50
4	63	16	70
6	108	24	110
8	158	32	160
10	212	40	220

4. 簡易的な避難海域設定方法の検証

宮城県気仙沼湾をモデル地区として、津波シミュレーションより得られた水位・流速に基づいて設定した避難海域と比較することにより提案した簡易的な避難海域設定手法の妥当性を検証した。

対象とした津波は、中央防災会議「日本海溝千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」によって気仙沼地区で大きな被害の発生が想定されている宮城県沖（連動）地震と明治三陸地震とした。津波シミュレーションは、以下に示す非線形長波理論式（ここでは、連続の式と x 方向の運動方程式を示す）を Staggered leap-frog 差分法で解く方法を用いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M \sqrt{M+N}}{D^{7/3}} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、η は水位変動、D は全水深、n は底面摩擦係数（マンニングの粗度係数）、g は重力加速度、(M, N) は水平方向の流量フラックスである。

主な計算条件を表-2 に示す。粗度係数は小谷ら(1998)に基づいた。

表-2 計算条件

空間格子サイズ	領域接続により 1350m, 450m, 150m, 50m, 10m				
計算時間ステップ	0.2 秒				
粗度係数	土地利用に応じて Manning の粗度係数で表現				
	水域	田畑	森林	市街地 (家屋密集率)	
				高密度 (100%)	中密度 (50-80%)
0.025	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08

図-4~5 に宮城県沖（連動）地震と明治三陸地震による津波最大流速を示す。図中の白色部分は津波最大流速 1 m/s 以下、すなわち避難海域を示している。宮城県沖（連動）地震では、流速 1 m/s 以下となる水深は約 50 m 以深である。この地震による気仙沼市周辺の想定津波高さは 4 m 程度であり、簡易的な手法で求めた避難海域水深（表-1 参照）とはほぼ同程度となる。一方、明治三陸地震規模の津波では、流速 1 m/s 以下となる水深は約 90 m 以深である。この地震による想定津波高さは 10 m 以上であり、簡易的な方法で設定した避難海域水深がより安全側の評価（過大評価）となっている。

以上より簡易的な避難海域水深の設定手法は、津波シミュレーションを用いて設定した方法と比較し安全側の評価になり、目安として十分に妥当と考えられる。

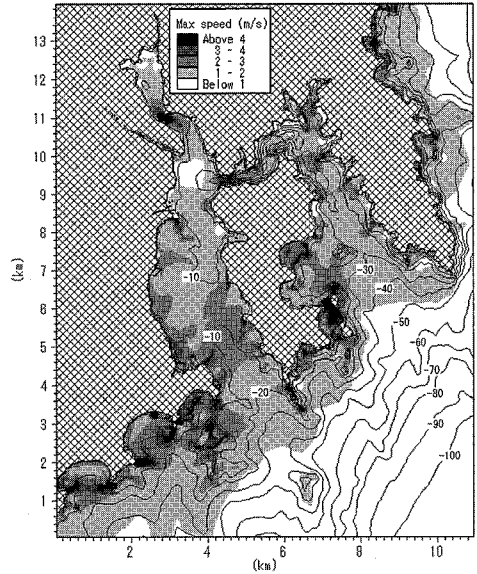


図-4 最大津波流速分布（宮城県沖（連動）地震）

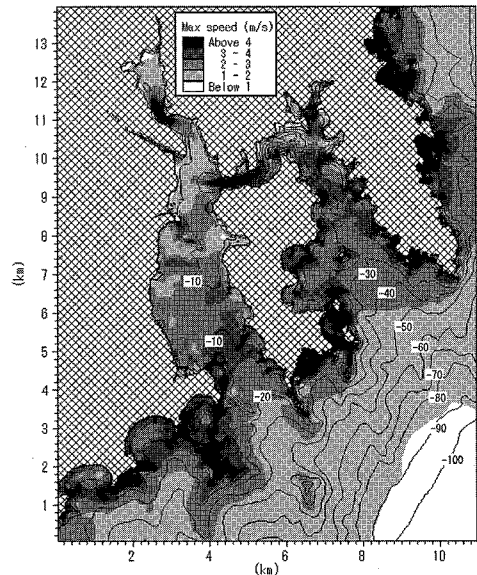


図-5 最大津波流速分布（明治三陸地震）

なお、図-4~5 より、岬の周辺や狭窄部では、他の水域に比べ早い流速が発生している。避難海域水深に深であっても、このような岬の周辺や狭窄部は避難海域としては避けるよう留意する必要がある。

5. 小型船舶（漁船）の海上避難の基本的な考え方

(1) 避難海域への移動時間

避難海域の設定に際しては、津波到達以前に避難海域に移動可能か否かを予め検討しておくことが重要である。ここでは、津波到達時間と避難海域へ移動状況について

モデルケースとして気仙沼湾の津波シミュレーション結果を用いて考察する。

図-6~7に気仙沼湾周辺の水深帯に、宮城県沖（運動）地震と明治三陸地震の津波到達時間を重ねたものを示す。また、表-3に小型船舶の速度別に、湾口部（A）、湾中央部（B）、湾奥部（C）から各避難海域（宮城県沖（運動）地震：水深50m，明治三陸地震：水深90m）

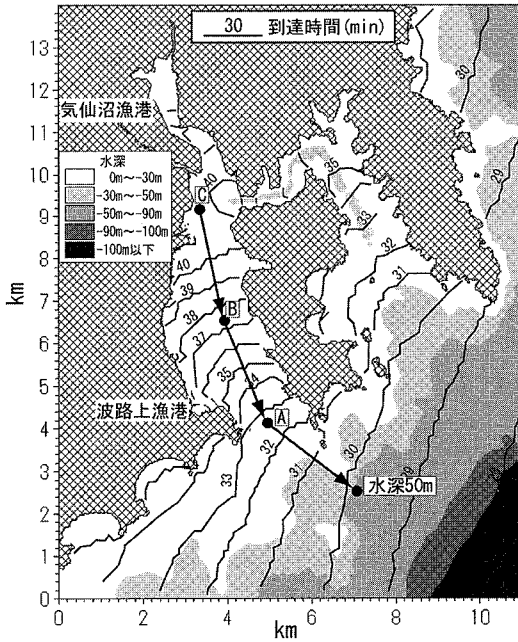


図-6 津波到達時間と水深帯（宮城県沖（運動）地震）

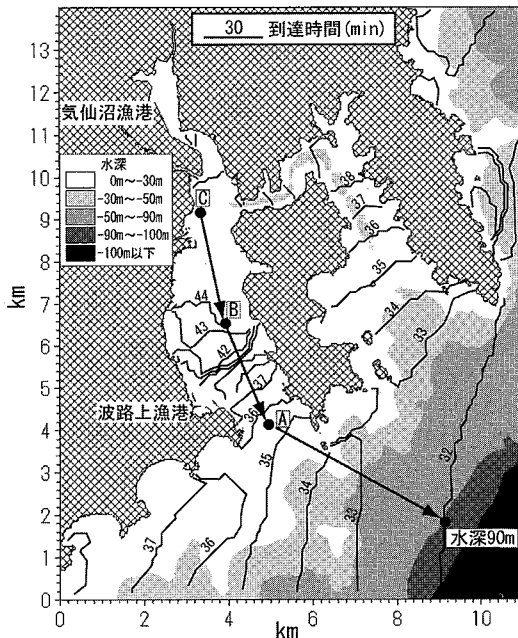


図-7 津波到達時間と水深帯（明治三陸地震）

までの移動に要する時間とシミュレーションによる津波到達時間との比較結果を示す。

移動速度 15 km/h で避難した場合、湾奥部（C）から避難すると避難海域に到着する前に津波に遭遇する危険性がある。さらに移動速度 15 km/h の場合は、避難海域に避難しても津波流速により操舵不能となる可能性もある。

なお、この移動に要する時間には、避難開始までの準備時間や情報伝達時間が考慮されていない。さらに、湾内で養殖などを行っている場合、それらが漂流物となり航路を塞ぐ可能性もある。

このように避難海域を設定した場合、各海域から避難海域までの移動時間を事前に把握するとともに、避難に関する様々な障害を検討しておくことも重要である。

表-3 小型船舶（漁船等）の避難時間の検証

船舶移動速度 (km/h)	航行地点	宮城県沖（運動）地震 （避難目安水深 50m）		明治三陸地震 （避難目安水深 90m）	
		距離 (m)	移動に要する時間 (分)	距離 (m)	移動に要する時間 (分)
50.0	A	2,500	3	4,500	6
	B	5,000	6	7,000	9
	C	7,500	9	9,500	12
30.0	A	2,500	5	4,500	9
	B	5,000	10	7,000	14
	C	7,500	15	9,500	19
15.0	A	2,500	10	4,500	18
	B	5,000	20	7,000	28
	C	7,500	30	9,500	38

※移動に要する時間は、船舶が移動している時間（避難開始までの情報伝達や準備に要する時間等は含まれない。）

（2）小型船舶（漁船）の津波来襲時の避難行動

以上の検討を踏まえ、小型船舶（漁船）のとるべき避難行動についての考え方を図-8に提示する。

地震時の漁船の状況を a) 港周辺もしくは沖合を航行している場合と b) 港内で停泊している場合に分けて考える。さらに人命を第一とした考え方に基づいている。

a) 港周辺もしくは沖合を航行している場合

地震発生後、港周辺もしくは沖合で航行している小型船舶は、まず津波に関する情報入手する。港周辺で航行し避難海域に移動した方が早い場合、または沖合で航行している場合は、直ちに避難海域へ移動する。避難海域が設定されていない場合、その目安は概ね水深 50 m 以深とし、大津波警報（高いところで 3 m 以上の津波が予測される）が発令された場合は、直ちにより深い海域へ避難する。沖へ避難した小型船舶は津波警報・津波注意報が解除されるまで岸や港へは近づかず、沖で待機する。

なお、気象庁から発表される沿岸部での津波高さから

沖合水深での津波流速を推定する場合についても今回示した考え方を準用して推定できると考えられる。

b) 港内で停泊している場合

地震発生後、漁業者及び船主は事前に設定された陸上の避難場所へ徒歩で避難する。港へ船舶を見に行かず、監視・係留補強・高所引き上げ等の作業、船舶による港外避難は行わないこととする。

これらの避難海域の設定を含めた避難行動のルール設定を行う場合、施設管理者・防災担当部局・漁業関係者などが一体となって協議会などを組織し、地理的条件など各地域の実情を勘案し事前に検討・周知することが重要である。それを通じて住民を含めた関係者が地域で想定される津波災害を認識し、滅災に繋がると考えられる。

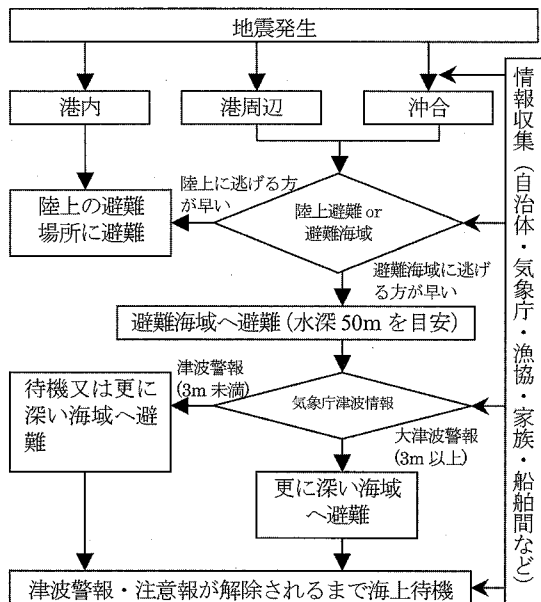


図-8 小型船舶の避難行動の基本フロー

6. 結語及び今後の課題

本研究で得られた主な結果を以下に列挙する。

- (1) 小型船舶の安全を確保するために避難海域設定の重要性を示し、中央防災会議各専門調査会による「海岸での津波高さ」を用いた簡易的に避難海域水深の設定する手法を提案した。
- (2) 簡易的手法と気仙沼湾での津波シミュレーション結果と比較し、その妥当性を確認した。津波高さが大きい場合、簡易的手法はより安全側の評価になることを確認した。

(3) 気仙沼湾における避難海域への到着可否を検討した結果、湾奥部の小型船舶は避難海域に到達する前に津波に遭遇して被災する可能性があることが確認された。

(4) 人命を第一に考えた小型船舶の避難に関する考え方として、港周辺もしくは沖合で航行している小型船舶は、避難海域に移動した方が早い場合は直ちに避難海域へ避難すること。沖へ避難した小型船舶は津波警報・津波注意報が解除されるまで沖で待機すること。港内で停泊している場合は港へ船舶を見に行かず船舶による港外避難は行わないことを提案した。

(5) 避難海域及び避難行動のルール設定は地域の実情を踏まえ関係者が協議し設定することの重要性を指摘した。今後の課題として、漁船など小型船舶の航行実態や操縦性能調査等による安全な海上避難の条件の精度向上、正確な情報を迅速かつ適切に船舶に伝達する方法の検討、さらに協議会を通じた地域における避難海域及び避難行動のルール設定手法の検討などが挙げられる。

謝辞：本研究は災害に強い漁業地域づくりガイドラインを策定するにあたり水産庁が設置した「漁業地域防災対策検討委員会」（委員長：今村文彦 東北大学大学院工学研究科 附属災害制御研究センター長）において検討された結果の一部である。ここに記して今村委員長はじめ委員会の委員及び関係者に感謝の意を表します。

参考文献

- 今村文彦(2004)：津波情報とその活用について、予防時報第218号、日本損害保険協会 pp. 8-12.
- 岩瀬浩之・深澤雅人・後藤智明(2001)：ソリトン分裂波の碎波変形に関する水理実験と数値計算、海岸工学論文集、第48巻、pp. 306-310.
- 河田恵昭・長谷川茂樹(1994)：地震津波警報の伝達と避難マニュアルについて、海岸工学論文集、第41巻、pp. 1186-1190.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998)：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法、海岸工学論文集、第45巻、pp. 356-360.
- 佐藤孫七(1984)：日本海中部地震津波と船舶（漁船・小型船）避難の一考察（その5）、水路第51号、日本水路協会、pp. 33-37.
- (社)全国漁港漁場協会(2003)：漁港・漁場の施設の設計の手引き 2003年度版、1008p.
- 田中亮平・河田恵昭・井上雅夫・原田賢治・高橋智幸(2004)：2003年十勝沖地震時における漁民の避難行動に関する実態調査、海岸工学論文集、第51巻、pp. 1301-1305.
- 土木学会(1986)：1983年日本海中部地震調査報告書、933p.
- 日本海難防止協会(2003)：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.
- 山本正昭・中山哲蔵・坂井淳・三橋宏次(1985)：日本海中部地震津波による漁港内の漁船被害、第32回海岸工学講演会論文集、pp. 460-464.