

沿岸防災施設による 津波時の人的被害軽減効果について

MITIGATION EFFECT UPON TSUNAMI CASUALTIES DUE TO COASTAL
DEFENSE FACILITIES

西畑 剛¹・森屋陽一²・田村 保³

Takeshi NISHIHATA, Yoichi MORIYA and Tamotsu TAMURA

¹正会員 修 (工) 五洋建設 (株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 博 (工) 五洋建設 (株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

³正会員 M. S. 五洋建設 (株) 本社土木部門土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

As to estimate the effect of the coastal defense facilities against tsunami disaster, the simulations for both tsunami inundation and evacuation applying to the case of the bay Kesenuma were conducted to evaluate the number of the casualties caused by tsunami quantitatively in this study. The facilities expected to prevent the tsunami disaster are composed of the water gates, parapets and level raising of quaywalls which have been already constructed at the location or are experimentally introduced in the simulation.

After calculating a time series of the inundation height and water particle velocity for each case, we applied the results to the evacuation simulation and evaluated the number of casualties for various ages and various starting time of the evacuation. Finally, assuming the probability density function on the starting time of the evacuation from tsunami and population ratio about ages at the area, we successfully obtained the expected number of the casualties in case the coastal defense facilities are disposed or not, and verified the mitigation effect of such constructions.

Key Words : Tsunami, evacuation, mitigation, coastal defense facility

1. はじめに

津波から沿岸域における資産や人を守るための方策として、沿岸防災施設 (いわゆるハード) による対処と警報やハザードマップの整備・周知といった情報 (いわゆるソフト) による対処の両方が必要とされている。

沿岸域背後資産を津波による浸水被害から守るためには、防波堤や防潮堤、水門といったハードによる直接的な対処が有効である。例えば加藤他¹⁾は、モルディブ・マレ島周囲に建設された護岸が2004年に発生したインド洋大津波時に島内への津波浸水範囲を軽減させたことを示している。また建設効果に関しては、豊田他²⁾が浸水範囲と資産分布を重ね合わせることでB/Cによる評価を試みている。

一方で人命を津波から守るためには、津波警報の伝達時間や避難所周知状況、避難者の津波に対する知識などソフト面による影響が大きく出ると考えられる。そのため防護施設建設 (ハード) による人的被害軽減という観

点に対しては、施設建設に伴い変化する浸水範囲と浸水域人口分布の重ね合わせに留まらず、陸上での浸水開始時間や浸水高・流速といった外力時系列とソフト面の影響を受けた人間の避難行動を組み合わせた評価、すなわち避難シミュレーションを実施することが必要と考える。

本研究では年齢や避難開始時間をパラメータとして、岸壁の高上げや水門などの設定により人的被害がどれだけ軽減されるか (あるいは逆効果か) をシミュレーションによって算定する。そして検討地点において沿岸防災施設が果たす人的被害軽減効果の定量化を試みる。

2. 浸水シミュレーション

本研究は宮城県気仙沼市大川北部地区をモデルとして検討を行った。当地区は気仙沼湾奥大川左岸側に位置し、人口の多い地域であり、沿岸部は埋立て埠頭として利用されている。図-1に検討位置を示す。

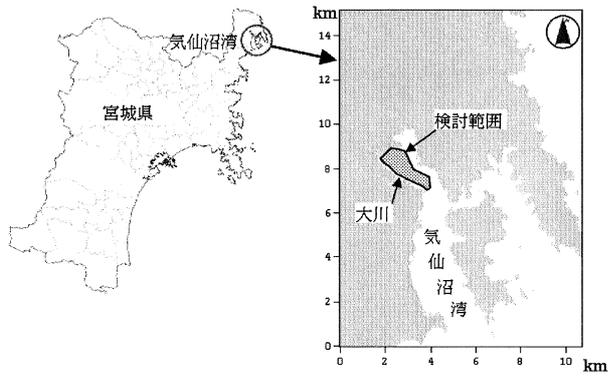


図-1 検討位置

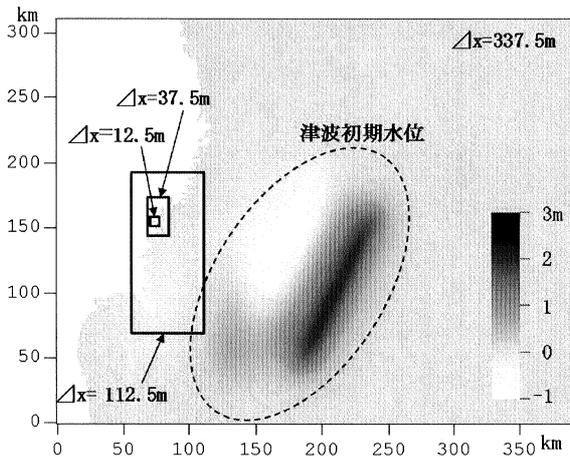


図-2 初期水位分布および計算領域と空間格子間隔

(1) 浸水シミュレーション概要

津波浸水は数値計算により検討した。まず想定地震として検討地点で大規模な浸水が予測される運動型宮城県沖地震を採用した。計算では宮城県防災会議地震対策専門部会³⁾による断層パラメータに対してアスペリティを考慮しないパターンを考え、Mansinha & Smylie⁴⁾の手法に従って静的に海底地盤変位を計算し、これを初期水位として与えた。なお潮位はTP+0.75m（朔望平均満潮位）とした。津波の伝播は深海域では線形長波理論を、検討域近傍の浅海域では非線形長波理論を適用し、スタaggerドリープフロッグ法により計算した。また空間格子は検討領域が近づくにつれ間隔 Δx を細かくし、最終的には12.5mで地形を再現した。なお検討範囲では小谷他⁵⁾に従った粗度設定および遡上計算を行っている。図-2に地震による初期水位分布計算結果および計算領域と空間格子間隔 Δx を示す。

(2) 沿岸防災施設配置

検討地点においては大川左岸にはパラペット堤防が、朝日埠頭背後には胸壁が既に配備されている（図-3）。数値計算に際し、最終領域（12.5m格子領域）において胸壁は全て閉まっているものとし、また区域毎に岸壁高さは決まっているので、これを反映させた形で地形を作成した。それに加えて対策工として、田村他⁶⁾を参考に湾

表-1 想定対策工

想定ケース	対策工A	対策工B	対策工C
1	-	-	TP+2.29m(現状)
2	-	-	TP +4m
3	TP +4m	TP +4m	TP +4m
4	-	-	TP +5m
5	TP +5m	TP +4m	TP +5m

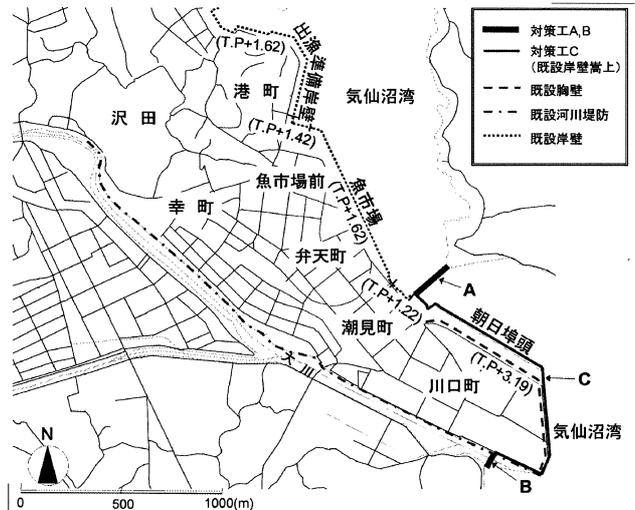


図-3 防護施設配置

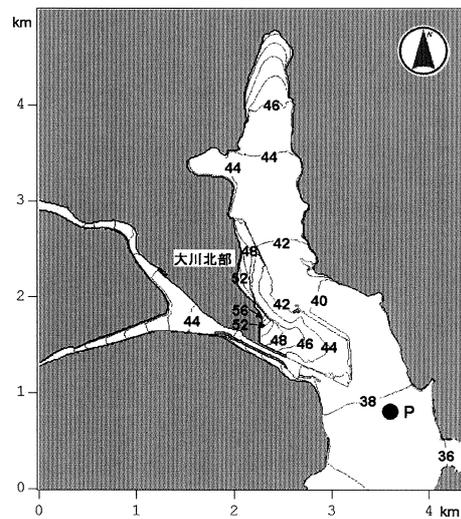


図-4 第1波到達時間（単位：分）

狭窄部と大川河口に例として水門（対策工A,Bとする）を、その間の朝日埠頭岸壁に嵩上げ工を施した場合を（対策工Cとする）想定した。表-1に想定ケース1~5と対策工高さを示す。なお対策工は計算上、ケース毎に表に示す天端高を対応する格子へ標高として与えることによって表現している。そのため本検討結果は構造物種類を特定のもの（水門や嵩上げ工）にだけ制限するものではないことを付記する。

(3) 浸水計算結果

浸水計算結果としてケース1に対する第1波到達時間（地震発生から+1cm以上の押し波到達時間）を図-4に示

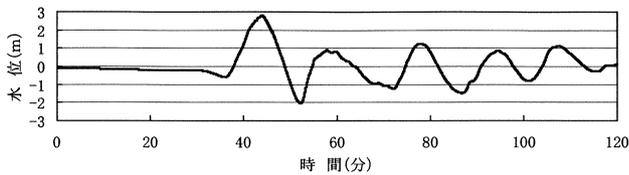


図-5 水位時系列 (P地点)

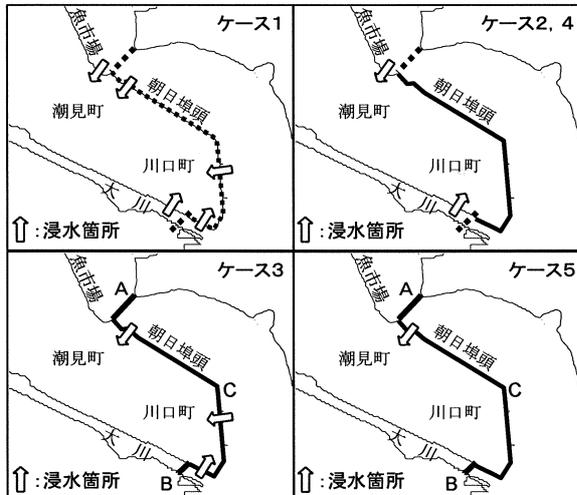


図-6 浸水箇所

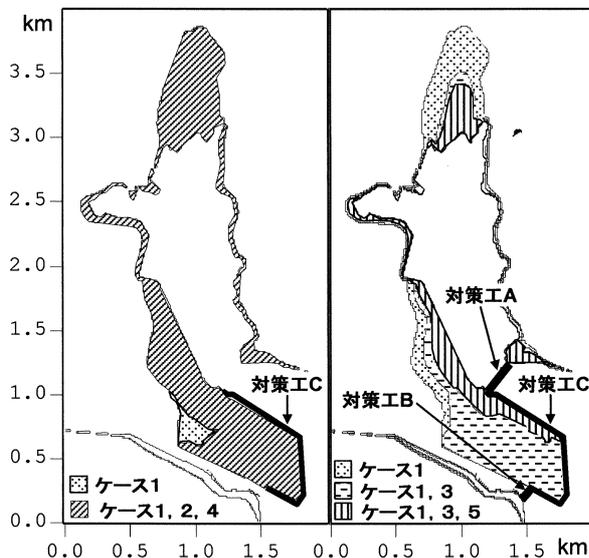


図-7 浸水範囲 (左: ケース1, 2, 4, 右: ケース1, 3, 5)

す。検討領域沿岸へは40分前後で津波が到達し、大川北部では魚市場南の低天端岸壁から最初に浸水している。なお地点Pにおける計算水位時系列を図-5に示すが、第1波で最大水位となっており、その後およそ15分周期で津波が襲来している。最後に各ケースの津波による浸水箇所(大川北部)を図-6に、浸水範囲(湾奥全体)を図-7に示す。ケース1(対策工なし)では大川北部や湾奥に広範囲に浸水が見られる。ケース2, 4では津波が対策工Cを直接越流することは無かったが、魚市場南の低天端岸壁を乗り越えた津波は朝日埠頭を周り込むように浸水し、また大川左岸堤防の対策工Cが施されていない箇所から

も浸水する。そのため検討地点における浸水範囲はケース1と比べて若干減少するものの大差ない。またケース2, 4の越流箇所およびその天端高は同じため、両ケースの浸水域はほぼ同じとなった。ケース3では対策工Aより湾奥では浸水範囲が減少しているが、各対策工の前面で重複波となって増幅した津波が対策工を乗り越えて流入したため、検討地点における浸水範囲はあまり減少しない結果となった。ケース5は、対策工A(天端高+5m)および対策工B(天端高+4m)設置によりそれら背後からの浸水を抑えられたことに加え、対策工Cの天端高も+5mとしたことによりケース3における浸水要因であった重複波による越流も対策工A前面脇からのみと減少した。そのため川口町・潮見町における浸水が著しく抑えられており、対策工による被害軽減効果が最も期待できるケースと考えられる。

3. 避難シミュレーション

(1) 避難シミュレーションの概要

避難シミュレーションは先行研究⁷⁾に準拠したシステムを用い、ランダムに配置した避難者(1000人)がノード・リンク街路をポテンシャルモデルに従って避難することにより行った。なお今回は以下に述べる項目を修正・追加して検討した。

- 避難所を2005年4月に気仙沼市が指定した場所へ変更した。図-8に今回検討した避難所位置・避難者初期位置などの配置を示す。
- 非浸水時の避難速度は津波対策推進マニュアル検討報告書⁸⁾、浸水時の避難速度・避難可否判定は西畑他⁹⁾による水位と流速の関数とした設定に従い、年齢別・男女別に検討を行った。表-2に検討した年齢層、性別およびそれに付随する歩行速度、安全率を示す。なお、女性の非浸水時の歩行速度は引用文献に記載が無いため男性の平均歩行速度とした。
- 危険道路を図-8太線の通り設定可能とした。検討ケー

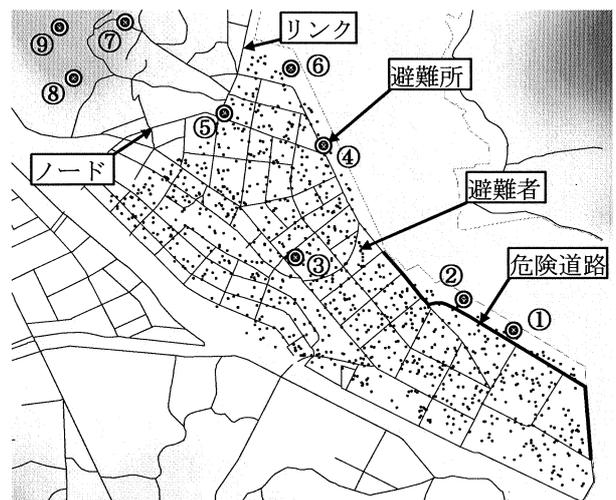


図-8 避難シミュレーション配置図

表-2 年齢性別による避難条件

年齢	性別	非浸水時		浸水時	
		歩行速度 (m/s)	歩行速度	安全率	
20～29	男	0.87	水位・流速 の関数	2.39	
30～39	男	1.47		2.50	
40～49	男	1.03		2.50	
50～59	男	0.68		2.70	
60～	男	0.58		2.83	
-	女	1.03		2.83	

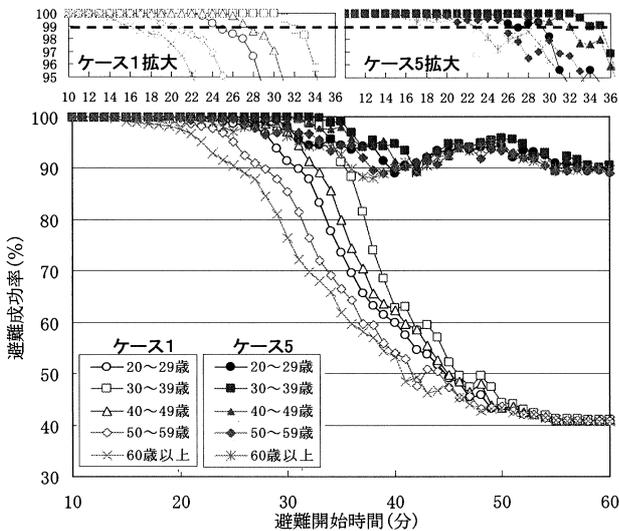


図-9 避難成功率 (年齢別)

スによってはこの道路中のノードが有するポテンシャル値 (負値) を1/10とすることにより、避難所①・②を選択する避難者を減らして計算ができるようにした。

(2) 避難シミュレーション結果

各ケースについて避難開始時間を地震発生後0～60分まで1分毎に変化させ、各年齢層別・性別に計算した。例としてケース1,5について年齢を変えた結果を図-9に示す。ケース1については避難開始時間が60歳以上の年齢層で16分以降、30歳代でも32分以降から1%以上の被災者が始まっており、避難開始が地震発生から遅くなるにつれて避難成功率が40%近くまで低下することがわかる。

一方、ケース5では1%以上の被災者が始まる時間帯は60歳代で23分以降、30歳代では34分以降と特に災害弱者である高齢者において避難開始時間に余裕が出ている。さらにその後の避難成功率も90%程度までしか低下せず対策工の人的被害抑制効果が表れている。

次に60歳以上の全ケースについて検討した結果を図-10に示す。ケース2に対して対策工Cを+1m高くしたケース4は、浸水箇所・時間・浸水範囲がケース2とほぼ一致するため避難成功率もほとんど変わらず、施工コストに見合わない。またケース2の対策工Cに加えて対策工A,Bを加えたケース3は、避難開始時間が47分までの間、ケース2に比べて逆に避難成功率が下がっている。これは主に対策工A前面の朝日埠頭 (対策工C) からの溢水に

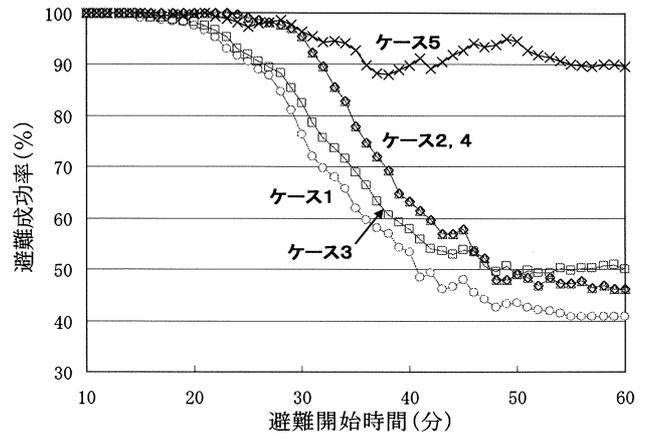


図-10 避難成功率 (60歳以上, 対策工別)

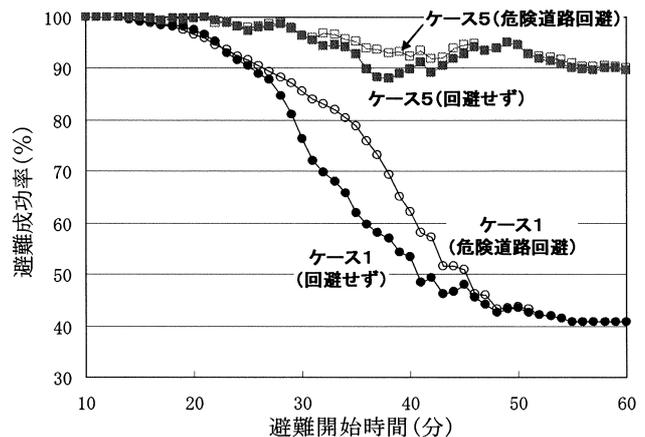


図-11 避難成功率 (60歳以上, 危険路回避有無)

より被災者が多くなるためであり、湾奥部の浸水域を減少させた対策工Aは、大川北部においては逆に津波ハザードを増加させたことを意味する。それに対して対策工AとCの天端高をさらに+1m上げたケース5では避難成功率が著しくあがっている。想定する津波に対して適切な規模の対策工を適切に配置することの重要性が示唆される。

なお、ケース5に関しては避難開始時間40分付近に各年齢とも避難成功率の極小値が現れている。これは丁度この時間帯に避難所①および②を目指して避難を開始した場合、対策工Aの脇から浸水した第一波津波に巻き込まれる避難者が多いためである。そこで地域防災教育などによる避難者意識の向上や避難標識の整備などによってこうした海側危険路を最初から選択しない避難者の出現を想定し、図-8に示した危険道路を導入した計算を60歳以上男性について行った。図-11にケース1,5について危険道路を考慮しなかった場合との比較結果を示す。ケース1 (現状) に関しては避難開始時間30分から40分にかけて大幅に被災者が減り、ケース5においても避難成功率の極小値出現はほぼ解消されて避難成功率が上昇していることがわかる。

4. 被災者数の算定

(1) 期待避難開始時間

前章で避難開始時間別の避難成功率を算定した。しかしながら現地における実際の避難開始時間は、地震発生時刻や震度、避難警報発令時間、避難者意識などによって異なってくると考えられる。早川・今村¹⁰⁾は数量化理論Ⅰ類を用いて地震発生、警報発令、第一波到達といったカテゴリ別に避難開始を行う人口割合を推定している。表-3に彼らが気仙沼市において行ったアンケート調査から推定したイベント毎の避難率（夜間）を示す。

本検討ではこの推定値を基に、以下に述べる仮定を設けて避難開始時間に関する確率密度分布を求めた。

表-3 カテゴリ別避難率

全体に対する避難率(%)			
1.地震発生	2.津波警報発令	3.津波の到達	4.避難しない
57.0	21.2	8.5	13.3

表-4 イベント発生時間、標準偏差および期待値

カテゴリ	発生時間(分)	標準偏差(分)	期待値(分)
1.地震発生	2.5	1	7.5
2.津波警報発令	5.5	1	8.5
3.津波の到達	38.0	1	40.0
4.避難しない	42.0	3	47.0

表-5 発生時間と期待値の設定根拠

カテゴリ	定数	設定根拠
1	t_0	検討地点と震央距離(約100km)÷S波速度(0.7km/h)≒2分30秒
	E	中央防災会議資料 ¹¹⁾ より地震動のおさまる5分後
2	t_0	気象庁警報発令目標が地震による揺れから3分以内
	E	警報発令から準備に3分
3	t_0	最大波押し初動
	E	押し初動から浸水開始の中間となる時間
4	t_0	検討地点への浸水開始時間
	E	浸水開始から浸水面積が最大となった時間の中間

a) 確率密度関数は次に記す対数正規分布とし、カテゴリ毎に設定する。

$$f(t+t_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(\log t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (t > t_0) \quad (1)$$

$$0, \quad (t < t_0)$$

b) 各カテゴリに対する密度関数はイベント発生時間 t_0 、標準偏差 D および期待値 E を表-4の通りに定めて決定した。なお(1)式中の係数 σ 、 μ は、標準偏差および期待値から次の通り求められる。

$$\sigma = \sqrt{\ln\left(\frac{D^2}{E^2} + 1\right)}, \quad \mu = \ln\left(\frac{E^2}{\sqrt{D^2 + E^2}}\right) \quad (2)$$

ここで表-4のようにイベント発生時間、標準偏差の設定した理由を表-5に記す。但し、ここではケース1による津波浸水を基に時間設定を行っている。

c) 全体に対する確率密度関数は、カテゴリ別確率密度関数に予め表-3の割合を付加して足し合わせることで次の通り与える。ここで f_n は n 番目のカテゴリに対する確率密度関数を表す。

$$f(t) = 0.570f_1(t) + 0.212f_2(t) + 0.085f_3(t) + 0.133f_4(t) \quad (3)$$

なお標準偏差は各ケースとも t_0 と E の差が最小2~5分であることから1分とした。但し、カテゴリ-4「避難しない」の場合は浸水してから避難すると考えられるが、浸水時間は場所によっておよそ42分から56分と開きがあるため、分散を大きくするため標準偏差は3分とした。

以上により検討地点において避難時間に対して設定した確率密度分布を図-12に示す。参考のため、地点P(図-4参照)における水位変動を併記した。

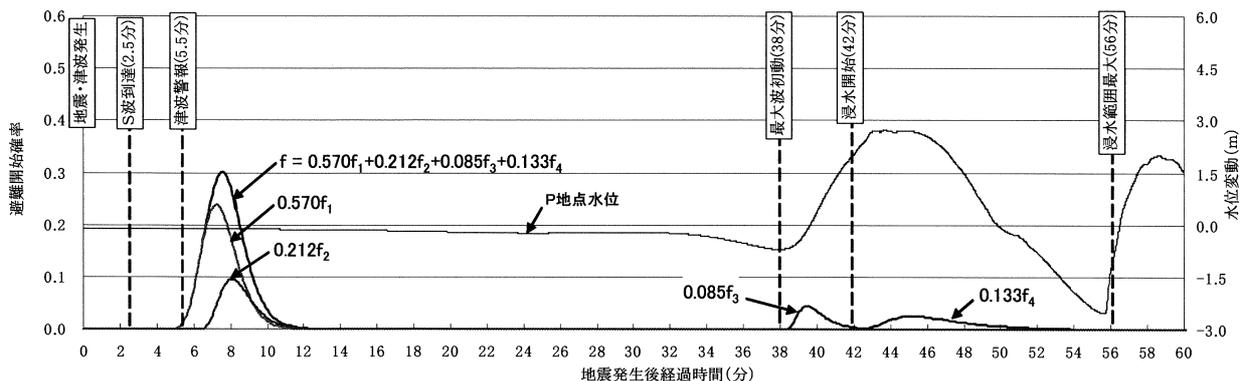


図-12 確率密度分布

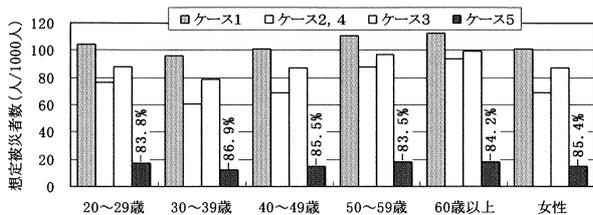


図-13 想定被災者数（年齢別・ケース別）

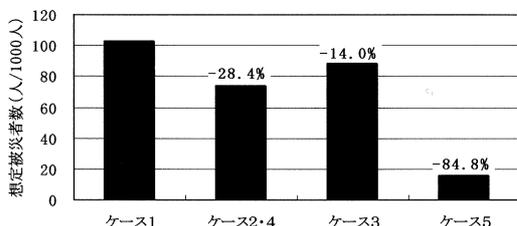


図-14 想定被災者数（地域全体ケース別）

(2) 想定被災者数

想定される被災者数 CT は、避難開始時間別被災者数を $n(t)$ とするとその時刻における避難開始確率密度関数を用いて次の通り表される。

$$CT = \int n(t)f(t)dt \approx \sum_{t=1}^{60} n(t)f(t)\Delta t \quad (\Delta t = 1 \text{ min}) \quad (4)$$

(4)式より年齢毎に各ケースの想定被災者数を計算した結果を図-13にまとめる。また図-14に年齢人口比率（宮城県，平成15年度国勢調査）を割り当てたケース別想定被災者数を示す。なお両図中の数字はケース1に対する被災者数低減率を表す。ケース5では85%程度もの人的被害軽減効果が見込まれる。

以上の検討によって沿岸防災施設建設による人的被害軽減効果を検証することができた。避難開始時間に関する確率密度分布の設定に当たっていくつかの仮定を設ける必要があるが、本手法によって人的被害を地域実情に応じた形で定量的に把握することが可能である。

最後に3章(2)節でも触れたが、危険道路を回避した場合は $t=40$ 分前後における $n(t)$ が改善すること、そもそも警報発令直後に避難した場合はほとんど避難可能であることから、沿岸防護施設に加えて地域防災教育などを通じた啓発活動によって、検討域における被災者数をさらに減少させることが期待できることを付記する。

5. まとめ

本研究では沿岸防護施設が果たす人的被害抑制効果を検討した。研究を通して以下のことがわかった。

- (1) 避難開始時間をパラメータとして、年齢・性別、対策工別に避難シミュレーションを行った。その結果、効果的な沿岸防護施設配備は、全体的に避難成功率を上昇させ、特に災害弱者である高齢者の避難開始時間に余裕をもたせる効果があることがわかった。
- (2) 時間を変数とした避難開始確率密度関数を導入することにより、検討地点において最終的に想定される被災者数を算定し、沿岸防護施設による被害軽減率を定量化した。本手法は他地点における応用も期待できる。
- (3) 沿岸防護施設（ハード）に加え、地域防災教育などソフトによる対策を併用することにより、本検討域における津波防災は万全となることが期待できる。

謝辞：本研究は気仙沼沿岸防災研究会における活動の一環として行った。研究会メンバーである東北大学の今村教授および気仙沼市総務部危機管理室の方々からは研究に関するアドバイスや検討地域の防災に関する情報をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 加藤史訓，福濱方哉：津波遡上に及ぼす護岸の効果，土木技術資料，47-10，2005。
- 2) 豊田泰晴，今村文彦，佐藤健一，佐々木洋之：地震長期確率を組み入れた津波防災事業の定量的評価に関する研究，土木学会地震工学論文集，2003。
- 3) 宮城県防災会議地震対策専門部会：宮城県沖地震被害想定調査に関する報告書，2004。
- 4) Mansinha, L. and D.E.Smylie: The displacement fields of inclined faults, *Seismol. Soc. Amer.*, Vol.61, pp.1433-1440, 1971.
- 5) 小谷美佐，今村文彦，首藤伸夫：GISを利用した津波遡上計算と被害推定，海岸工学論文集，第45巻，pp.356-360，1998。
- 6) 田村 保，日根野聰弥，西村敬一，舘 憲司：津波水門の提案，海洋開発論文集，第20巻，pp.167-172，2004。
- 7) 西畑 剛，森屋陽一，田村 保，瀧本浩一，三浦房紀：気仙沼地点における津波避難シミュレーション，海洋開発論文集，第21巻，pp.163-168，2005。
- 8) 津波対策推進マニュアル検討委員会：津波対策推進マニュアル検討報告書，p.38，2002。
- 9) 西畑 剛，森屋陽一，田村 保，瀧本浩一，三浦房紀：津波浸水時の避難条件に関する実験的研究，海岸工学論文集，第52巻，pp.1256-1260，2005。
- 10) 早川哲史・今村文彦：津波発生時における避難行動開始モデルの提案とその適用，自然災害科学，21-1，pp.51-66，2002。
- 11) 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」：日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会報告，巻末資料5，2006。