

避難シミュレーションと その津波防災対策への適用

平成17年11月16日
五洋建設株式会社

津波防災対策の特殊性

- 広域で大災害となる可能性が高い。
津波対策が必要となる海岸延長が長い
ハードの施設整備に時間とコストがかかる
- 発生頻度は高くない。
住民の防災意識が薄れる
- 繰り返し発生する可能性が高い。
過去の津波経験から学ぶことが多い

津波防災対策とその評価

- ハード対策
防潮堤、防波堤、水門
- ソフト対策
避難施設、津波予報・警報システム
- 対策効果の評価
津波被害低減効果(資産被害、人的被害)

津波被害の想定

- 資産被害想定
津波浸水シミュレーション結果
資産分布
GISを利用した資産被害想定
- 人的被害想定
過去の津波被害経験から人的被害を想定
ソフト対策の評価は困難

津波による人的被害想定

- 地下街やイベント会場での火災時などの緊急時の群集避難行動を再現するシミュレーション手法を津波避難に活用
- 住民の津波防災意識のレベルを考慮した群集避難行動シミュレーションが可能
- ハード・ソフト一体となった津波防災対策効果を人的被害の観点から評価可能

避難シミュレーション手法

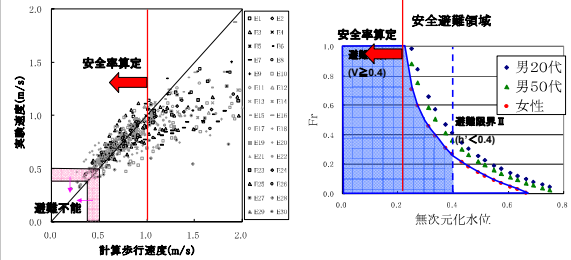
- ノード(交差点)とリンク(道路)で避難空間をモデル化
- ポテンシャルモデルで避難行動をモデル化
- 住民の避難開始時間、防災意識などを考慮
- 津波浸水シミュレーション結果から浸水深と流速を取り込み、人的被害を評価
- 浸水時の歩行速度、避難可否の判断が課題

水路歩行実験

- 津波浸水時の歩行速度と避難可否条件の設定



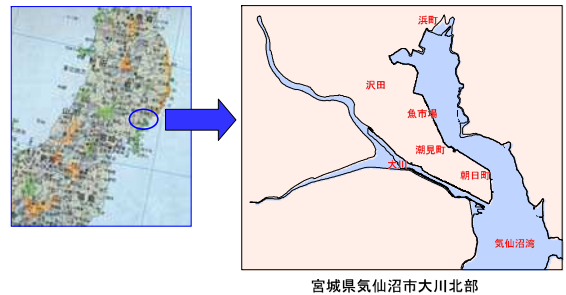
水中歩行実験結果



津波防災対策による被害低減

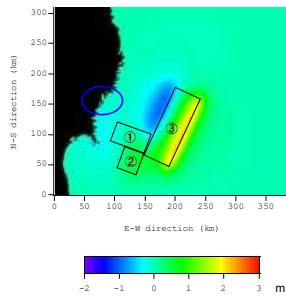
- ハード・ソフト対策の対策効果
- 避難シミュレーションにより求まる人的被害の低減から評価可能
- 特にハード施設整備の対策効果についての事例を紹介
- 対象地点: 気仙沼市

検討ケース: 対象地点



宮城県気仙沼市大川北部

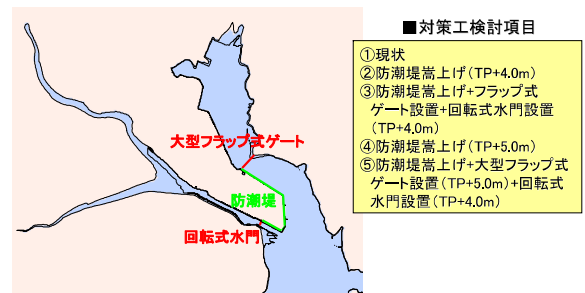
想定地震



- 地震: 想定運動型宮城県沖地震
- 計算潮位: HWL TP+0.75m
- 出力水位: 初期水位を±0mとして表示
- 計算時間: 地震発生から2時間まで

※浸水計算手法および結果詳細は別紙を参照ください。

対策工検討項目

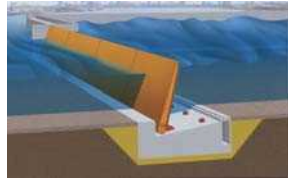


- ①現状
- ②防潮堤高上げ(TP+4.0m)
- ③防潮堤高上げ+フラップ式ゲート設置+回転式水門設置(TP+4.0m)
- ④防潮堤高上げ(TP+5.0m)
- ⑤防潮堤高上げ+大型フラップ式ゲート設置(TP+5.0m)+回転式水門設置(TP+4.0m)

対策工のイメージ



回転式水門写真



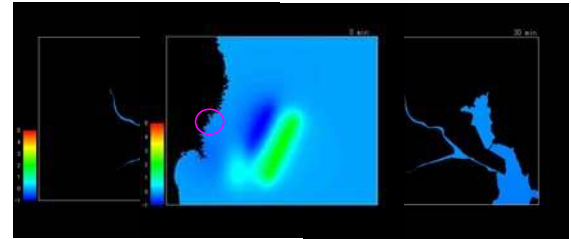
フラップ式ゲート模式図

浸水シミュレーション結果

現状

V.S

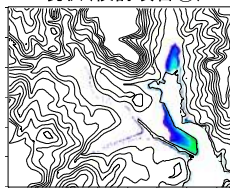
防潮堤嵩上げ+大型フラップ式
ゲート設置(TP+5.0m)+回転式
水門設置(TP+4.0m)



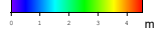
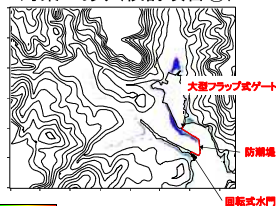
浸水シミュレーション結果の例

浸水域比較

現状(検討項目①)



対策工あり(検討項目⑤)



避難シミュレーションの設定

避難者数: 1000人(ランダム配置)
避難者: 30歳男
避難速度・可否: 水位・流速

対策工①~⑤
避難開始時間: 40分 / 45分
避難場所: 5箇所(高台) / 6箇所
道路閉塞: 有 / 無

避難シミュレーションの検討ケース

■ 検討一覧

No	対策工	避難開始時間	避難所	道路閉塞
Case1	①	40	5箇所	無
Case2	②	"	"	"
Case3	③	"	"	"
Case4	④	"	"	"
Case5	⑤	"	"	"
Case6	①	45	5箇所	無
Case7	⑤	"	"	"
Case8	①	40	6箇所	無
Case9	⑤	"	"	"
Case10	①	40	5箇所	有
Case11	"	"	"	"
Case12	"	"	"	"
Case13	⑤	"	"	"
Case14	"	"	"	"
Case15	"	"	"	"

対策工

- ①現状
- ②防潮堤嵩上げ(TP+4.0m)
- ③防潮堤嵩上げ+フラップ式ゲート設置+回転式水門設置(TP+4.0m)
- ④防潮堤嵩上げ(TP+5.0m)
- ⑤防潮堤嵩上げ+大型フラップ式ゲート設置(TP+5.0m)+回転式水門設置(TP+4.0m)

避難所位置



避難シミュレーション結果Case1

■ Case1

対策工①: 現状
避難開始時間: 40分
避難場所: 5箇所
道路閉塞: 無



避難シミュレーション結果Case5

■ Case5

対策工⑤
 避難開始時間: 40分
 避難場所: 5箇所
 道路閉塞: 無



避難シミュレーション結果Case11

■ Case11

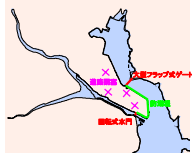
対策工①: 現状
 避難開始時間: 40分
 避難場所: 5箇所
 道路閉塞: 有



避難シミュレーション結果Case13

■ Case13

対策工⑤
 避難開始時間: 40分
 避難場所: 5箇所
 道路閉塞: 有



避難シミュレーション結果(まとめ)

■ 検討結果一覧

	対策工	避難開始時間	避難所	街路閉塞	成功者	失敗者
Case1	①	40	5箇所	無	743	257
Case2	②	"	"	"	735	265
Case3	③	"	"	"	798	202
Case4	④	"	"	"	735	265
Case5	⑤	"	"	"	907	93
Case6	①	45	5箇所	無	595	405
Case7	⑤	"	"	"	841	159
Case8	①	40	6箇所	無	727	273
Case9	⑤	"	"	"	953	47
Case10	①	40	5箇所	有	738	261
Case11	"	"	"	"	647	353
Case12	"	"	"	"	744	256
Case13	⑤	"	"	"	985	15
Case14	"	"	"	"	855	138
Case15	"	"	"	"	938	62

対策工

- ① 現状
- ② 防潮堤嵩上げ (TP+4.0m)
- ③ 防潮堤嵩上げ+フラップ式ゲート設置+回転式水門設置 (TP+4.0m)
- ④ 防潮堤嵩上げ (TP+5.0m)
- ⑤ 防潮堤嵩上げ+大型フラップ式ゲート設置 (TP+5.0m)+回転式水門設置 (TP+4.0m)

避難所位置



まとめ

- 津波浸水時を模擬した水中歩行実験結果から歩行速度、避難可否条件を求めた。
- 津波浸水時の住民の避難行動を予測する避難シミュレーション手法を開発した。
- 避難シミュレーション手法により求まる人的被害の予測結果から、ソフト・ハード対策による対策効果を評価することが可能となった。

地震長期評価を組み入れた津波防災事業の 定量的評価に関する研究

豊田泰晴¹・今村文彦²・佐藤健一³・佐々木洋之⁴

¹五洋建設株式会社 土木設計部主任 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)
E-mail: Yasuharu.Toyota@mail.penta-ocean.co.jp

²東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)
E-mail: imamura@tsunami2.civil.tohoku.ac.jp

³気仙沼市総務部総務課 危機管理室室長補佐 (〒988-8501 宮城県気仙沼市八日町1-1-1)
E-mail: satooc45@rose.ocn.ne.jp

⁴五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)
E-mail: Hiroyuki.Sasaki@mail.penta-ocean.co.jp

近年、社会資本整備の効率性や透明性に対する要求が高まりをみせており、この傾向は津波防災事業においても例外ではない。津波防災事業の効果を定量的に評価するためには、対象津波に対する精度の高い被害推定手法の確立に加えて、津波の発生確率を評価することが必要であるが、これまでその評価は十分でなかった。本論文は、地震活動の長期評価の考え方を組み入れることで、津波の発生確率を評価する新しい津波防災事業効果の定量的評価方法を提案するものである。本提案に基づいた津波防災事業効果の定量的評価を、宮城県気仙沼市を対象に実施した結果を例として報告する。

Key Words : Tsunami, Risk analysis, Long-term probability, Geographic Information System, Numerical simulation

1. はじめに

近年、社会資本整備の効率性や透明性に対する要求が高まりをみせている。このような要求の高まりは津波防災事業に関しても例外ではなく、事業主体はより戦略的な防災計画の構築やその評価手法を模索している。

戦略的な防災計画を構築するためには、現状での津波被害に対して、被害額だけではなく、地域別の被害率や資産別の被害率を分析することが重要である。一方、津波防災事業の効果を定量的に評価するためには、対象津波に対する精度の高い被害推定手法の確立に加えて、津波の発生確率を評価することが必要である。しかし、このように津波の発生確率を考慮した上で詳細な被害分析を行い、その結果を防災計画の構築に応用させる考え方はこれまで十分ではなかった。本論文は、地震活動の長期評価の考え方¹⁾を用いて津波発生確率を算出し、GIS（地理情報システム）と津波・浸水シミュレーションを用いて、津波防災事業の効果を定量的に評価する新手法を提案するものであり、宮城県気仙沼市におけるケーススタディの結果を報告する。

2. 津波防災事業評価手順

津波防災事業評価は GIS（地理情報システム）と津波・浸水シミュレーションを用い、図 1 に示す手順で行う。

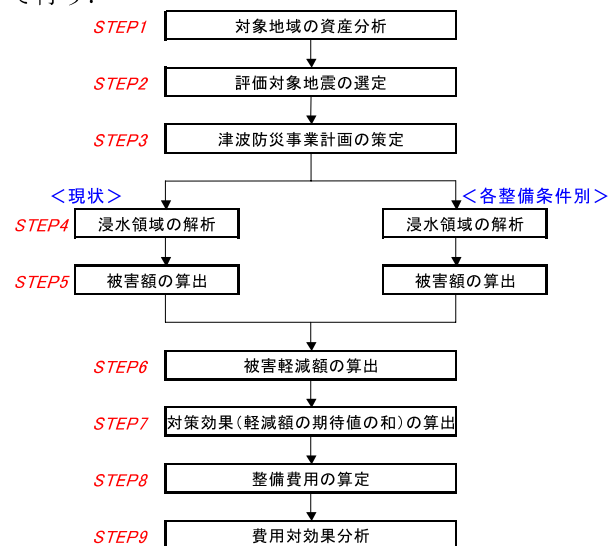


図-1 津波防災事業評価手順

3. 対象地域の資産分析

本検討では評価資産として、人的資産、家屋資産、

家財資産，事業所資産，漁業資産，公共土木施設・公益事業施設資産を対象とする。また，評価メッシュの大きさは50/3mとする。

(1) 人的資産

人的資産は人口（人，平成12年度国勢調査データ）との評価単価（80,000千円/人：生命保険料の平均値）の積として求める。

(2) 家屋資産

家屋資産は家屋の延べ床面積（m²，ゼンリンの住宅地図より求めたもの）と評価単価（宮城県：124.8千円/m²）²⁾の積として求める。

(3) 家財資産

家財資産は世帯数（世帯，平成12年度国勢調査データ）と評価単価（5,471千円/世帯）²⁾の積として求める。

(4) 事業所資産

事業所資産は産業別に償却資産と在庫資産に分けて算出する。償却資産，在庫資産ともに従業員数（人，平成8年度事業所統計調査）と産業別に設定された評価単価（円/人）³⁾の積として求める。

(5) 漁業資産

漁船資産を計上する。漁船資産は漁港ごとの漁船数（隻）と1隻あたりの漁船資産額（円/隻，10年後実勢取引価格；漁船規模別）の積として求める（漁船数および10年後実勢取引価格は気仙沼市ヒアリング）。

(6) 公共土木施設・公益事業施設資産

公共土木施設（橋，道路，公園）・公共事業施設（電気，ガス，水道）資産は，一般資産（家屋，家財，事業所）に対する各地方別の便宜的な平均比率（東北地方 公共土木施設比率：381.67%，公益事業施設比率：3.39%）⁴⁾をもって算定する。

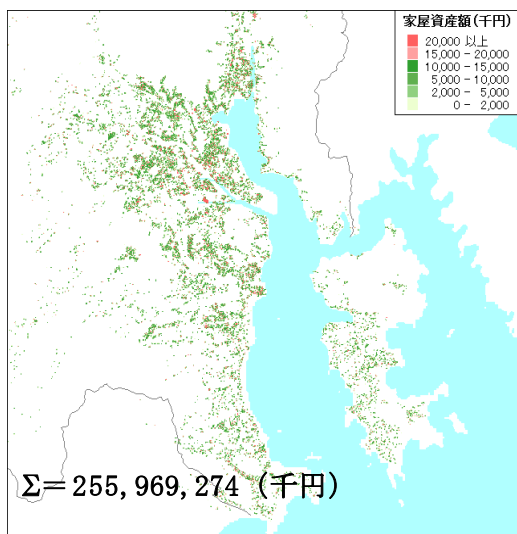


図-2 資産分布例（家屋資産分布）

(7) 気仙沼市の資産構成

その他にも，農業資産をはじめとする計上すべき資産は存在するが，本検討では省略する。これら6資産の合計は7,628,991,526（千円）となり，その内訳を図-3に示す。

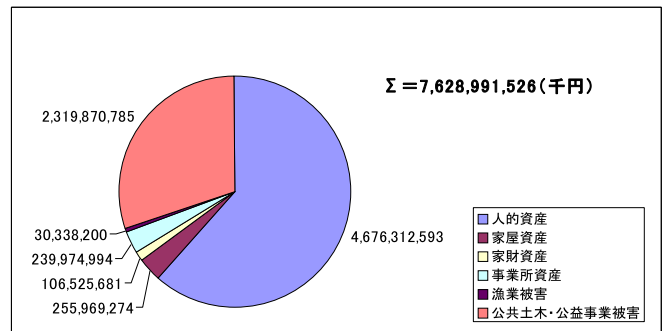


図-3 気仙沼市の資産構成

4. 評価対象地震の選定

(1) 評価対象地震の選定

平成14年7月に，三陸地方を中心とする地震活動の長期発生確率⁵⁾が公表された。本検討では，これらの地震の中から，気仙沼市に津波の被害を及ぼす可能性のある地震を選び出し，これに長期評価結果が報告されている宮城県沖地震⁶⁾を加えて評価対象地震とする。

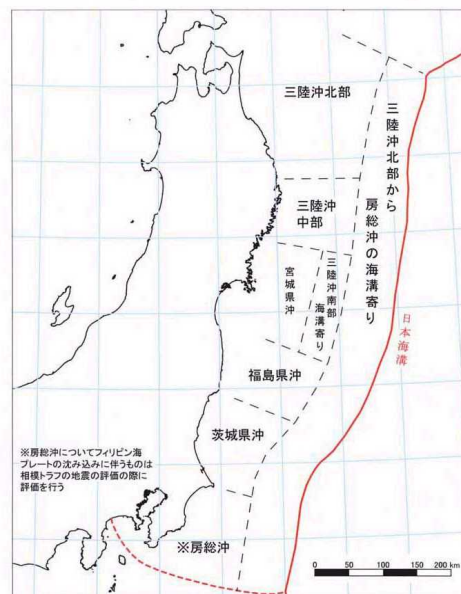


図-4 評価対象地震

(2) 津波の発生確率の考え方

これまでの津波を伴う地震の発生確率は，震源域を特定できない場合に，共通の地震地体構造を有する地域の地震発生確率モデルとして採用されるポアソン過程に基づいて評価されていた⁷⁾。この考え方では，地震発生確率は経年的に一定値となり，今回の報告で想定するような地震の周期性と最終発生からの経過年数は考慮されない。

本報告では固有地震のように当該地域における地震が比較的規則性を持った間隔で発生している場合には、更新過程をあてはめる際にBPT分布を適用し、固有地震以外の地震に対しては、更新過程をあてはめる際に指数分布を適用する。このようにして確率密度関数を決定したあと、最新の地震活動からの経過時間を考慮して、条件付確率の考え方により想定期間内の地震の発生確率を決定する。

表-1 対象地震と更新過程

	地震発生領域	更新過程	2050年までの発生確率	2100年までの発生確率
N1	宮城県沖地震	BPT分布	100.0%	100.0%
N2	三陸沖北部のプレート間大地震	BPT分布	29.0%	92.5%
N3	三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート間大地震	指数分布	31.3%	52.8%
N4	三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート内大地震	指数分布	8.3%	16.0%
N5	三陸沖北部の固有地震として扱ったもの以外のプレート間地震	指数分布	99.6%	100.0%
N6	三陸沖南部海溝寄りのプレート間地震	BPT分布	96.5%	100.0%

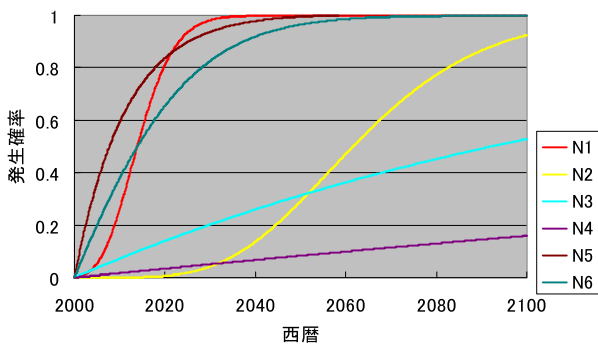


図-5 対象地震の発生確率

$$f(t) = \sqrt{\frac{\bar{T}}{2\pi\alpha^2 t^3}} \exp\left\{-\frac{(t-\bar{T})^2}{2\bar{T}\alpha^2 t}\right\} \quad \text{BPT分布} \quad (1)$$

$$f(t) = \frac{\exp(-t/\bar{T})}{\bar{T}} \quad \text{指数分布} \quad (2)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (3)$$

$$P(T_1) = 1 - \frac{1-F(T_0+T_1)}{1-F(T_0)} = \frac{F(T_0+T_1)-F(T_0)}{1-F(T_0)} \quad (4)$$

$f(t)$: 確率密度関数

$F(t)$: 確率分布関数

$P(T_1)$: 想定年数 T_1 年間の地震発生確率

\bar{T} : 活動間隔の平均

α : ばらつきを表す係数

T_0 : 最新の活動からの経過年数

T_1 : 今後の想定年数

5. 津波防災事業計画の策定

評価対象地震による津波の被害を軽減するために、津波防災事業を計画する。今回のケーススタディでは、事業（案）として、図-6に示す湾奥部水門を考えた。湾奥部に位置する気仙沼市の市街地は、資産が集中しているにもかかわらず、土地収用や景観上の問題から防災施設整備が不十分である。そのため、整備効果の評価や詳細な分析を行う例として適していると判断し、本事業（案）を選定した。

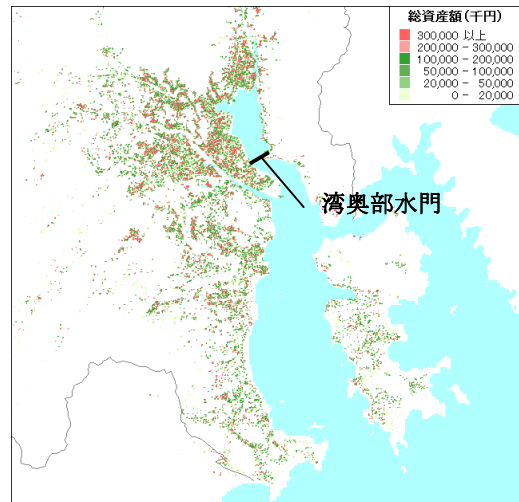


図-6 防災事業（案）

6. 浸水領域の解析

(1) 津波伝播モデル

津波伝播モデルは長波を考慮した長波理論の式を用いる。50m以上の深海に対しては線形長波理論、50m以下の浅海に対しては移流の効果が無視できないため、非線形長波理論を用いる⁸⁾。数値計算は、これらの式をStaggered leap-frog法により差分して行う。また地震による初期水位変動は、それぞれの地震について静的断層パラメータ⁹⁾を用い、Mansinha and Smylie(1971)の方法により求める¹⁰⁾。

(2) 計算方法

計算は図-7に示す領域について行う。図の黒色の部分が陸地に相当し、日本海溝を含む領域である。

計算格子間隔は横断方向・縦断方向共に、断層が崩れる深海域では450mメッシュを用いて行い、深海から浅海に近づくにつれて、150mメッシュ（赤囲いされた部分）、50mメッシュ（白囲いされた部分）と格子間隔を狭めていく。

ここで最小メッシュサイズについては、陸地を含む浅海域の格子間隔を50mまで狭めれば、津波解析として妥当な津波高さを計算できるが、一つの湾にターゲットを絞り詳細な被害推定を行うには、さらに格子間隔を狭め数値計算精度を上げるべきである。よって気仙沼湾におけるメッシュサイズは50/3m（黒囲いされた部分）を用い、計4領域に渡って接続計算を行う。

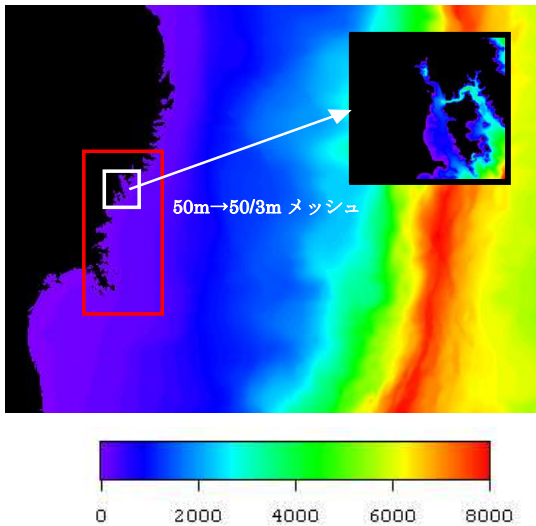


図-7 計算領域 [カラーバーは水深(単位:m)]

計算は各評価対象地震について、防災施設の整備条件別（現状、天端高TP+1.0mの湾奥水門事業、天端高TP+3mの湾奥水門事業）の3ケースについて行う。水門は狭窄部に湾を完全に塞ぐ形で設置する。

(3) 計算結果

今回の評価対象地震のうち、ケースN3について計算結果を示す。慶長16年（1611年12月2日）三陸沖においてM8.1の地震が発生し、この地震によって生じた津波は三陸の広い範囲に渡って来襲した。気仙沼湾の北に位置する三陸町越喜来では8~10mの津波高さが推定されている¹¹⁾。

図-8は地震による初期水位変動分布であり、最大で5mの水位が海溝付近で変動している。三陸地震は「津波地震」の一つとも言われ、南北方向の長さに対して東西方向の幅が小さいのが特徴である。その為東西方向への指向性が強く、三陸沿岸部にエネルギーが集中する形で来襲する。

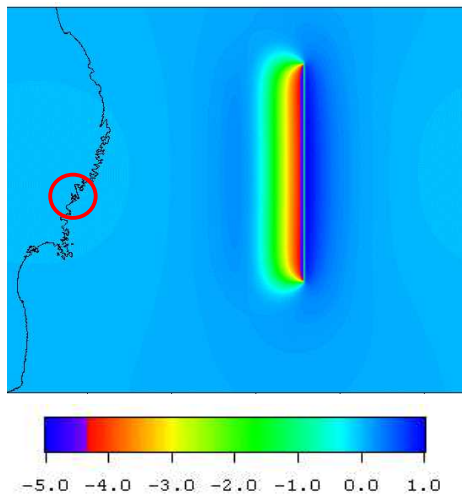


図-8 初期水位変動分布 (単位:m)

図-9に現状と水門設置（天端高TP+3m）の場合の最大水位分布、図-10に津波到達時間分布を示す。

津波は地震発生から約20分で湾の入口付近に到達し、その後10分~15分で湾奥まで到達する。湾口部から湾奥へ津波が伝播する時間は、他ケースについても同様の結果が得られた。最大水位は湾の入口に位置する大島では12m、湾奥においても2~3mに達した。これは津波が水門を乗り越えて湾奥まで到達したことを意味している。

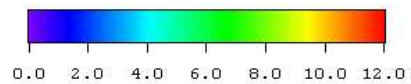
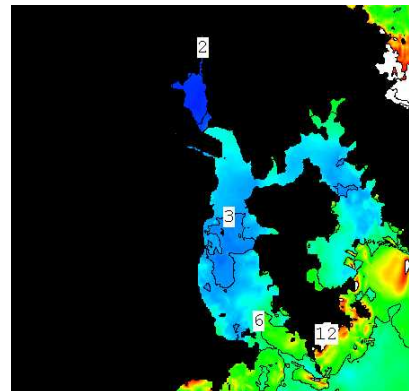
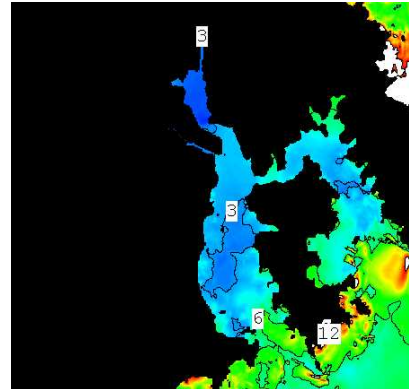


図-9 最大水位分布 (単位:m)
(上:現状 下:水門天端TP+3m)

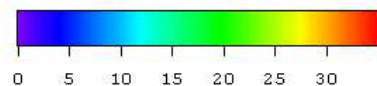
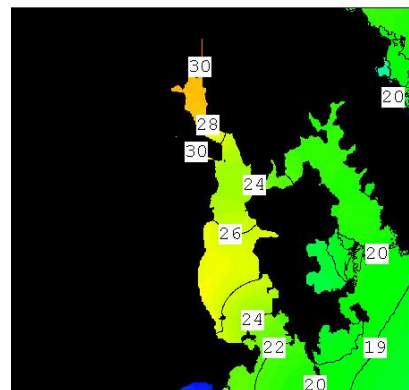
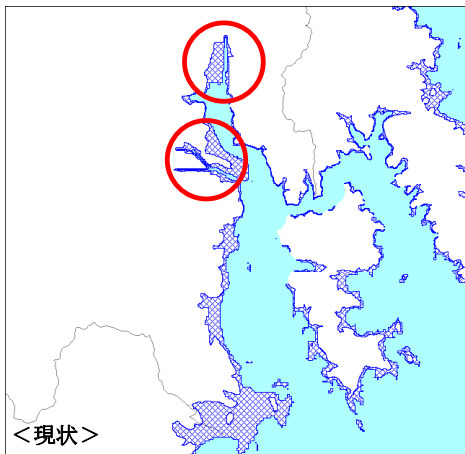
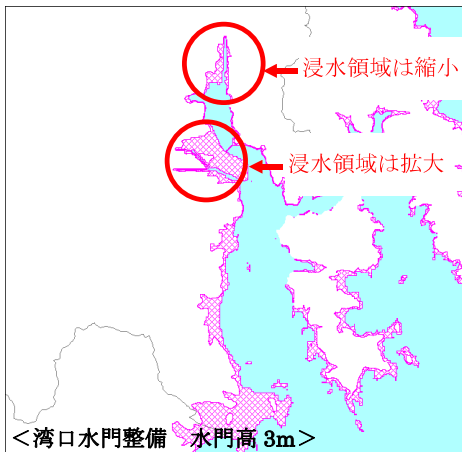


図-10 津波到達時間分布 (単位:分)

図-11にはN3による津波の浸水域を示す。水門の設置によって、湾口部および大島付近の結果に変化はないが、湾最奥部の浸水領域は縮小し、水門西側の浸水領域が拡大していることがわかる。



<現状>



<湾口水門整備 水門高3m>

図-11 浸水域 (上：現状 下：水門天端TP+3m)

(4) 水門の設置と浸水域の関係

水門を設置した場合、水門手前での水位が1mもしくは3mを超えなければ、津波は湾奥まで到達しないが、津波が水門を乗り越えた場合は、湾奥へ侵入した海水が湾外に出られない状態になり被害が拡大するエリアもある。また、水門の設置が近傍河川からの津波の遡上を助長するケースも見られ、本ケース(天端高TP+3m)の場合、水門西側の河川周辺への浸水の広がりが顕著に見られた。(1868KB MPG動画は[ここをクリック](#))

このように、津波の大きさや入射方向によっては、水門の設置がかえって被害を拡大させることもあるので注意が必要である。

7. 被害額の算出

各評価対象地震について、防災施設の整備条件別に被害額を算出する。公共土木施設・公益事業施設

資産を除く各資産に関しては、各資産分布に対して浸水エリアを重ね合わせ、浸水深に応じた被害率¹²⁾を考慮した被害額を算出する。公共土木施設・公益事業施設資産に関しては一般資産(家屋、家財、事業所)被害額に対する各地方別の便宜的な平均比率をもって算定する。

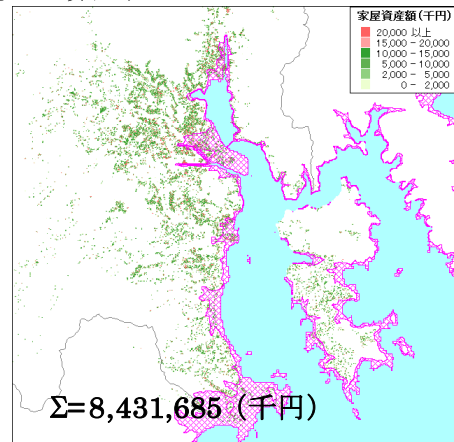


図-12 被害額の算出 (N3 水門高3m 家屋被害)

(1) 人的被害

人的被害は死者数をメッシュごとに算定し、それに評価単価を乗じて求める。津波による死者数の算定は、浸水エリア内における津波影響人口(浸水深が1m以上となるメッシュ内の滞留人口)をもとに、避難率および津波の到達時間と要避難時間の関係¹³⁾を考慮して以下のように求める。

a) 避難行動をとらずに死亡する人口

$$C_1 = a \times (100\% - b_1 - b_2) \quad (5)$$

C_1 : 避難行動をとらずに死亡する人口

a : 津波影響人口

b_1 : 地震発生により避難を開始する人口の割合

b_2 : 警報発令により避難を開始する人口の割合

b) 地震発生により避難を開始するが、間に合わずに死亡する人口

$$C_2 = a \times b_1 \times Heavside(T_1 - T_2) \quad (6)$$

T_1 : 地震発生により避難を開始したときの要避難時間

深夜・早朝の時間帯で家屋の倒壊がない場合 :42分

T_2 : 津波の到達時間

数値解析により求める。

$Heavside(T_1 - T_2)$

$T_1 - T_2 \geq 0$ のとき 1

$T_1 - T_2 < 0$ のとき 0

c) 警報発令により避難を開始するが、間に合わずに死亡する人口

$$C_3 = a \times b_2 \times Heavside(T'_1 - T_2) \quad (7)$$

T'_1 : 警報発令により避難を開始したときの要避難時間

深夜・早朝の時間帯で家屋の倒壊がない場合 :50分

d) 総死亡人口

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (8)$$

(2) 家屋被害

家屋被害は浸水エリア内の延べ床面積に1m²あたりの評価単価と浸水深別被害率を乗じて求める。

表-2 家屋被害の浸水深別被害率

浸水深	50cm未満	50~99	100~199	200~299	300cm以上
被害率	0.092	0.119	0.266	0.580	0.834

(3) 家財被害

家財被害は浸水エリア内の世帯数に評価単価と浸水深別被害率を乗じて求める。

表-3 家財被害の浸水深別被害率

浸水深	50cm未満	50~99	100~199	200~299	300cm以上
被害率	0.145	0.326	0.508	0.928	0.991

(4) 事業所被害

事業所被害は償却資産被害額と在庫資産被害額にわけて求める。ともに、浸水エリア内の従業者数に産業別の評価単価と浸水深別被害率を乗じて求める。

表-4 事業所被害の浸水深別被害率

浸水深	50cm未満	50~99	100~199	200~299	300cm以上
被害率(償却)	0.232	0.453	0.789	0.966	0.995
被害率(在庫)	0.128	0.267	0.586	0.897	0.982

(5) 漁業被害

漁業被害は漁船被害を考える。漁船被害は津波到達エリア内の漁船数に10年後実勢取引価格と最大波高別被害率¹⁴⁾を乗じて求める。

表-5 漁船被害の最高波高別被害率

最高波高	200cm未満	200~400	400~800	800cm以上
被害率	0	0.2	0.5	1.0

(6) 公共土木施設・公益事業施設被害

公共土木施設・公益事業施設被害額は、一般資産被害額に便宜的な平均比率（公共土木施設被害額比率=381.67%，公益事業等被害額比率=3.39%）を乗じて求める。

(7) 総被害額の算出

各被害額を足し合わせることで、総被害額を

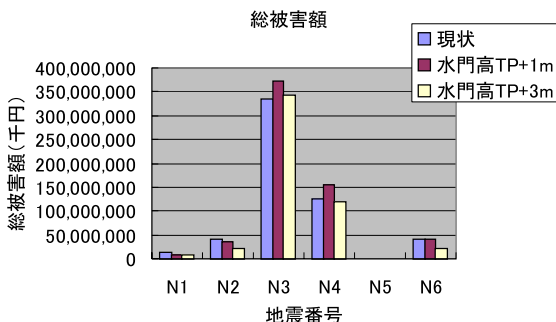


図-13 総被害額

地震番号N3やN4においては、水門を整備することにより被害額が増大する結果になっている。これは6. 浸水領域の解析でも述べたが、大津波が発生するN3やN4においては、湾奥部に水門を設置することにより、水門内へ侵入した海水が逃げ場を失い湾内の水位が上がることや、水門南部の河川からの津波の遡上が助長されることが原因であると考えられる（図-11参照）。防災計画において、施設建設により、こういった大津波も防ぐ対象とする場合は、当該場所の水門設置とともに、既存防潮堤の嵩上げや河川からの遡上を防ぐ河川水門の併設の必要性を示唆する結果となった。

8. 被害軽減額の算出

各評価対象地震について、防災施設の整備条件別に被害軽減額を算出する。

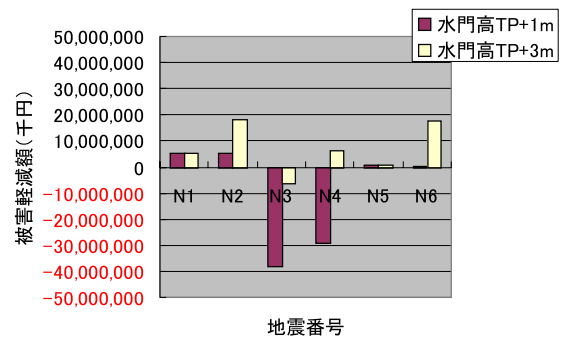


図-14 被害軽減額

図-14より、対象地震により必要となる防災施設の性能がかなり異なることがわかる。当該位置での水門建設を仮定した場合、地震番号N1やN5に関しては水門高がTP+1mとTP+3mで被害軽減額がほとんどかわらず、TP+3mの性能が過大であることがわかる。N2やN6に関しては、被害軽減額が大幅に増加していることからTP+1mの性能では不十分であることが読み取れる。これらの地震に関しては、さらに高性能（例えばTP+5m）の条件での解析結果によっては、TP+3mの性能でも不十分であることが判明する可能性もある。また、N3に関しては、TP+3mの性能の水門ではかえって被害を拡大し、N4に関してはTP+1mの性能では被害が拡大するが、TP+3mの性能を持たせると、若干の被害軽減が期待できることがわかる。ここで重要なことは、防災施設にすべての地震に対して十分な性能を持たせることは非効率的であり、各々の地震の発生確率を考慮した上で、ハード対策とソフト対策等、複数の対策を融合させた防災計画の構築が求められることである。

9. 対策効果の算出

各々の地震の発生確率を評価した対策効果は、期待被害軽減額の和として求められる。被害軽減額に地震発生確率を乗じることにより、期待被害軽減額を算出する。

期待被害軽減額は整備施設の耐用年数中の津波発生確率を考慮した被害軽減額であり、評価対象地震について、この期待被害軽減額を足し合わせたものが整備施設の効果（便益）となる。

$$B(t, h) = \int_{N1}^{N6} P_{(E,t)} \times \Delta D_{(E,h)} dE \quad (9)$$

$B(t, h)$: 耐用年数 t 、性能 h の施設建設の対策効果

$P_{(E,t)}$: t 年間の地震番号 E の発生確率

$\Delta D_{(E,h)}$: 性能 h の施設を建設したときの地震番号 E に対する被害軽減額

- B (50年,水門高TP+1m) = -7,833,295 (千円)
- B (100年,水門高TP+1m) = -15,419,003 (千円)
- B (50年,水門高TP+3m) = 27,632,206 (千円)
- B (100年,水門高TP+3m) = 38,444,746 (千円)

今回評価対象とする6つの地震に関しては、発生確率まで踏まえて総合的に評価すると、当該位置での水門建設を計画した場合、高さ1mの水門は、湾奥部の水位上昇や河川からの津波の遡上を助長し、被害の拡大をまねくことがわかる（対策効果がマイナスになる）。

また、施設の耐用年数により、期待被害軽減額が大きく変化する地震もある。図-15に示すように、地震番号N2は50年対応の施設に比べ100年対応の施設の期待被害軽減額が大きく増加する。これはこの地震の発生確率が2050年以降急激に上昇するからである（図-5参照）。

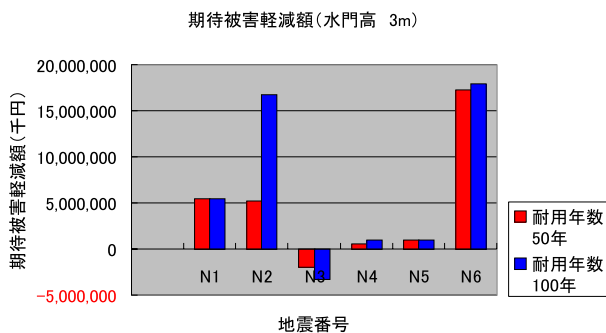


図-15 期待被害軽減額

10. 費用対効果分析

湾奥部水門の建設費用と期待できる効果を用いて費用対効果分析を行う。当然、建設費用、期待できる効果ともに、施設を高性能にすればするほど高くなる。施設建設において、建設費用と対策効果の比である費用便益比が、最大となるような性能を持たせることが、投資効果という観点からは最適な防災

計画といえることができる。このとき、地震番号N2の例で説明したように、施設の耐用年数を変化させると、評価地震の発生確率が変化するため、最適となる性能が変化することが考えられる。例えば、2000年から2050年を供用期間とする水門に持たせるべき性能と、2100年まで供用期間を延長したときにもたせるべき性能は異なり、耐用年数50年の施設を建設する場合はTP+3mの天端高さ、耐用年数100年の施設を建設する場合は、さらに性能の高いTP+5mの天端高さが最適であるというような結果が得られる可能性がある。しかし、こういった検討はあくまで投資効果という一視点からの結論であり、防災計画上で、他に優先されるべき目的（例えば人的被害を最小化する防災計画の構築）が掲げられている場合は、その目的を最大限に達成される性能を施設にもたせるべきである。このような評価を行う場合は、資産別の被害軽減率等が指標として有効になる。資産別被害軽減率は、それぞれの資産について、現状での被害額の何割が施設整備により軽減されるかを示したものである。図-16は地震番号N2の資産別被害軽減率であるが、漁業被害は本施設により全く軽減されないが、人的被害は天端高TP+3mの水門を設置することにより、約50%の被害が軽減されることがわかる。

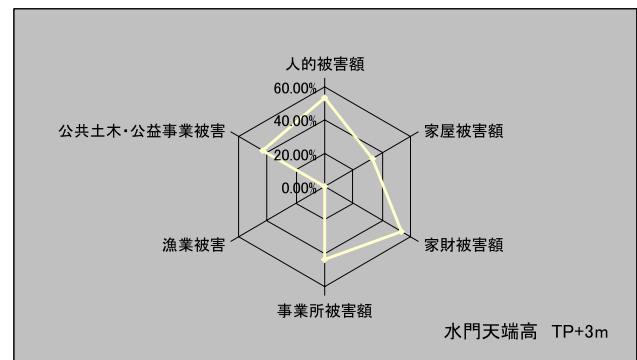
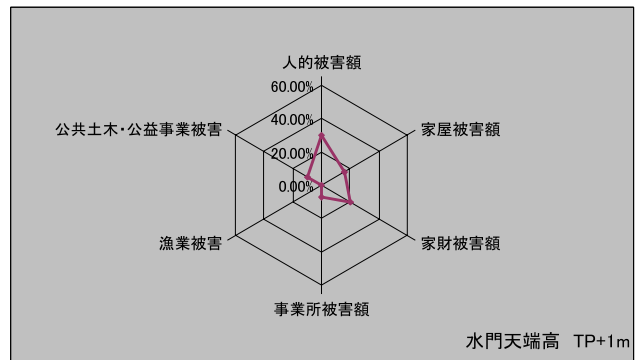


図-16 資産別被害軽減率（地震番号N2）

11. 今後の展望

本論文では、GISと津波・浸水シミュレーションを用い、津波防災事業の効果を定量的に評価する手法について述べた。今後は、防災施設の整備条件別解析ケース数を増やし、評価精度の向上を目指す。ま

た並行して、防災施設のライフサイクルコストの算出、地震による既存施設の破損率、津波発生確率のさらなる高精度化（評価期間内に複数回の発生を考慮したときの確率）等にも取り組む次第である。

謝辞：本報告にあたり、気仙沼海岸防災研究会に多大な協力を頂いた。記して、感謝の意を表す。なお、標高データは、国土地理院発行数値地図50mメッシュ（標高）を利用した。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について， pp. 2-16, 2002.
- 2) 運輸省港湾局海岸・防災課：費用便益分析資料集（案）， pp. 付-1, 1998.
- 3) 建設省河川局：治水経済調査マニュアル（案）， pp. 48-57, 2000.
- 4) 農林水産省構造改善局，農林水産省水産庁，運輸省港湾局，建設省河川局：海岸事業の費用対効果分析手法（平成9年度版）， 1998.
- 5) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について， pp. 2-16, 2002.
- 6) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：宮城県沖地震の長期評価， pp. 1-10, 2000.
- 7) 運輸省第二港湾建設局企画課：平成10年度 港湾海岸事業評価検討調査報告書， pp. 61-74, 1999
- 8) 今村文彦：津波災害とシミュレーション，計算工学会誌， Vol. 6, No. 3, pp. 311-315, 2001
- 9) 佐藤良輔：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，鹿島出版会， 1995
- 10) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術， pp121-125, 2002
- 11) 羽鳥徳太郎：三陸沖歴史津波の規模と推定波源域，東大地震研究所彙報，第50号， pp397-414
- 12) 建設省 河川局：治水経済調査マニュアル（案）， pp. 48-57, 2000.
- 13) 今村文彦，金田資子，早川哲史：沿岸災害に対するリスク評価とマップ作成について—津波を中心として—，東北大学津波工学報告，第20号， pp1-11, 2003
- 14) 首藤伸夫：津波強度と被害，東北大学津波工学報告，第9号， pp. 101-136, 1992.

(?)

QUANTITATIVE EVALUATION OF THE PREVENTION FOR TSUNAMI CONSIDERED A LONG-TERM PROBABILITY OF EARTHQUAKES

YASUHARU TOYOTA, FUMIHIKO IMAMURA, KENICHI SATO
and HIROYUKI SASAKI

Today a fair process to deliver public infrastructure project is getting a greater concern for all public sector decision makers. In terms of tsunami hazard mitigation, their challenge is to quantitatively evaluate the effectiveness of all the planned infrastructures for tsunami hazard mitigation, such as seawalls and sluice gates, and to find the best plan.

This thesis proposes a method of quantitative evaluation of the tsunami hazard mitigation infrastructures, using a numerical simulation program and a geographic information system (GIS). The numerical tsunami simulation gives us a travel time and an inundation area of tsunami. On the other hand, GIS enables us to exactly understand the geographic distribution of human populations, building properties and so forth. Combining these two analysis, the estimation of the damage can be more detailed and precise. This evaluation can be a clue to deliver an ideal infrastructure project.

This thesis reports the result of the case study of a coastal community, Kesenuma City, Miyagi Prefecture.

津波浸水時の避難条件に関する実験的研究

西畑 剛*・森屋 陽一**・田村 保***

瀧本 浩一****・三浦 房紀*****

浸水災害下における人間の水中での避難条件を決定するため、水路内に所定の水位と流速を発生させた中を人間が歩く水中歩行実験を行った。実験は様々な年齢・性別からなる被験者の歩行速度の測定および避難可否の決定を行った。さらに着衣や歩行距離を変えた場合の歩行速度も測定した。一方、水路内に荷重計を取り付けたマネキンを配置して流体力を測定し、歩行時に人体にかかる力を推定した。これらの結果から、年齢や性別などに起因する身体能力差を考慮した避難条件についてまとめる。また実験を行っていない年代に対しても体力に関する統計資料から避難条件を推定する方法を提案する。

1. はじめに

近年、津波による陸上遡上を再現する浸水シミュレーション解析が一般的に行われるようになり、浸水計算結果を外力条件として津波災害時の人間の避難行動を模擬する避難シミュレーションの研究もなされている（例えば今村ら，2004）。この避難シミュレーションにより、津波による人的被害の推定が様々な条件下（想定地震や発生時間等）で可能となった。しかしながら、浸水災害時における水中での人間の避難速度や避難可否条件の決定に際し、参考にできる実証的な研究としては須賀ら（1995）等が挙げられるものの、まだまだ研究例が少ないのが現状である。こうした条件は浸水時における避難シミュレーションの実施に際して重要なパラメータであり、実験データの蓄積と解析は今後の津波防災を考える上で必要であると言える。

本研究は人工的に水位と流速を作成した実験水路内に実際に人間に歩行させ、水中での歩行速度を測定した（写真-1）。一方、マネキンによる流体力の測定も行い（写真-2）、津波浸水下における歩行速度及び避難可否を年齢

や性別に起因する体力差を踏まえて考察することを目的とする。

2. 実験装置・条件

(1) 実験装置

実験は平面水槽内に幅 1m、高さ 1.5m の水路を作成し、その中に水中ポンプにて定常流を発生させることにより行った。図-1 に水路平面・断面模式図を示す。水路は平面水槽壁面と擁壁によって作成し、水路床はモルタル敷きである。水中ポンプは 10 吋を 3 台（最大流量 24m³/分）で水槽内に循環流れを発生させることによって水路内を定常流にした。上流側のポンプ吐き出し直下には整流版を配置し、下流側には高さを 10cm 刻みで変更できる刃形堰を設置して越流させた。水路内流量はポンプ稼働台数と各ポンプのバルブの開閉調節により行った。また水位は下流側の刃形堰の高さを変えることにより越流水深を変化させることにより調整した。これにより水路内に様々な水位と流速からなる流れを発生させることができる。

(2) 実験条件

実験はポンプにより 2m³/分刻みに流量を与えた。土木学会水理公式集(1999)の刃形堰の公式から堰高を変えた水位と流速を図-2 の通りに作成し、容量式波高計と電磁流速計により水位と流速を測定した。以後、流量X(m³/分)、堰高H(m)のケースをQX-Hと示す。水路内は水位 0.17m~1.36m、流速 0.03m/s~1.01m/s の範囲の定常流となる。なお、事前に行った検定から水深の 1/2 の高さで測定した流速は、ほぼ理論的に計算された断面平均流速と同じ値になっていたため、水深の 1/2 の高さに設置した 2 本の流速計の平均値を流速とみなした。また水位は水路縦断方向にほぼ同様であったため、水路下流の 1 箇所のみ測定とした。実験では水位計と流速計の計測値を AD コンバータによってパソコンモニタ上で確認し、ポンプバルブの開閉によって、所定の水位、流速となるよう歩行前に調整を行った。



写真-1 歩行状況



写真-2 流体力の測定

*	正会員	修(工)	五洋建設(株) 技術研究所
**	正会員	博(工)	五洋建設(株) 技術研究所
***	フェロー	工修	五洋建設(株) 土木設計部
****	正会員	博(工)	山口大学助教授地域共同研究開発センター 次長
*****	正会員	工博	山口大学教授工学部知的情報システム工学科

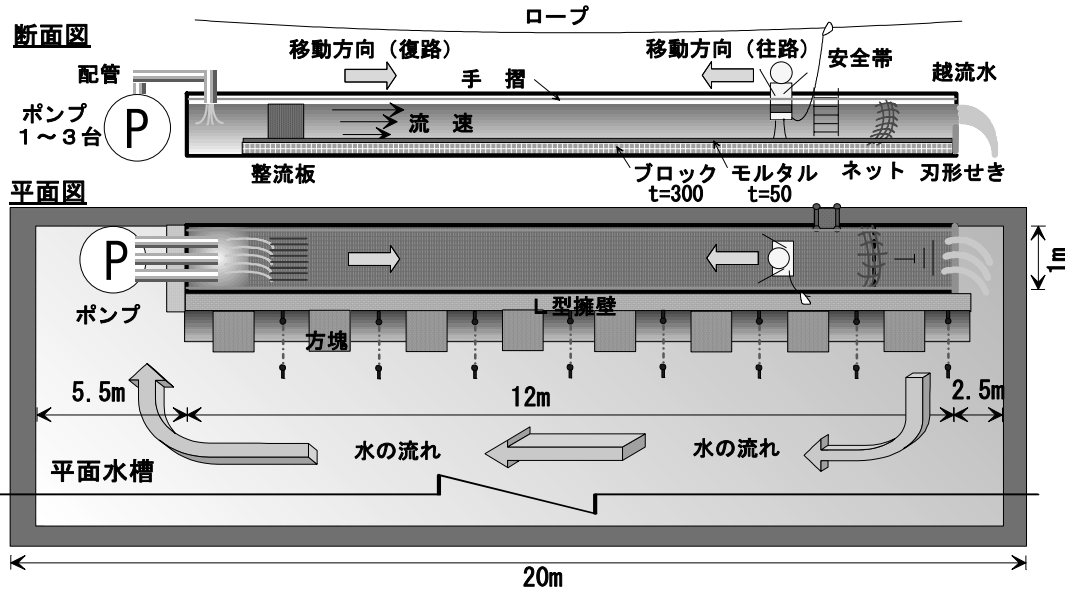


図-1 実験装置の概要

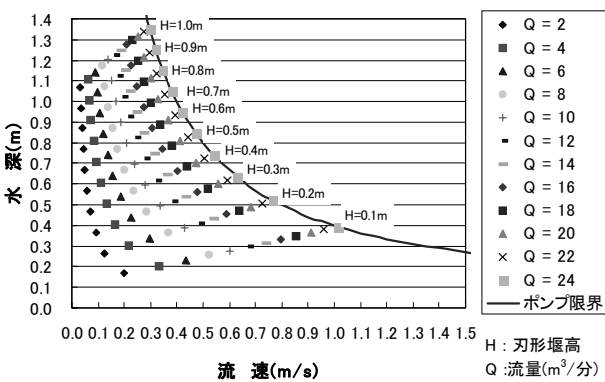


図-2 本実験装置の水位・流速の算定図

(3) 被験者

被験者は16歳から59歳までの男女から構成される。表-1に被験者の年齢、性別、身長を記す。

表-1 被験者構成

No	性別	年齢	身長	No	性別	年齢	身長
E1	男	21	179	E16	男	35	174
E2	男	26	168	E17	男	38	178
E3	男	27	174	E18	男	45	168
E4	男	27	170	E19	男	45	166
E5	男	27	164	E20	男	53	162
E6	男	27	175	E21	男	55	172
E7	男	28	173	E22	男	56	159
E8	男	28	173	E23	男	57	179
E9	男	28	178	E24	男	59	165
E10	男	30	174	E25	女	16	160
E11	男	30	170	E26	女	24	169
E12	男	30	176	E27	女	25	165
E13	男	31	176	E28	女	28	158
E14	男	31	169	E29	女	30	157
E15	男	31	178	E30	女	31	160

(2)に記した方法で設定した水位・流速下を被験者が下流から上流に向かって8m歩行するのに要した時間を測定し、歩行速度を算出した。被験者は原則、上下長袖の作業着と運動靴を身につけた状態で歩行し、一部の被験者には着衣量を増やした歩行実験も行った。

一方、人体にかかる流体力を測定するために、マネキン(身長170cm)に荷重計を設置し水平方向の抗力を測定した。

3. 測定結果

(1) 歩行速度の測定結果

人員の手配の関係で歩行速度の測定は被験者毎に全条件を測定することはできなかったため、多くの被験者に対しては主に流量 $Q=14\text{m}^3/\text{分}$ および $18\text{m}^3/\text{分}$ で水位・流速を作成したケースについて実験し、その他のケースは一部の被験者のみ実験した。例として図-3に $Q=18\text{m}^3/\text{分}$ において越流水深を変化させた場合の水位と歩行速度の関係を示す。なお、水位は被験者の身長で割った無次元化水位である。被験者の年齢が高い、あるいは女性である場合に歩行速度が低下している傾向が読みとれる。

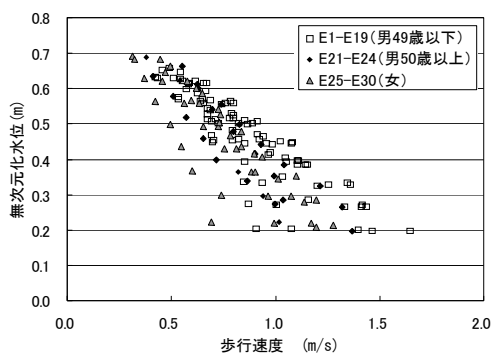


図-3 歩行速度と水位の関係

(2) 着衣量による歩行速度差

被験者 E7, E10 に対しての同一の水位，流速下で着衣を増やして実験・比較を行った。着衣量は写真-3,4 の通り，作業着のみの場合とその上に防寒着を着た場合で変化した。図-4 に歩行速度の違いを示す。着衣量が増加すると歩行速度が低下することが読みとれる。



写真-3 作業着

写真-4 防寒着

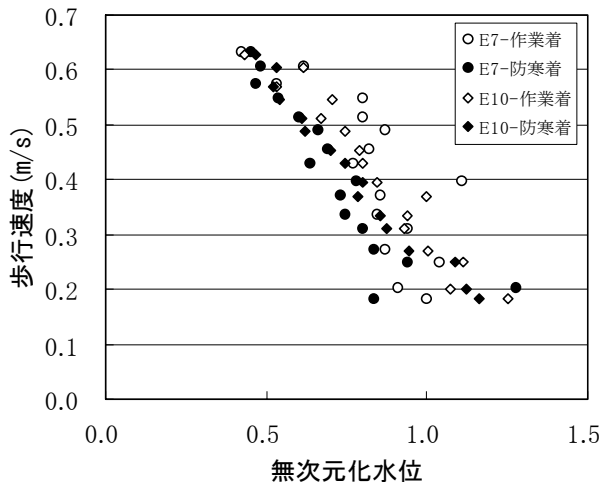


図-4 服装による歩行速度の違い

(3) 長距離歩行時の歩行速度

Q18-60 のケースについて被験者 E1 (21 歳男), E10 (30 歳男) を水路内 30 往復 (累積 480m) 歩行させた。そして各往路，復路における歩行速度を測定した。図-5 に累積距離と歩行速度を示す。E10 は歩行距離が伸びるにつれて歩行速度が減少するが，E1 の歩行速度はほぼ一定(微減)であり，避難距離が長くなると個人の持久力に応じて歩行速度が低下するようである。

(4) 抗力の測定と抗力係数の算定

Q14, Q18 および Q22 のケースについて，被験者を模したマネキンに荷重計をとりつけて流れから受ける抗力を測定した。図-6 に測定した抗力を示す。

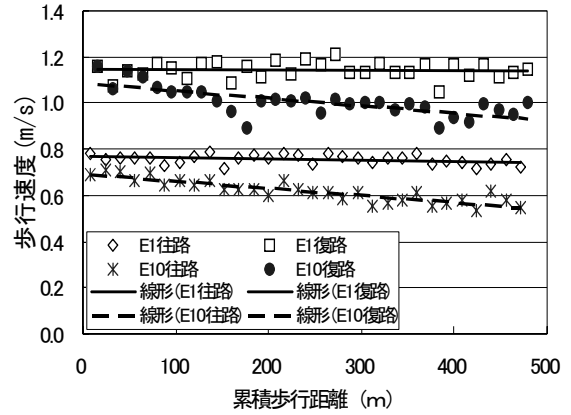


図-5 歩行距離と歩行速度

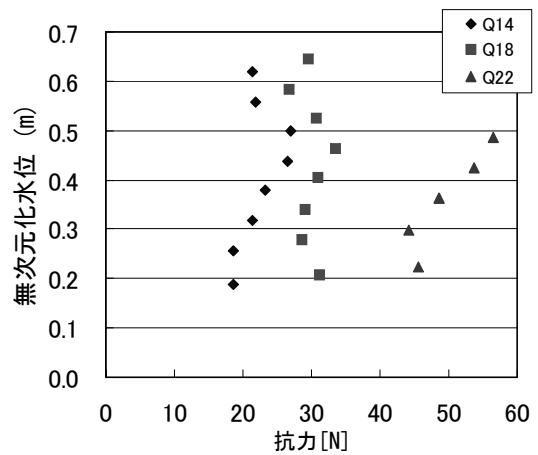


図-6 測定抗力

一方，抗力係数の算定は次式による。

$$F_x = C_D A \frac{\rho u^2}{2} \quad (1)$$

ここで， F_x ：抗力(N)， C_D ：抗力係数， A ：投影断面積(m^2)， ρ ：流体密度(kg/m^3)， u ：流速(m/s)であり，投影面積は水位により変化するため，投影面積はその実測値を用いて水位 $h(m)$ の3次関数で近似し，評価することとした。

$$A(h) = -0.1756h^3 + 0.5173h^2 - 0.0375h \quad (2)$$

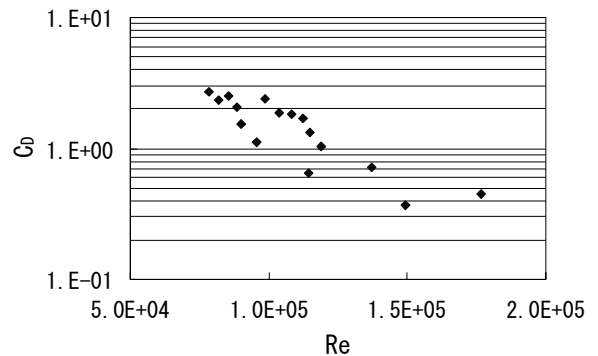


図-7 レイノルズ数と抗力係数

図-7にレイノルズ数と抗力係数の関係を示す。抗力係数は1.0前後の値を取ることがわかる。レイノルズ数算定時の代表長さは投影面積を水位で除した値を用い、動粘性係数は、実験時の水温24度より $9.2 \times 10^{-7}(\text{m}^2/\text{s})$ を用いた。

4. 水位と歩行速度の関係

実験結果との比較により、水中の歩行速度の算定手法を構築する。須賀ら(1995)は水位、流水中で人体に作用する抗力、摩擦力の釣り合いから、汜濫流速と歩行速度の関係(3式)を提案している。本検討でも須賀らに従い(3式)を用いることとする。

$$u \leq \sqrt{\frac{2f(G-W)}{aC_d \rho A}} - v \quad (3)$$

ここで、 u ：流速(m/s)、 v ：歩行速度(m/s)、 f ：摩擦係数、 G ：避難者重量($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)、 W ：浮力($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)、 a ：安全率、 C_d ：抗力係数、 ρ ：流体密度(kg/m^3)、 A ：投影断面積(m^2)である。避難者毎の投影断面積は、その実測値を用いて(4式)に示すように無次元化水位の関数として再構築し、評価した。ここで、投影断面積は体重の2/3乗に比例すると仮定した。

$$A(h') = (-0.8627h'^3 + 1.495h'^2 - 0.0638h') \cdot (G/70)^{2/3} \quad (4)$$

また、浮力は人体の海水に対する比重を1.0として、次の通り定義した。

$$W = G \left(A(h') / A(1.7) \right)^{3/2} \quad (5)$$

ここで安全率 a は1m/s以下の歩行速度領域で計算値と実測値が合うように被験者毎に決めた。表-2に各被験者に与えた安全率を年代別・性別平均で記す。安全率の値としては、須賀らの結果(20才：2.0-2.2, 40才：2.6-3.0, 60才：4.0-5.0)とほぼ対応するものとなった。

表-2 年代・性別毎の安全率平均

年代/性別	人数	平均安全率
20-29歳男性	9	2.39
30-39歳男性	8	2.50
40-49歳男性	2	2.50
50-59歳男性	5	2.70
16-31歳女性	6	2.83

式(3)-(5)を用いて、被験者毎に最大歩行速度 v を算出し、実験値と比較した結果を図-8に示す。また、年齢が高い被験者層や女性は安全率が高くなる傾向が見られる。須賀らによると安全率(摩擦力抗力比)は、年齢が高い程大きな値を、また同じ被験者ならば歩行に余裕があり、歩行速度が速くなる実験条件下ほど大きな値をとる。本

実験でも、須賀らの結果と同様に、計算歩行速度が大きくなるにつれてより大きな安全率を与えないと実験値と合わない傾向が見られる。

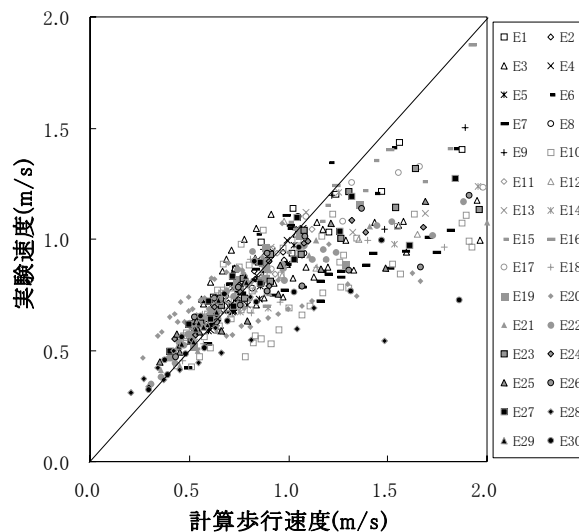


図-8 計算歩行速度と実測値

一方、避難限界に関しては、被験者への聞き取り調査では歩行速度が0.4~0.5m/s以下となる場合、実際の災害下では歩行するのが難しいのではという意見が多かった。よって0.5m/s以下が歩行限界の目安になると考える。

5. 水中歩行時の出力パワー

前章では流水中の力の釣り合いから歩行速度を決めたが、本章ではそれがどのくらいの仕事率に相当するか検討する。

(1) 水中歩行時のパワー

水路内を水流に逆らって歩行する時に被験者がなす仕事は(1式)による抗力と歩行速度の積として次の通りに定義できる。

$$P = F_x V \quad (6)$$

ここで、抗力の算定における流速は相対速度(水流の速度と歩行速度の和)とし、投影面積は(2式)を用いて計算した。

図-9にQ14およびQ18の実験ケースについて被験者別に算定したパワー P を示す。パワーは女性や高齢者ほど小さい値をとっており、被験者の体力を反映すると考えられる。また水位70cmあたりからパワーは減少していく。これは70cmが人体の股下付近の高さに相当し、これより上は浮力が大きくなり歩行しづらくなるため、個人の運動能力を十分に発揮できなくなるためと考えられる。図-10に年代別のパワーを記す。年代が上がるほどパワーが減少していることがわかる。

また、被験者からのヒアリングでは、水位が70cmを越えてくると水中歩行が難しくなり、災害時に歩行するのは難しいのではないかという意見が多かった。よって、安全側の設定になるが、水位70cm（股下相当）というのが、避難限界のもう一つの目安となると考えられる。

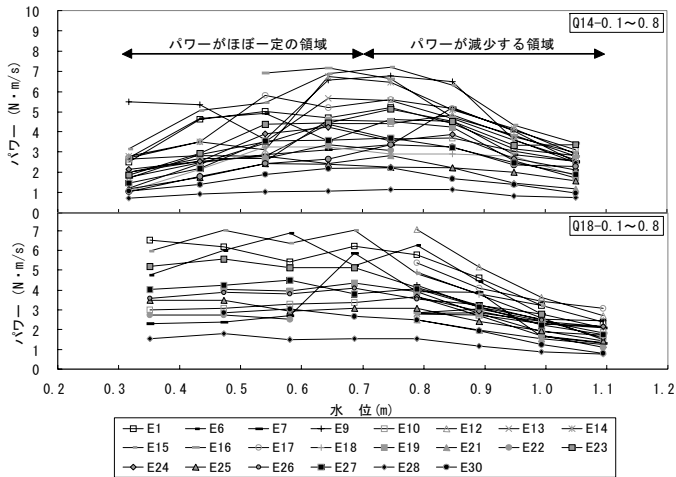


図-9 被験者別パワーと水位の関係

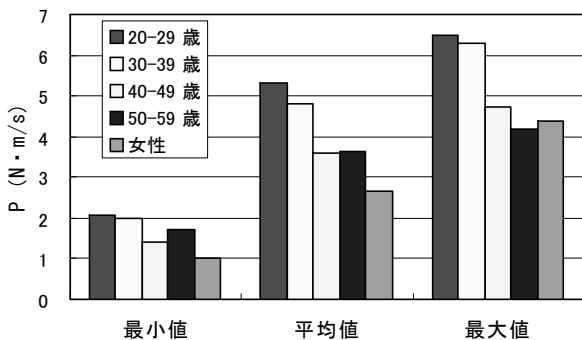


図-10 年代毎のパワー

(2) 統計データとの比較によるパワーの推定

パワーは被験者の運動能力、特に脚部の能力に関係が深いと考え、各被験者の年齢・性別に対応する脚筋力に関する体力統計データ（東京都立大学体力標準値研究会(2000)）と比較した。図-11に水位70cmまでの被験者別平均パワーと脚筋力 F_L を比較する。脚筋力統計値に分散が求められているものには図中にバーで示した。パワーと脚筋力には相関関係が認められ、相関式を求めると以下の式となる。

$$F_L = 48.78P + 185.73 \quad (6)$$

なお、脚筋力に関するデータは4歳から70歳までの男女について揃っており、実験を行えなかった幼児や老人に対しても(6)式よりパワーを算定することが可能とな

る。そして身長や体重に関する統計データを参照し、(1)~(6)式を用いることにより、年齢や性別毎の歩行速度を推定することも可能となる。

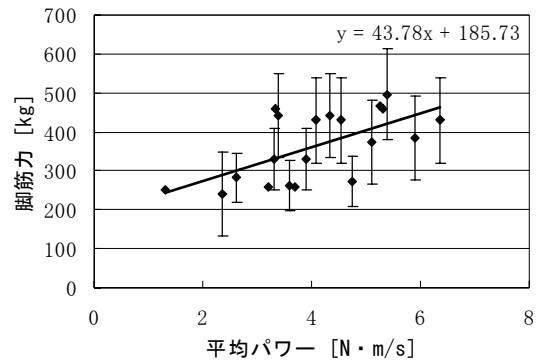


図-11 平均パワーと脚筋力の比較

6. まとめ

- 1) 水中歩行実験を行うことにより、様々な年齢・性別の人間に対する水中歩行速度、避難可否データを得た。
- 2) 水位、流速を関数とした最大歩行速度を須賀ら(1995)に基づき検証した。実験結果と整合する算定式を得ると共に適用対象範囲を女性へも拡大した。避難限界は最大歩行速度 0.5m/s 以下および水位70cm以上になった時付近と考える。
- 3) 被験者の着衣を変えて歩行速度差を計測した結果、服装により歩行速度に差が生じることがわかった。
- 4) 長距離歩行時(480m)の歩行速度変化を測定し、歩行速度が歩行距離の増加につれ減少することを認めた。
- 5) 水位が被験者の股下まではほぼ一定だった出力パワーが腰より上の水位0.7~0.8mでは減少し始める(運動しにくくなる)ことがわかった。
- 6) 日本人の体力に関する統計データとパワーを比較することにより、実験を行っていない年代・性別の人間へ歩行速度を概算推定する方法を提案した。

参考文献

今村文彦・藤原誠・進藤一弥・市村強(2004): 臨海都市域に來襲する津波の統合シミュレーション開発, 海工論文集, 51巻, pp.291-295
 須賀堯三・上阪恒雄・吉田高樹・浜口憲一郎・陳志軒(1995): 水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する検討, 水工学論文集, 39巻, pp.879-882.
 東京都立大学体力標準値研究会編(2000): 新・日本人の体力標準値, 不昧堂出版, pp.172-175
 土木学会編(1999): 水理公式集, pp.241-243

街路閉塞を考慮した津波浸水計算時の避難シミュレーション手法の適用

田村 保*・西畑 剛**・森屋 陽一***

瀧本 浩一****・三浦 房紀*****

津波災害における人的被害軽減のためには、適切な津波防護施設の整備を進めるとともに、迅速かつ的確な避難行動が重要な役割を担う。適切な避難行動を行うためには、住民の避難行動特性に応じた避難計画の策定が重要であるが、そのためには避難シミュレーション手法の活用が効果的である。本研究では地震時の建物倒壊により街路閉塞が発生することを確率的に考慮した津波浸水時の避難行動シミュレーション手法を示し、津波来襲時の人的被害の発生に及ぼす街路閉塞の影響について基本的な検討を行った。また、この結果に基づき避難路および避難所の整備について、その検討のあり方を提示した。

1. はじめに

臨海部に多くの人口と資産が集中しているわが国は津波・高潮による被害を受けやすい地形条件にあり、これまでも多くの人的被害を伴う災害が発生している。政府の中央防災会議でも東海地震や今世紀前半の発生が危惧されている東南海・南海地震による被害想定を行い、これらの地震に伴って発生する津波により多くの人的被害が発生することが指摘されている。このような、津波による人的被害軽減のためには、防波堤や防潮堤、水門等の津波防護施設の整備などのハード面の対策を進めることが必要であるが、対策が必要となる海岸線の延長は膨大であり、その整備には多大な時間とコストがかかる。そのため、人的被害の軽減には、これらのハード施設整備を進めるとともに、津波による地域の危険度を表示したハザードマップを整備して、住民に津波危険地域を周知するとともにそれに基づいた避難計画を策定するなどのいわゆるソフト面の対策を進めることが必要不可欠である。

津波災害時にその効果が期待できる避難計画を策定するためには、津波災害時における住民の避難行動特性を的確に反映した避難計画とする必要がある。そのための一つの有力な手法として、津波来襲時の住民の避難行動を再現できる避難シミュレーションの活用が提案されている（例えば、今村ら（2001））。この避難シミュレーション技術は主に、地下街や建物内の火災等の災害時の群集避難行動を予測する手法として開発されてきたものであるが、陸上部の津波浸水予測結果と同時刻における住民の避難状況の予測結果を重ね合わせて避難の可否を判

断することで人的被害の量的予測を行うものである。しかしながら、浸水条件下での住民の避難速度や避難の可否限界条件の設定方法や、地震時の建物および津波防護施設の被災を考慮する必要性など、津波浸水時の住民の避難行動予測手法として適用するためには、いくつかの重要な検討課題が残されている。

そこで、本研究では地震時の建物倒壊により街路閉塞が発生することを考慮した津波浸水時の避難行動シミュレーション手法を示し、人的被害の発生に及ぼす街路閉塞の影響について検討を行った。街路閉塞の発生については、瓦礫の分布幅を確率モデルとして表現できる赤倉ら（2000）のモデルを用いて、確率的に街路閉塞を表現した。実際の避難シミュレーションでは確率的に街路閉塞箇所を設定するため、対象領域が広い本検討では、すべての街路閉塞パターンを再現する避難シミュレーションの実施は現実的ではない。そこで、モンテカルロシミュレーションにより街路閉塞パターンを作成して、各試行条件での避難シミュレーションを実施して人的被害発生量を求めた。街路閉塞を考慮しないモデルから得られる指標値との比較から、街路閉塞が避難可否に及ぼす影響の評価を行った。本検討で得られる検討結果から、避難路および避難所の整備の在り方などの津波避難計画の立案にあたっての検討のあり方を提示した。

2. 街路閉塞の予測モデル

高橋ら（1998）は兵庫県南部地震による街路閉塞の発生状況を再現する街路閉塞予測モデルを構築している。交差点から交差点までを1つの街路リンクと捉えて、車両が一部でも通行可能である確率を街路通行可能率として、その閉塞状況を予測するモデルである。このモデルによれば（旧）震度階と街路幅員から通行可能率を予測できる。現実の津波被災時の街路閉塞要因となるものは、建物やブロック塀、自販機などの倒壊瓦礫、駐車車両など種々の要因が存在するが、これらの中では建物の倒壊による街路閉塞が主要な要因と考えられる。建物の倒壊

*	フェロー	工修	五洋建設（株）土木設計部	部長
**	正会員	工修	五洋建設（株）技術研究所	主任
***	正会員	博(工)	五洋建設（株）技術研究所	係長
****	正会員	博(工)	山口大学助教授	地域共同研究開発センター 次長
*****	正会員	工博	山口大学教授	工学部知的情報システム工学科

はその建築年度，構造種別によってその倒壊確率は異なることは周知の事実であるが，高橋らのモデルではそれらの要因は考慮されていない．また，街路長が長い場合には閉塞要因となる構築物が増えるために，街路閉塞率が高くなることも予想されるが，高橋らのモデルではその影響は考慮していない．**図-1**は高橋らの街路閉塞予測モデルに，兵庫県南部地震での街路閉塞事例と（旧）震度情報と合わせて示したものである．

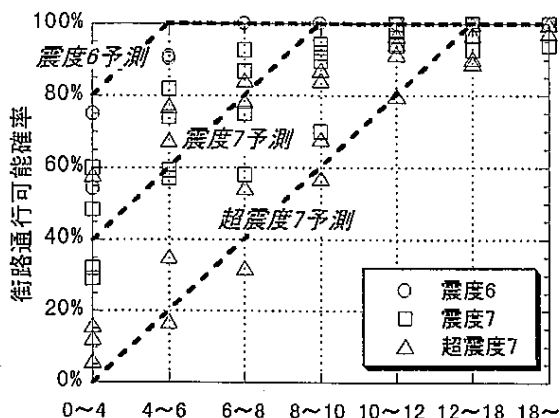


図-1 高橋ら (1998) の街路閉塞予測モデル

高橋らの街路閉塞予測モデルは車両の通行可能率を表すものであり，徒歩を原則とする津波浸水時の住民避難行動予測に直接的には使用できない．徒歩による避難に対応した街路閉塞予測モデルを作成するためには，瓦礫分布幅が予測可能ならば都合がよい．赤倉ら (2000) は高橋ら(1998)の街路閉塞予測モデルを元にして街路リンクにおける瓦礫幅の最大値の確率分布モデルを**表-1**の

表-1 街路リンクの瓦礫幅確率分布

震度	平均値 μ_l	分散 σ_l
5	0m	0m
6	-0.82m	1.57m
7	1.27m	3.14m

ように導出している．

この瓦礫幅確率分布モデルは街路リンクの街路閉塞率は高橋らの提案モデルに等しくなるように設定されている．なお，瓦礫幅に負の値を考慮しているが，その場合は便宜上瓦礫幅をゼロとしている．赤倉らはさらに，街路沿道の個々の建物の瓦礫幅の確率分布モデルを提案している．同モデルは，まず街路リンクを構成する建築物の数を n とし，仮想街路幅員 w' を式(1)のように求める．

$$w' = \Phi^{-1} \left\{ \left[\Phi \left(\frac{w - 3.0 - \mu_l}{\sigma_l} \right) \right]^{1/n} \right\} \sigma_l + \mu_l + 3.0 \quad (1)$$

個々の建物の瓦礫幅確率分布は，表-1に示される瓦礫幅の確率分布形状の平均値を $(w - w')$ だけ平行移動させ

た分布形状としている．個々の建物の通行可能率が得られる結果，個々の建物による通行可能率を R ，街路リンクにおける通行可能率を R_s とすると，街路リンクを構成する建物数 n を用いて，式(2)が成立する．

$$R_s = R^n \quad (2)$$

本来，街路リンクの通行可能率は兵庫県南部地震の街路閉塞を最も適切に再現できるモデルとして求められたものであり，街路延長や建物数についてはモデルのパラメータとして考慮されていない．

ここでは以下のような仮定のもとで，街路延長を考慮するためのモデル化を行う．赤倉らのモデルで考慮した兵庫県南部地震における事例は平均的な街路長を代表するモデルと考えられる．ここでは，平均的な街路条件として $n=4$ と想定し，赤倉らのモデルから得られる個々の建物の瓦礫幅の確率分布を，任意長さの街路に対する閉塞率の算定に使用する個々の建物による瓦礫幅確率分布とする．すなわち，街路延長が異なる街路の閉塞率 B_s は式(3)で求めることに対応する．

$$B_s = 1 - (1 - R_{n=4})^n \quad (3)$$

ここに， $R_{n=4}$ は n を 4 とした際の個々の建物の瓦礫確率分布から求まる個々の建物による通行可能率である．

津波避難では，歩行者の通行に支障となる街路閉塞確率を算定することが必要であるが，歩行者による街路幅員の歩行可能性を判定する指標として適切なものは見当たらない．そこで，本検討では便宜的に，瓦礫の無い道路幅と歩行速度の関係を**表-2**のように設定した．すなわち，道路幅が 1.5m 以上確保されている場合には避難行動に支障が無いものと仮定し，0.5m より狭い場合には避難者は通行を回避するものとした．また，瓦礫の無い道路幅が 0.5m~1.5m の場合に歩行速度が減少するとした．

表-2 街路幅員と歩行速度の関係

街路幅員	歩行可能性	歩行速度低減率
1.5m 以上	可能	1.0 倍
0.5m~1.5m	可能	0.5 倍
0.5m 未満	不能	0.0 倍

この条件で，震度 6 と震度 7 の条件に対して式(3)で $n=2,4,6,9$ とした場合の街路閉塞率を求めたのが**表-3**である．歩行速度が低減する確率も同様に求めてみた． $n=4$ に対応するケースは**表-1** から同様の避難可否条件を設定した場合に求まる街路閉塞率に等しくなる．

3. 街路閉塞考慮した避難シミュレーション手法

本検討では，西畑ら (2005) が気仙沼地点で実施した津波避難シミュレーションで採用した手法を用いた．西畑らの避難シミュレーションモデルは瀧本ら (1996) の

表-3 街路沿道の建物数 n を考慮したリンク閉塞率

震度	道路幅(m)	n			
		2	4	6	9
6	1.25	0.028	0.056	0.082	0.121
	2.25	0.009	0.017	0.026	0.039
	4.25	0.000	0.001	0.001	0.002
	7	0.000	0.000	0.000	0.000
	13	0.000	0.000	0.000	0.000
7	1.25	0.233	0.411	0.548	0.696
	2.25	0.166	0.304	0.420	0.558
	4.25	0.072	0.139	0.201	0.286
	7	0.015	0.031	0.045	0.067
	13	0.000	0.000	0.000	0.000

手法を基本としており、避難空間をノードとリンクからなるネットワークモデルとし、横山ら(1993)によるポテンシャルモデルを用いた避難行動モデルを基本とするものである。ただし、住民の避難速度および避難可否条件を、津波浸水を模擬した水路内での水中歩行実験結果(Nishihata ら, 2005)から設定した点に特徴を有する手法である。本検討では、身長 170cm, 体重 70kg の 30 歳男性を避難者として想定して、式(4)で求められる歩行速度で避難するものとしている。また、避難が不能となる条件は式(5)で与えるものとしている。

$$v(u, h) = \min \left(\sqrt{\frac{0.9330 - 2.176A^{3/2}}{aA}} - u, 1.5 \right) \quad (4)$$

$$v(u, h) \leq 0.4 \quad \text{or} \quad h \geq 1.5 \quad (5)$$

ここに、 u : 流速(m/s), h : 水深(m), a : 安全率(=3)である。 A は人体が抗力を受ける面積であり、水深の関数として式(6)としている

$$A(h) = -0.1756h^3 + 0.5173h^2 - 0.0375h \quad (6)$$

街路閉塞は前節の表-3 で示した街路延長を考慮したリンク(街路)閉塞率を用いて確率的に表現する。そのため、住民が避難路とする個々のリンク(街路)の情報として、道路幅と交差点間の距離に対応するリンク長を与える。避難シミュレーションではこれらの個々のリンクの情報に基づき、同リンクの通行不能条件や歩行速度が遅くなる条件を確率的に与える。津波時の避難では対象となる領域が一般的に広大なため、確率的に表現される街路閉塞箇所のネットワーク上でのすべての発生パターンを再現して避難シミュレーションを実施するのは現実的ではない。そこで、試行回数を減らすためにモンテカルロシミュレーションを採用することとした。

モンテカルロシミュレーションでは、1 試行ごとに発生確率に応じて閉塞するリンクおよび速度低下が発生するリンクを確率的に発生させる。このようにして構成されるノード・リンクモデルに対して避難シミュレーションを実施し、避難不能となる避難者数を求めることとした。

試行回数を増やすことで避難不能となる避難者数の頻度分布が得られる。街路閉塞の発生を考慮しない場合の避難シミュレーション結果から得られる避難不能となる避難者数とこれらの結果を比較することで、街路閉塞することによる避難に及ぼす影響が示される。

4. シミュレーションの諸条件

本検討で対象とするのは宮城県気仙沼市大川北部地区とした。想定する津波は、宮城県防災会議地震対策等専門部会の第 3 次被害想定(2004)で検討対象とされている宮城県沖地震(連動型)とした。あらかじめ検討地域に対する津波浸水計算を行い、避難シミュレーションを行う各地点の浸水深と流速の時系列の値を取り出し、前項で示した避難シミュレーションでの歩行速度および避難可否条件の判定に使用した。

津波浸水シミュレーションは、深海域では線形長波による伝播計算を、浸水対象域に近い浅海域では非線形長波理論及び小谷ら(1998)に従った粗度設定と遡上アルゴリズムにより伝搬および浸水計算を行った。差分はスタガードリーブフロッグ法とした。また計算は検討地点に近づくにつれて格子サイズを 1/3 ずつ小さくしてゆき、最終的には 50/3m メッシュで地形を再現した。図-2 に計算領域を示す。地震断層は宮城県防災会議地震対策等専門部会の資料(2004)に示された断層パラメータを用い、Mansinha・Smylie(1971)に従って初期海面変位を与えた。津波は地震発生後 40 分で対象地域で浸水遡上を開始し、最大浸水深 2m を超える浸水が海側の埋立地を中心に発生する。図-3 は対象地域の浸水域と最大浸水深を示したものである。

避難シミュレーションにあたっては、避難経路上の街路閉塞の影響を検討することを主眼とするため、避難場所の数や配置は検討パラメータとせず、対象地区で実際に指定されている位置に設定した。同じく、避難開始

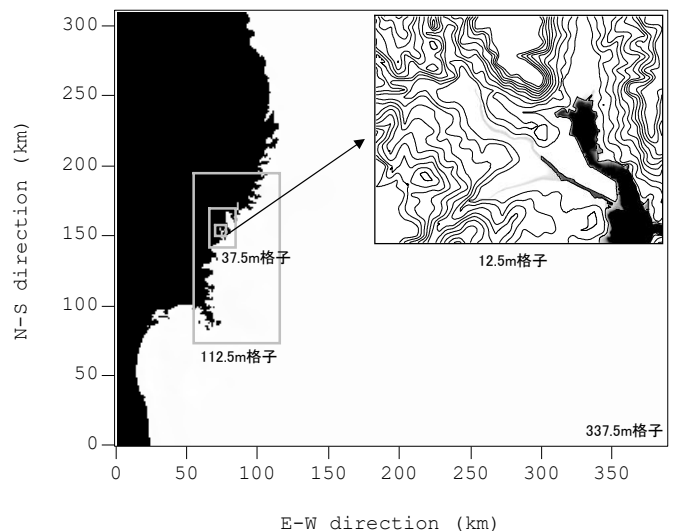


図-2 計算領域

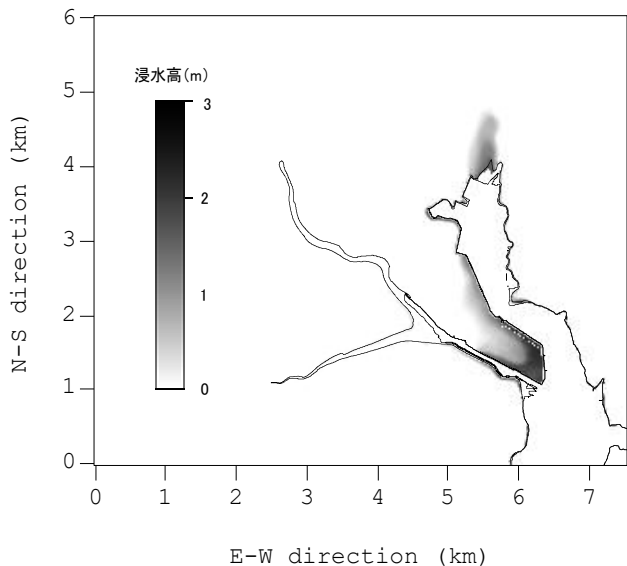


図-3 浸水域と最大浸水深

時間による影響も検討対象としていないので、全員が地震発生後 40 分後に避難を開始するとの条件で検討した。避難者は対象地区である大川北部地区内に、前項で示した 30 歳男性の平均的な身体特性を有する 1000 人をランダムに配置した。

ノード・リンクモデルの作成は2万5千分の1の数値地図情報から行い、街路幅員についても同数値地図から得られる道路幅員を用いた。なお、2万5千分の1の数値地図から得られる街路幅員は1.5m未満、1.5m以上3.0m未満、3.0m以上5.5m未満、5.5m以上13.0m未満、13.0m以上の分類となっている。そこで、それぞれの幅員分類を代表する幅員としてそれぞれ、1.25m、2.25m、4.25m、7m、13mを与えるものとした。リンク延長に対応する建物数nについては、リンク延長との関係で表-4のように与えるものとし、それぞれの建物数nと街路幅に対して街路閉塞および通行支障となる確率を与えるものとした。図-4は避難シミュレーションで用いたノード・リンクモデルと避難所および避難者の初期配置を示す。

表-4 リンク長（街路延長）と建物数 n

リンク長	30m 未満	30m~50m	50m~70m	70m 以上
n	2	4	6	9

街路閉塞の検討では、2節で示したように当該地震による対象地域の震度と、リンクを表す街路の幅員とその延長が必要となる。宮城県防災会議地震対策等専門部会の資料（2004）によると、宮城県沖地震（連動型）では対象地区の予想震度は震度5強から震度6弱と推定されている。今回の検討では街路閉塞の影響を定性的に評価することを主眼としていることから、津波の浸水計算で想定した対象地震での予想震度にこだわらず、対象地域全域で（旧）震度6と7の中間的の震度条件をとるものと仮定



図-4 避難シミュレーションで用いたノード・リンクモデルと避難者の初期配置

した。具体的には、表-4で示される震度6と7の震度情報から得られる閉塞率の平均値を全てのリンクでとるもの仮定し、同様に歩行速度が低下するリンクを同様に仮定して避難シミュレーションを実施するものとした。

5. 検討結果

図-5は街路閉塞を考慮した場合について、モンテカルロシミュレーションの試行回数を500回とした場合の避難成功率の出現頻度分布を確率密度関数として示したものである。同図にはモンテカルロシミュレーションの試行回数による収束条件を確認するために、300回および200回の試行回数とした場合に得られる避難成功率の頻度分布を確率密度関数として示したものと合わせて示している。500回の試行で安定した頻度分布が得られていることがわかる。同図中には街路閉塞を考慮せず、地震発生後40分後に避難を開始するケースでの避難成功率74%を太矢印数で示している。この結果によれば、旧震度6.5程度の条件で街路閉塞を発生させた場合には、避難成功率が上昇するケースと逆に避難成功率が下がるケースの2通りが存在することがわかる。

避難失敗者の多くは埋立地の海側から避難を開始する住民が北東側の海沿いの道を避難するケースで発生している。図-6は街路閉塞を考慮することで逆に避難成功率が向上する場合について、避難不能者の初期位置と避難所要時間のコンターを示した図中に閉塞した街路を太線

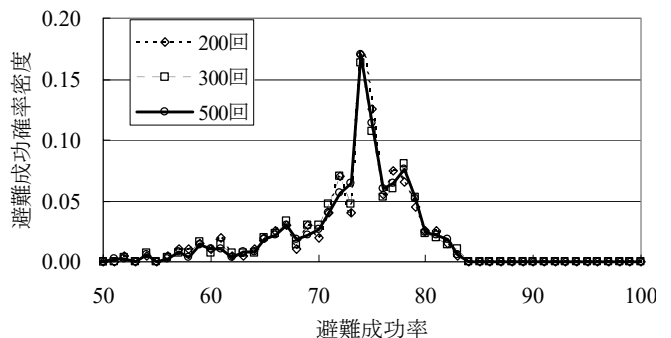


図-5 避難成功率の出現確率密度分布

で示したものである。この場合、埋立地の海側から避難を開始する住民が、街路閉塞の発生パターンによって対象地区中央の道を避難路として選択せざるを得ない状況になり、結果的に被災を免れる住民が増えること（図中の右下の川沿いに近い地区の住民の避難経路が限定され被災を免れている）によっている。このことは、避難路の選択にあたって、浸水箇所が発生状況を適切に考慮する必要性を示すものと考えられる。



図-6 避難成功率80%となる場合の被災者初期位置
(コンターとその数値は避難成功者の避難完了時間を示す)

一方、街路閉塞を閉塞の発生状況によっては避難成功率の低下するケースの発生も無視し得ない程度に発生している。このような街路閉塞の影響による津波被害者の増加に対応するためには、例えば沿道の建築物の耐震補強を進めることは有効である。ただし対策実現には時間がかかるため、避難完了に大きな遅れが生じない程度の範囲で幅員の広い道路を利用するなど、避難計画での配慮が必要である。街路沿道の建築物の耐震補強の実施による効果を検証するために、街路閉塞を考慮しない場合に避難者が避難路として利用する率が多い10のリンクについて耐震補強対策が実施され街路閉塞が発生しない条件とし、その他の街路については前項と同じ条件とした試行回数を500回としてモンテカルロシミュレーションを実施した。図-7は避難成功率の出現頻度分布を、耐震補強対策を実施しない場合と比較して示したものである。改修対象のリンクは全体リンクの数パーセントに過ぎないが、避難成功率が7割を下回るケースがほぼなくなった。効果的な耐震補強計画の立案における本手法の適用を示す一例と考えられる。

6. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 街路閉塞を考慮することで人的被害の発生をより現実に近い条件で予測することが可能となり、より適切な避難所配置および避難路計画の立案が可能となった。
- (2) 人的被害の低減のためには街路閉塞による避難路

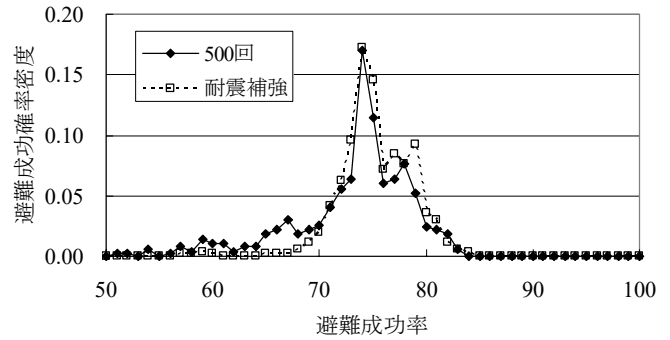


図-7 避難成功率の比較

の閉鎖を避けることが重要であるが、本検討で提案した手法を用いることで、耐震補強対策の優先順位を合理的に設定可能であることが示された。

謝辞：本研究は気仙沼海岸防災研究会における活動の一環として行った。当研究会において東北大学の今村教授を始め多くの方々に有益な助言を頂いたことを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 赤倉康寛・高橋宏直・中本 隆 (2000)：都市臨海部地震被害予測のための街路閉塞現象のモデル化の試み，港湾技術研究所報告，第39巻，第3号，pp.19-41。
- 今村文彦・鈴木 介・谷口将彦 (2001)：津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用，自然災害科学，Vol.20，No.2，pp.183-195。
- 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，第45回海岸工学論文集，pp.356-360。
- 河田恵昭・鈴木進吾・越村俊一 (2004)：防災対策の不確実性を考慮した津波減殺効果の評価手法，第51回海講論文集，pp.1311-1315。
- 高橋宏直・赤倉康寛・中本 隆・吉村藤謙 (1998)：兵庫県南部地震による被害を踏まえた街路閉塞シミュレーションに関する研究，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.3131-3136。
- 瀧本浩一・三浦房紀・清野純史 (1996)：防災要因と避難者の間の情報伝達を考慮に入れた避難行動シミュレーション，土木学会論文集，No.537，pp.257-266。
- 西畑剛・森屋陽一・田村 保・瀧本浩一・三浦房紀 (2005)：気仙沼地点における津波避難シミュレーション，第22回海洋開発シンポジウム論文集，pp.210-214。
- 宮城県防災会議地震対策等専門部会(2004)：宮城県地震被害想定調査に関する報告書
- 横山秀史・目黒一郎・片山恒雄 (1993)：人間行動シミュレーションによる地下街の安全評価に関する研究，地域安全学会論文報告集，No.3，pp.161-164。
- Nishihata, T., Y. Moriya, T. Tamura, K. Takimoto and F. Miura (2005)：Experimental study on people's walking velocities during the evacuation from flood situation like tsunami hazard, Proc. International Symposium on Monitoring, Prediction and Mitigation of Disasters-2005(Kyoto), pp.447-465。
- Mansinha, L. and Smylie D. E.(1771)：The displacement fields of inclined faults, Seismol. Soc. Amer., Vol.61，pp.1433-1440。