

防護施設とまちづくり

Role of Sea Walls and City Planning for Evacuation against Tsunami

有 川 太 郎

Taro ARIKAWA

1. はじめに

戦後における沿岸域の防護施設等の整備は、1956年の海岸法の制定から始まっている。戦後、復興過程にある日本を、数多くの台風による高潮被害が襲ったが、なかでも、1953年の台風13号では甚大な被害が生じた。さらに、海岸法制定後の1959年には、「伊勢湾台風」として知られる台風15号により、死者5000人以上という大きな災害に見舞われた¹⁾(図-1)。

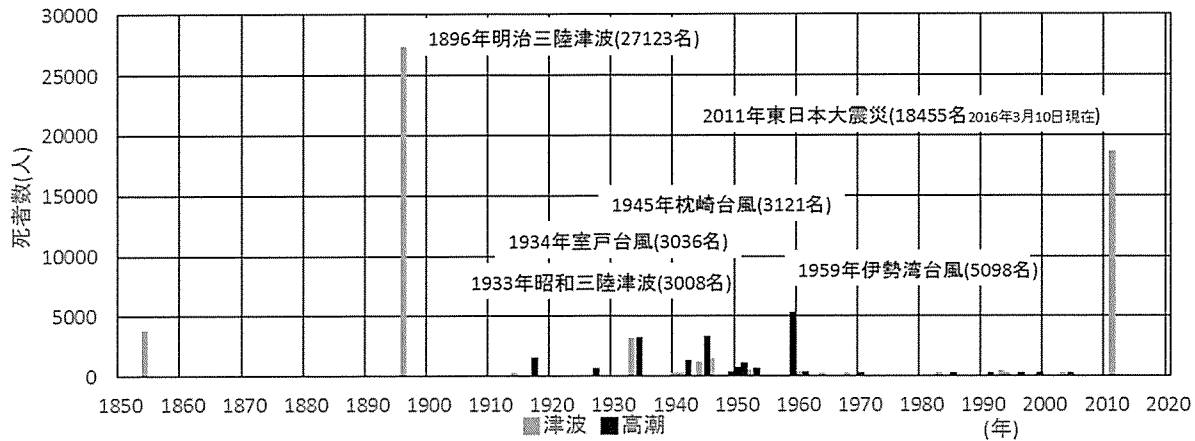


図-1 近年の津波・高潮による犠牲者数の水位

海岸法の制定の目標は、沿岸域を「防護」することにあった。防潮堤や護岸を設置する、いわゆる「線的防護」を行い、浸水を許さず沿岸の背後地域を守るということを目標とした。図-1でもわかるとおり、沿岸における被害者数は、1959年の伊勢湾台風以降激減し、その目標がある程度達成できたと思われたころ、防潮堤や防波堤などの人工構造物を建造したことによる弊害が顕著となった。弊害とは、例えば、防潮堤があることで海岸へのアクセスが悪くなり、海岸から人々の関心が薄れる、防波堤などの固定構造物により、湾内環境の悪化や周辺の砂浜の浸食が進むといった問題である。そこで、「線」による防護から、親水性や沿岸環境に配慮した「面的防護」方法へとシフトし、1999年に「防護・環境・利用」を主たる目的とする海岸法の改正がなされた。また、土木構造物の供用期間の問題が顕著となりはじめ、建造してきた防護施設の維持管理をどうしていくかが大きな問題として取りざたされた。四面を海に囲まれた日本は、海岸線も長く、順次修復していくだけでも、相当な金額が必要となるからである。

2005年に、2004年のスマトラ沖地震を踏まえ、国土交通省では、津波対策検討委員会を開き、津波対策に対する提言²⁾を行っている。この提言は、津波対策を横断的・網羅的にとりまとめたものとしては、国内では初めての提言となる。提言では、特に、日本のこれまでの津波対策を、事前予防対策としてのハード整備中心の考え方に立つものと評価した上で、事前から事後にわたりハード整備およびソフト対策をあわせて展開し、被害の最小化を目指すという考え方へ転換した対策を強力に推進するように求めている。そのような状況下において、2011年に東日本大震災が発生した。

震災のすさまじさを目の当たりにしたことからか、津波という現象が、海岸や津波の専門家だけではなく、国民全体の関心事となり、広い分野で、防護施設の役割が議論されることとなった。一方で、震災直後の中央防災会議にて、提言という形で防護施設の役割が示された³⁾。

提言では、「海岸保全施設等に過度に依存した防災対策には問題があったことが露呈され」、「最大クラスの津波レベルを想定した津波対策を構築し、住民の生命を守ることを最優先として、どういう災害であっても行政機能、病院等の最低限必要十分な社会経済機能を維持することが必要」であり、その上で「防護施設に対して、設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発を進め、整備していくことが必要である」とされた。2005年時において出された国土交通省としての提言から国としての提言に変わり、かつ、より具体的に示された。それに伴い、沿岸の町づくりは、浸水を完全に止めるという思想から、浸水を許すことも前提とした町づくりへと変わっていく必要がある。

そして、その中央防災会議において、今後の津波被害軽減方策として、「津波からの避難を容易にするためには、海岸保全施設等の整備に加えて、交通インフラなどを活用した二線堤の整備、土地のかさ上げ、避難場所・津波避難ビル等や避難路・避難階段の整備、浸水リスクを考慮した土地利用・建築規制などを組み合わせ、地域の状況に応じて適切に実施する必要がある。」とし、また、「津波からの迅速かつ確実な避難を実現するため、徒歩による避難を原則として、地域の実情を踏まえつつ、できるだけ短時間で、津波到達時間が短い地域では概ね5分程度で避難が可能となるようなまちづくりを目指すべきである。」を提言した。

しかし、浸水を前提としたまちづくりの方法は、未だ議論している最中にあると思われ、その方法を整理し、確立することは急務であると感じる。人口減少、生業、経済効果など、様々な視点があるが、ここでは、特に、防護施設や、避難路等が避難へ及ぼす影響の観点からまちづくりを検討する。

2. 東日本大震災における防護施設の高さと死亡率の関係

東日本大震災の津波においては、防潮堤を大きく越える高さの津波が来襲している地域も多い。被災後に内閣府が取りまとめた東日本大震災時の地震・津波避難に関する住民アンケート調査⁴⁾から、「地震当日中に津波から避難した人は約8割であった」「揺れが収まって30分以内に避難を開始しているのは約5割であった」などのアンケート結果が出ている。また、同アンケートにて避難しなかった理由に「この地域には防潮堤を超えるような大きな津波は来ないと思った」と答えた人は、13.5%であった。そこで、上記のアンケート調査から、東日本大震災時における防潮堤の死亡率に与えた影響を検討する。

2.1. 各種データの整理

特に被害が甚大であった岩手県、宮城県の二県を対象とし、市町村毎にアンケート調査結果等⁵⁾を用いて、平均避難開始時間、津波来襲時間などを整理し、その関係を検討した。以下に、データの取得ならびに整理方法を示す。

a) 平均避難開始時間

津波避難行動を考える上で避難にかかる時間を大きく二つに分けると、避難するまでに要した時間(避難開始時間)と避難そのものに要した時間(避難所要時間)となる。もっとも短い避難時間は、避難開始時間が地震発生からすぐに避難を開始する0分後、避難所要時間が避難所までの最短経路で移動したときの移動時間となったときであると考えられる。しかし、実際の避難行動は、様々な要因によって避難開始時間が遅れ、避難所要時間も、避難路の知識の不足や地震による閉塞のため、最短避難所要時間よりも遅くなることが多い。そこで、まずは、避難開始時間に着目し、復興支援調査アーカイブの個人向けの避難行動調査⁶⁾から平均避難開始時間を整理した。

b) 津波来襲時間

国土交通省⁹⁾における検討から、各地域の津波来襲時間を得た。

c) 被災当時の堤防高

宮城県沿岸の海岸堤防高の設定⁷⁾、岩手県沿岸の海岸堤防高の設定⁸⁾から被災当時の堤防高を得た。ただし、各市町村の海岸に整備されていた堤防高さを正確に知ることは困難であるため、海岸別の値を市町村毎

で分けし、平均した値を代表高さとした。

d) 津波痕跡高

c) と同様の資料 7,8) から津波痕跡高を得た。海岸別の値を、市町村毎で分けし平均した値を代表高さとした。

e) 浸水範囲人口に対する死亡率

死者数と浸水範囲人口 9,10,11) から、浸水範囲人口当たりの死亡率(以下、浸水人口死亡率)を算出した。

2.2. 堤防高と死亡率との関係

2.2.1. 津波来襲時間/平均避難開始時間と浸水人口死亡率の関係

津波来襲時間を T_t 、平均避難開始時間を T_s と置くと、津波来襲時間に対する平均避難開始時間の比を無次元避難開始時間と定義し、以下の(1)式にて算出する。

$$\frac{T_s}{T_t} = \frac{\text{平均避難開始時間}}{\text{津波来襲時間}} \quad (1)$$

図-2 に無次元避難開始時間と浸水人口死亡率の関係を示す。全体的には、無次元避難開始時間が小さくなればなるほど、死亡率が小さくなっていることがわかる。一方で、避難場所までの移動時間も重要である。図では、津波来襲時間の 0.4~0.5 以上になると、浸水人口死亡率にばらつきが大きくなっているが、これは、避難場所までの移動に所要した時間のばらつきが大きいとか、死亡者の避難開始時間が生存者と異なる、などの理由が考えられる。

2.2.2. 被災当時の堤防高/津波痕跡高と浸水人口死亡率の関係

被災当時の堤防高 H_b を、津波痕跡高を H_t と置くと、被災当時の堤防高に対する津波痕跡高の比率を無次元堤防高として、以下の(2)式で算出した。

$$\frac{H_b}{H_t} = \frac{\text{堤防高}}{\text{津波高}} \quad (2)$$

図-3 に無次元堤防高と浸水人口死亡率の関係を示す。無次元堤防高が 1.0 の時は、津波高と堤防高が等しいことから津波は堤防を越えなかったため、浸水人口死亡率は 0.0% となっていることがわかる。総じて言えば、無次元堤防高が小さくなるにつれ、浸水人口死亡率が大きくなっていることがわかる。一方で、1.0 から 0.5 までは浸水人口死亡率は徐々に高くなり、0.4 付近でピークとなっているようにも見え、それよりも小さいと、浸水人口死亡率が減少傾向になっているようにも見える。

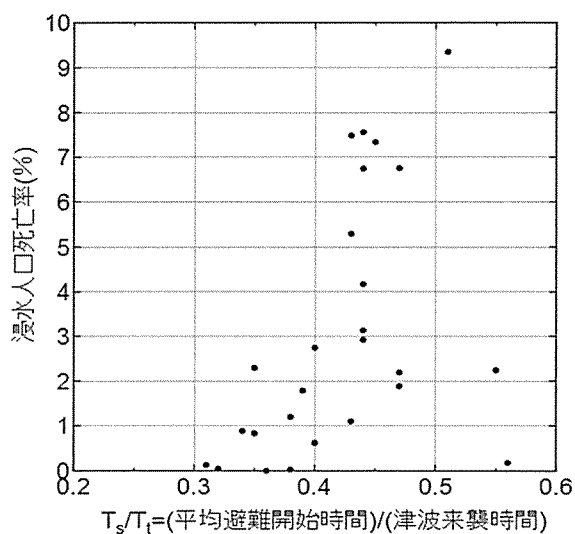


図-2 無次元避難開始時間と浸水人口死亡率の関係

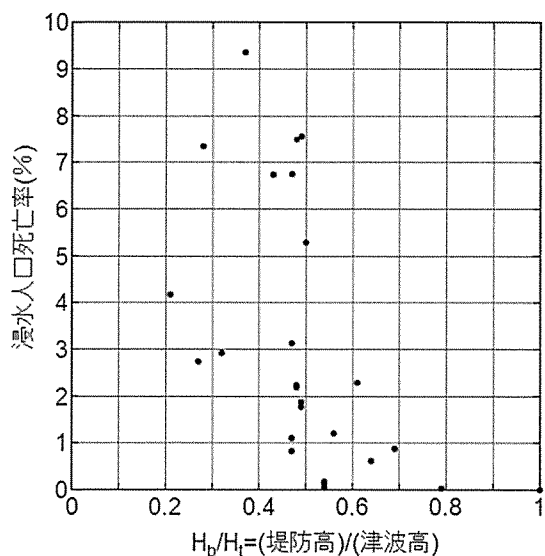


図-3 無次元堤防高と浸水人口死亡率の関係

3. 避難シミュレーションを活用した防護施設の効果に関する検討

次に、防護施設の避難に対する効果について、津波シミュレータと避難シミュレータを用いて検討する。

3.1. 数値シミュレーションの概要

津波シミュレーションとして STOC-ML¹²⁾を用い、避難シミュレーションには有川ら¹³⁾で開発されたマルチエージェントモデルを使用した。

3.1.1. 使用したポテンシャル要素

避難者の進行方向の決定には、各要因を個別にポテンシャルとして定義し、重ね合わせることで進行方向を決定するモデルを導入している。主としては、最短経路を選択するポテンシャル等であり、当該避難シミュレーションを用いることで、もっとも短い避難移動時間を計算できると考えられる。つまり、本シミュレーションにより得られた結果は、最短の避難所要時間を用いた結果となり、最小の死亡率を示唆するものであると考えられる。

3.1.2. 死亡判定

1m を超える浸水深を持つセルに含まれる避難者を、死亡と判定した。

3.2. 東日本大震災における防護施設の効果の検討

3.2.1. 対象地域

津波避難シミュレーションを二つの地域にて行った。以下に対象地域を示す。

1) 岩手県陸前高田市高田地区

一つ目の地域として岩手県陸前高田市高田地区を選択した。岩手県陸前高田市高田地区は三陸リアス式海岸の一部を形成しており、歴史的に津波来襲回数が多い地域である。死者数の比較をすると、明治三陸地震津波は 19 名、昭和三陸地震津波は 3 名、チリ地震津波は 7 名であった。一方で、東日本大震災の岩手県陸前高田市の死者数は 1556 名であり、浸水範囲人口に対する死亡率は、本研究の対象地域のなかえ最大の 9.35%であり、平均避難開始時間は約 20 分後であった。整備されていた防潮堤は原型を一部残すのみであった。そこで、

- ・浸水人口死亡率が、本研究の対象地域のなかで、一番高かったこと
- ・防潮堤に対して津波の高さが十分に高かったこと

から計算対象地域とした。

2) 岩手県宮古市田老地区

二つ目の地域として岩手県宮古市田老地区を選択した。岩手県宮古市田老地区は三陸リアス式海岸の一部を形成しており、歴史的にも津波被害の回数が多い地域である。明治三陸地震津波は 1859 名、昭和三陸地震津波は 911 名、という被害が生じている。このような背景から、高さ約 10m の防潮堤が整備された。その後の 1960 年のチリ地震津波においては死者を出さないという効果を発揮した。

東日本大震災の津波による死者数は岩手県宮古市で 420 名であり浸水範囲人口に対する死亡率は 2.29%である。平均避難開始時間は約 14 分後であった。津波によって防潮堤は破壊されたが、他の市町村と比較して人的被害が小さかったため、計算対象地域とした。

3.2.2. 計算条件

1) 岩手県陸前高田市高田地区

表-1 に計算条件、図-4 に計算領域、図-5 には、避難経路と避難場所を示す。過去の航空写真から道路を抽

出し、避難経路として設定している。避難場所については、高台となる場所や、避難指定場所から設定した。

2) 岩手県宮古市田老地区

表-1 に計算条件、図-6 に計算領域を示す。図-7 には避難経路と避難場所を示す。

表-1 計算条件

項目	高田地区	田老地区	備考
津波シミュレータ	STOC-ML	STOC-ML	波源からネスティング
遡上計算領域	図-3 参照	図-6 参照	
格子間隔	10.0m	10.0 m	
格子数	270×240	120×115	
タイムステップ間隔	0.1s	0.1s	
避難者数	1000人	1000人	死亡率を少数第1桁まで算出するため
避難速度	1.0m/s	1.0m/s	斜面勾配は、ハイキング関数を用いる
避難開始時刻	0分～35分	0分～35分	5分刻み
防潮堤高さ	0.0m～15.0m	0.0m～15.0m	5.0m刻み
避難所数	10箇所	3箇所	
避難経路ポテンシャルの重み	1	1	最短経路を仮定
避難者の死亡判定	1.0m	1.0m	



図-4 計算領域(陸前高田)

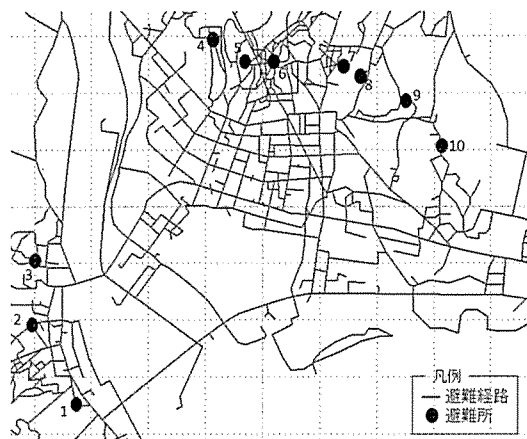


図-5 避難経路と避難所の設定(陸前高田)



図-6 計算領域(田老)

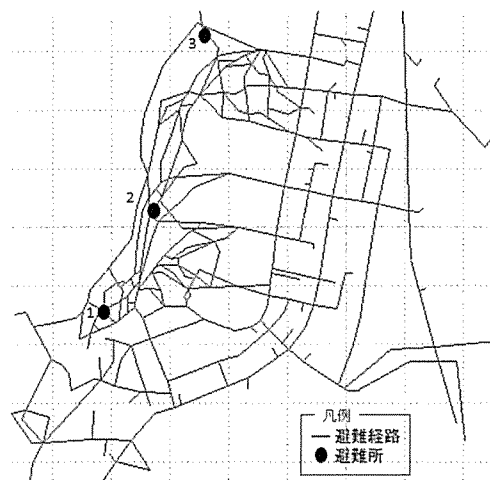


図-7 避難経路と避難所の設定(田老)

3.2.3. シミュレーションの結果

1) 岩手県陸前高田市高田地区

a) 痕跡値との比較

図-8 に、図-4 の計測点における津波シミュレーションによる時系列水位と痕跡高との比較を示す。計算結果のほうが若干高いものの、計算結果における浸水範囲は、東日本大震災時と、ある程度一致していることを確認した。ここでは、避難行動の確からしさではなく、堤防の高さの避難成功率に与える影響をみることに主眼を置くものとする。

b) 避難シミュレーションの結果

図-9 に津波避難シミュレーション計算結果を示す。防潮堤の高さによる死亡率の違いも同時に示している。どの堤防高でも避難開始時間 0 分後から 10 分後までは死亡率は 0.0% である。東日本大震災時に近い条件(平均避難開始時間 20 分後、防潮堤高さ 5m) での計算結果は死亡率 6.5% となった。実際の死亡率は 9.35% であると考え、それ以下の数値となったが、この避難シミュレーションでは、最短経路を用いたシミュレーションであるため、実際の避難行動を模擬しているわけではなく、避難時間を遅らせる要因は省かれていることが要因として考えられる。

c) 計算結果の考察

防潮堤により、浸水域は、防潮堤が無いときと比較して、防潮堤 5m の時には死亡率は 0.28%、10m の時には 1.63%、15m の時には 4.48% の低減が確認された。本計算においては、最短経路避難であることから、死亡率の変化は、津波浸水の効果と直結している。従って、津波の堤防の高さより相対的に高くなるとその効果が薄れることを示していると考えられる。本条件下のように、堤防よりも津波が比較的高い場合においては、避難開始時間を早くすることが、死亡率の低減に大きく寄与していることがわかる。

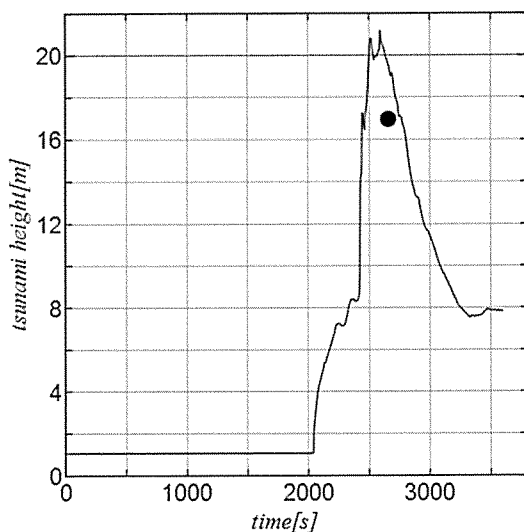


図-8 痕跡値と計算値の比較（津波高）

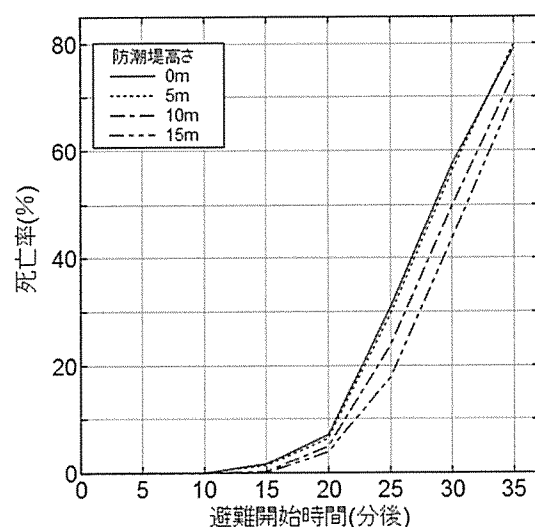


図-9 津波避難シミュレーション計算結果

2) 岩手県宮古市田老地区

a) 痕跡値との比較

図-10 に、図-6 の観測点における津波シミュレーションによる時系列水位と痕跡高との比較を示す。津波高を比較すると計算値は約 8m、痕跡値は約 8m であり、計算値と痕跡値は概ね同様の値となった。

b) 避難シミュレーションの結果

避難開始時間が 15 分後までは死亡率は 0.0% であるが、そこから避難開始時間を 5 分ごとに遅らせていく

と死亡率は上がっていく(図-11)。東日本大震災時の条件(平均避難開始時間 14 分後, 防潮堤高さ 10m)での計算結果は死亡率 0.0%となった。実際の死亡率は 2.29%であり, それ以下の数値となっている。これは, 陸前高田と同様であるが, 最短経路のみを扱ったシミュレーションであり, 妥当であると考えられる。

c) 計算結果の考察

防潮堤による浸水域の低減率は, 防潮堤 5m 時 1.13%, 10m 時 5.13%, 15m 時 5.61%と陸前高田の結果より若干大きかった。また, 堤防高が 0m から 5m となることで, 同一の避難開始時間で死亡率を比較的下げている。これは, 堤防高に対して, 津波高がそこまで大きくないことが影響していると考えられる。

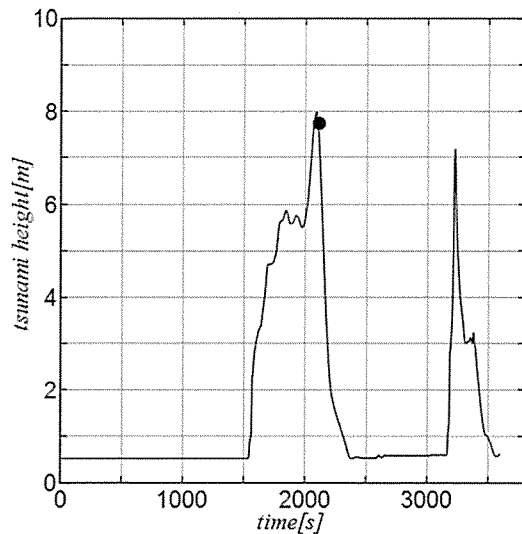


図-10 痕跡値と計算値の比較(津波高)

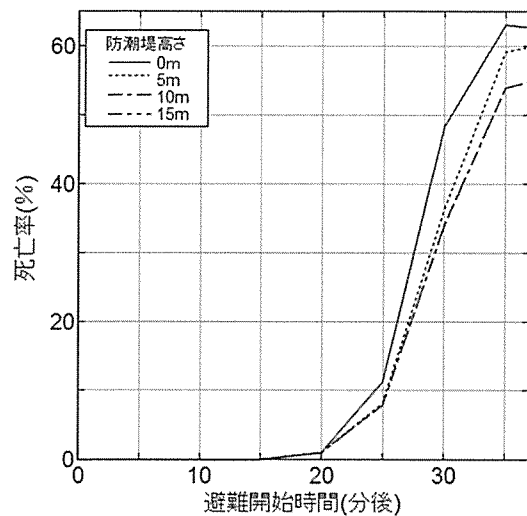


図-11 津波避難シミュレーション計算結果

3.2.4. シミュレーション結果とアンケート調査等の結果との比較

最後に, 両地域の計算結果を図-3の結果と比較したものを図-12に示す。ここでは, 代表として, 高田地区では防潮堤の高さ 5.0m, 平均避難開始時間 20 分とするし, 田老地区では, 防潮堤の高さ 10.0m, 平均避難開始時間 15 分の結果をいれた。また, 図-3の結果についても, 平均避難開始時間ごとに, 記号の種類を分けた。

これをみると, 無次元堤防高の 0.2 から 0.4 程度の間にある地区で, 死亡率が低い地区は, 平均避難開始時間が 10 分から 15 分程度となっており, シミュレーションの結果からも, 10 分から 15 分程度に開始した場合においては, 本研究の対象地域では, 死亡率が低くなるという結果となった。ここで, 10 分から 15 分という数字については, 津波来襲時間との相対的なものであるため, 本計算条件下以外の津波の条件では, 適用できないを念のため記しておく。

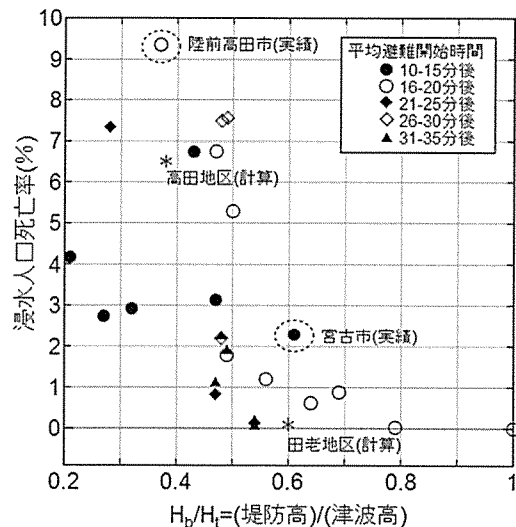


図-12 無次元堤防高と浸水人口死亡率

3.3. チリ国における検討

3.3.1. 対象地域

異なる津波に対する避難行動を検証するため、2010年2月27日に発生した津波と2015年9月17日(現地時間16日)に発生した津波でシミュレーションを行った。2010年の津波を Talcahuano, 2015年の津波を Tongoy を対象地域にした。図-13 と図-14 に対象地域の位置関係を示す。

1) Talcahuano

Talcahuano はチリ中央部の南部に位置し、人口は約 25 万人である。2010年2月27日のチリ地震では、2.3m の津波が観測され、7.1～8.2m の津波痕跡高が計測された。

2) Tongoy

Tongoy チリ中央部に位置する。検潮所がないため 2015 年 9 月 17 日の地震の津波高は不明であるが、Tongoy の北東に位置する Coquimbo では 4.8m の津波が観測され、6～7m の津波痕跡高¹⁴⁾が計測された。建物などの津波被害は甚大であったが人的被害は全地域で 12 人であった。

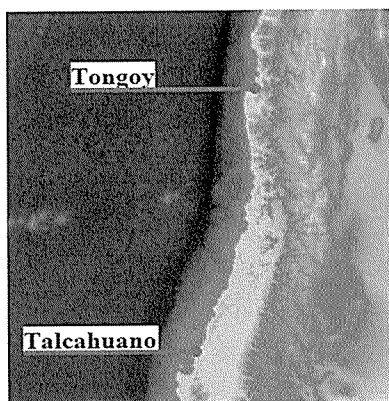


図-13 対象地域

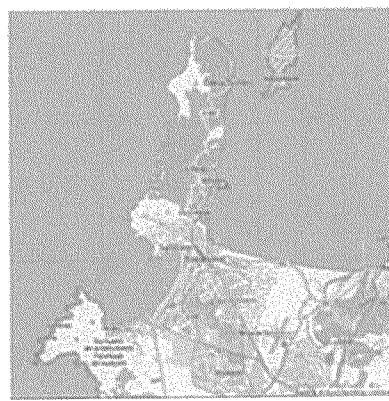
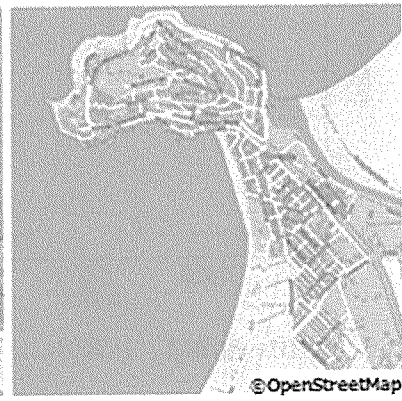


図-14 Talcahuano 地区



Tongoy 地区

3.3.2. 計算条件

避難所の設定は標高 30m 以上の地点とした。避難者の初期位置は避難経路上にランダムに配置し、避難開始時間を変えて計算した。表-2 に、それぞれの地区の入力条件を、図-15 に Talcahuano 地区、Tongoy 地区の避難経路及び避難所の位置関係を示す。

表-2 計算条件

項目	Talcahuano	Tongoy
空間格子間隔	10.0m	10.0m
格子数	285×275	485×275
タイムステップ間隔	0.1s	0.1s
避難者数	1000人	1000人
避難所数	4か所	3か所
避難者移動速度	1.0m/s	1.0m/s
避難開始時間	0s ～ 7200s, 300s間隔	0s ～ 7200s, 300s間隔
防潮堤高さ	0m, 2m, 4m, 6m	0m, 2m, 4m, 6m
解析終了時間	7200s	7200s

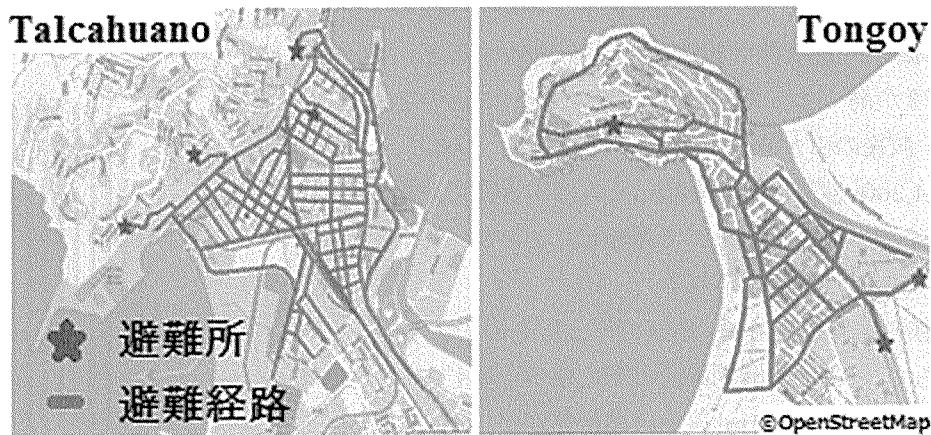


図-15 避難経路及び避難所の位置関係

3.3.3. 避難開始時間の違いによる死亡率の違い

図-16 に、避難開始時間の違いによる死亡率の違いを示す。

Talcahuano 地区では、震源地が近いため、津波到達時間が 815 秒後と早い。そのため、地震発生から 600 秒を過ぎて避難開始すると、計算条件下では、死亡率が上がるのがわかる。地震発生から 2,100 秒後から 5,400 秒後の間に避難開始すると死亡率の変動が少ないのは、第 1 波と第 2 波の間に避難しているからだと推測される。2010 年の津波は第 1 波より第 2 波のほうが大きかったため、避難開始時間が 5,400 秒後を超えると再び死亡率が上昇している。第 2 波が来る前に避難開始した場合とできなかった場合との死亡率の差は、約 2 倍程度となることがわかる。

Tongoy 地区では、津波到達時間は地震発生から 1,710 秒後と Talcahuano に比べると遅い。したがって、1,500 秒後より以前に避難開始すると死亡率は 0%となった。また、津波の高さもそれほど高くなく、第 2 波目のほうが第 1 波目より低いため、地震発生から 3,000 秒後以降は、避難の開始時刻による、死亡率は変動していない。

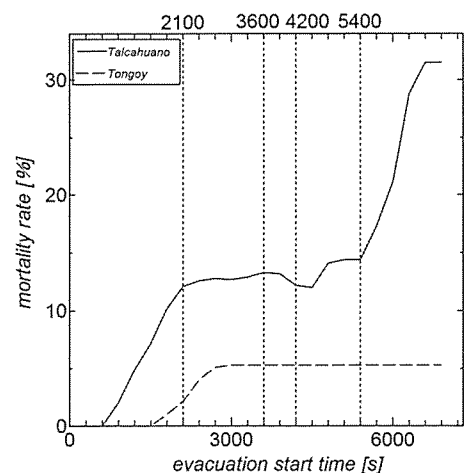


図-16 避難開始時間の違いによる死亡率の変化

3.3.4. 避難開始時間別の死亡率に関する考察

避難開始時間別の死亡率の内訳は多く分けて 2 通りある。避難開始する前に死亡した場合と、避難行動中に、津波に遭遇し、死亡した場合である。

図-17 に Talcahuano の避難開始前の死亡率と避難開始後の死亡率を分けたものを示す。3000 秒程度以上に遅くに避難を開始すると、避難できずに死亡する人が一定になっていることがわかる。これは、1m 以上浸水する場所にいた人数の上限に達しているためである。

また、第 2 波が大きいいため、7000 秒程度のところで、その上限に達していることが推測される。また、3,600 秒後と 4,200

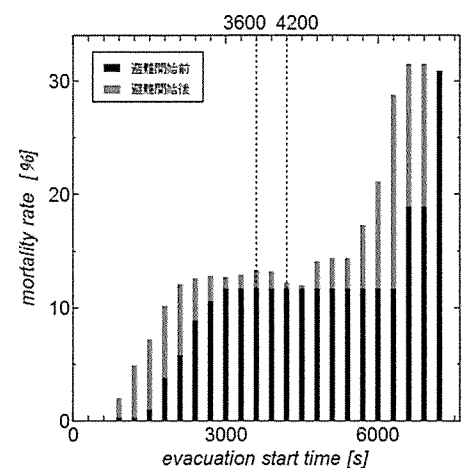


図-17 避難開始前と避難開始後の死亡率の違い(Talcahuano)

秒後の死亡率を比較すると、早く避難開始した 3600 秒後のほうが死亡率は高い。避難開始後の死亡率を比較すると、3,600 秒後のほうが高くなっているためであるが、このひとつの原因は第 1 波後の引き波の影響が考えられる。つまり、引き波により、4,200 秒後に避難開始した人は引き波で避難経路の浸水がなくなったタイミングで避難したことが、死亡率が下がる要因となったと考えられる。

図-18 は、同様の比較を Tongoy 地区で行ったものである。3000 秒のところで、一気に避難開始前の死亡率が上昇していることから、300 秒の間に、1m 以上の浸水範囲が広がっていることがわかる。今回の計算条件下では、1200 秒ほど早く逃げることで、死亡者数がゼロとなっている。避難の開始時間によって、大きく死亡率が変化しており、それは、Talcahuano も Tongoy も同じ傾向を示している。

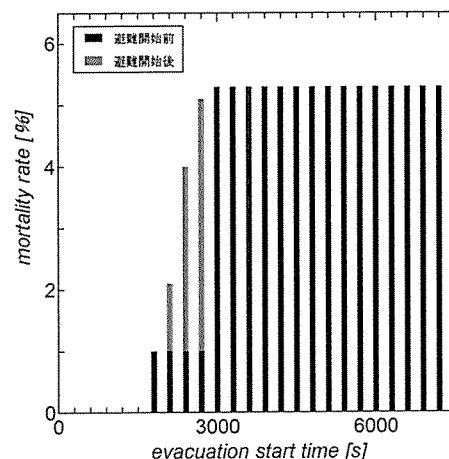


図-18 避難開始前と避難開始後の死亡率の違い(Tongoy)

4. 避難路ならびに避難ビルの影響

4.1. 津波からの避難成功の条件

確実に助かるためには、津波が遡上してくる高さよりも高い場所に、津波が到達するよりも早く逃げることにある。その高い場所は、津波に対して持ちこたえることは必然である。もちろん、船に乗っている場合など、ほかの条件でも助かる可能性は十分にあるが、基本的には、より高い場所に、より早く逃げるのが津波の避難では優先される。

津波の避難に要する時間は、「避難開始時間」と「避難場所まで移動する時間」に、主として分けられる。「避難場所まで移動する時間」をここでは、「避難移動時間」と呼ぶこととする。避難移動時間を短くすることは、より早く逃げられることになる。

4.2. 避難移動時間に及ぼす避難路の影響

熊谷¹⁵⁾や有川・大家¹⁶⁾では、避難シミュレーションを用いて、避難路の影響を調べている。ここでは、有川・大家¹⁶⁾を元に、街路の影響を示す

4.2.1. 対象地域

最短避難距離からのずれを調べるため、東日本大震災時の釜石市の事例ならびに、2014 年のチリ北部沖地震時のイキケ市の事例の避難行動との比較を行う。

4.2.2. 計算条件

釜石市は、東日本大震災当時の避難行動についてのアンケート結果(国土交通省都市局)⁹⁾を基に、各避難者の位置と避難所を決定した。表-3 に検討条件を、図-19(左)各避難者の初期位置と、避難経路及び避難所の位置関係を示す。イキケ市は、2014 年 4 月 1 日にチリ国で発生した地震当時の避難行動についてのアンケート結果(富田ら)⁴⁾を基に、イキケ市の避難行動について検討した。そのなかで GPS データの取得もなされ、実際の初期位置などを決定した。チリでは、30m 以上の高さの場所を避難場所と決めており、標高 30m の位置を避難場所とした。表-3 に検討条件を、図-19(右)に各避難者の初期位置と、避難経路及び避難所の位置関係を示す。

4.2.3. 計算結果

最短経路探索を用いた各避難者から最寄りの避難所までの距離と、実際の避難距離との比較について、釜石市ならびにイキケ市の結果を図-20 に示す。釜石市では、大きく乖離する結果となり、実際の避難距離を最短距離で割った値の平均は 191%，つまり、最短距離の約 2 倍の距離を移動していたことが確認された。他方、イキケ市では、各避難者から最寄りの避難所までの距離と、実際の避難距離はほぼ一致するとともに、実際の避難距離と最短距離の比の平均も 113%と小さかった。

表-3 計算条件(釜石市、イキケ市)

項目	釜石市	イキケ市	備考
計算領域	図-7 参照	図-9 参照	
空間格子間隔	5.0m	10.0m	
格子数	1425×550	435×900	
タイムステップ間隔	0.1s	0.1s	
避難者数	27 人	285 人	アンケートより設定
避難箇所数	21 箇所	22 箇所	釜石市：熊谷ら(2013) ²⁾ より設定
道標数	0 箇所	0 箇所	
避難経路ポテンシャルの重み	1.0	1.0	最短経路で避難する条件を仮定
群衆ポテンシャルの重み	0	0	
進行方向不確かさ	0°	0°	

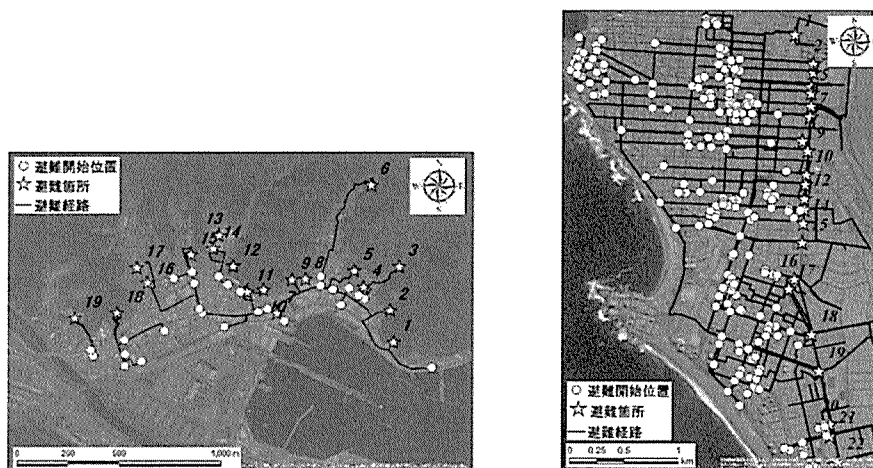


図-19 避難開始位置、避難所ならびに避難路（左：釜石市、右：イキケ市）

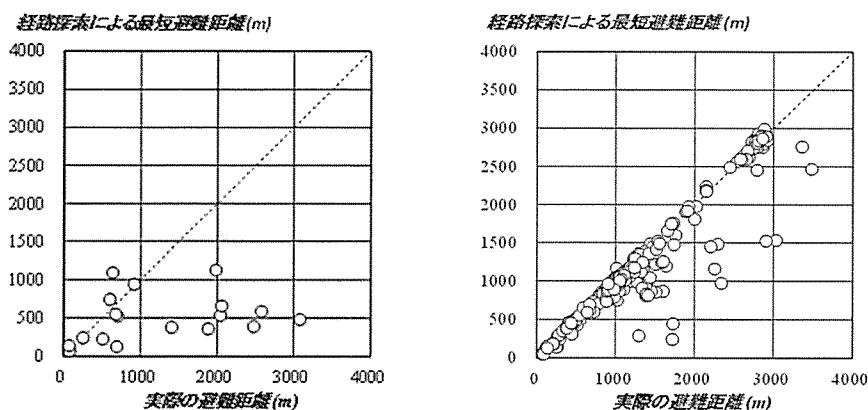


図-20 実際の避難距離と最短経路との比較(左：釜石市、右：イキケ市)

4.2.4. 結果の考察

イキケ市では基盤目上に街路が整備されており、直感的に最短距離で逃げやすいのに対し、釜石市では避難所までの経路が複雑であることにより避難距離が増大したことが一因ではないかと考えられる。また、チリでは30m以上の場所を避難場所としており、イキケ市では、山の麓が30m以上となっており、海側から山側へまっすぐに向かうと避難場所に辿り着くようになっている(図-21)。そのため、山がランドマークとなって、直感的にもわかりやすい避難路となっている。最短距離で避難場所まで向かうことは、避難時間の短縮にもつながることから、街路の整備もしくは標識の活用は、大変重要であることがわかる。

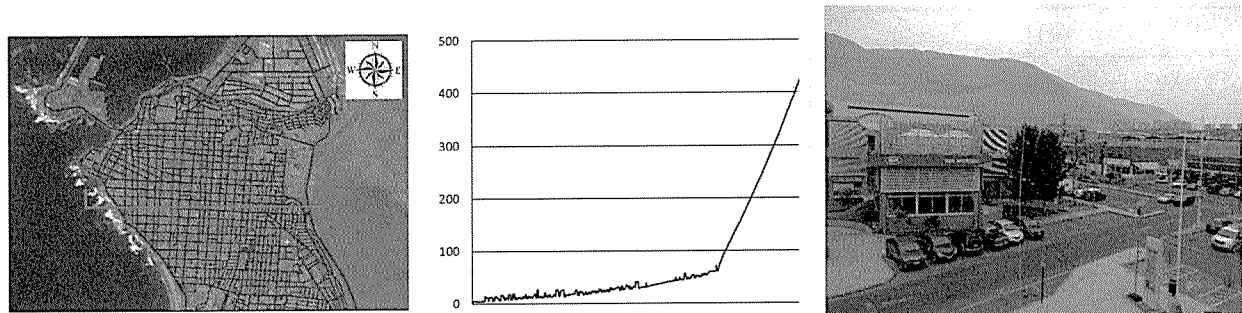


図-21 イキケ市の標高の様子と町並み（地図上で線が入っているところの標高を中央に示す。）

4.3. 避難ビルの影響

避難ビル等の有用性については、伊藤ら¹⁷⁾が、避難可能距離と収容可能距離指標から、予想される津波浸水範囲を重ねることで、どの場所が危険地帯になっているのか検証を行っている。一方で、避難場所、避難開始場所、避難開始時間によって、近くの避難タワーに逃げる場合、海に近づく方向に避難することもある。ここでは、津波避難タワーの有無による被害予測や避難行動への影響を検証する。

4.3.1. 対象地域

対象地域は、高知県のある地域を対象とした。この地域は、主要な産業が観光業と漁業であるため、沿岸に近いエリアに住宅が集中しており、高台にある避難所まで避難するのに時間を要する。また同地域は、幅が狭い道が多く、車での避難は難しいため、避難行動を支える対策として、2014年に1つ目の津波避難タワーを設置し、続けて2015年に2つ目の津波避難タワーを整備した。整備された1つ目の津波避難タワーを写真-1に示す。

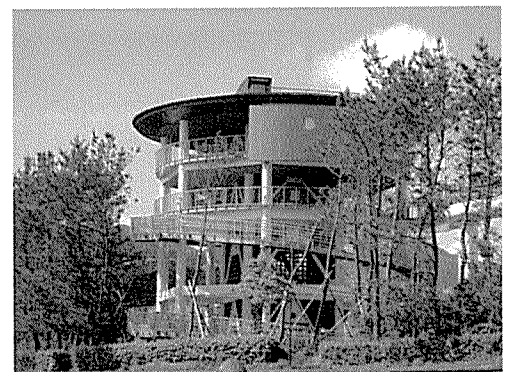


写真-1 対象地区の津波避難タワー

4.3.2. 避難シミュレーションの計算条件

避難シミュレーションは、設定条件として避難者数2700人、初期の歩行速度1.0 m/sとし、避難経路上にランダムに配置した。設定した避難経路及び避難所の図を図-22に示す。津波避難タワー整備後を想定した津波避難タワー2基(図-22の2番、5番)を含む9カ所を避難所に設定したシミュレーションと、整備前を想定した津波避難タワーを含まない避難所7カ所を設定したシミュレーションを行った。このとき、避難者の避難開始時間は、0 s、300 sと、600～1800 sの間の100 s毎で設定を行った。詳細な計算条件を表-1に示す。

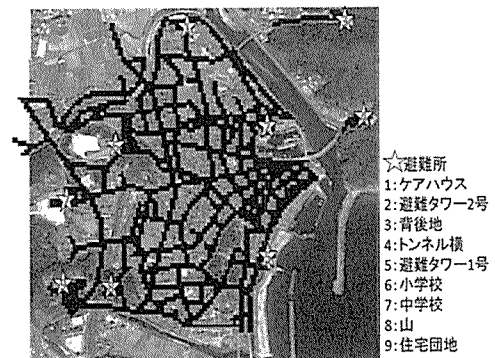


図-22 避難経路と避難所の設定

表-4 計算条件(高知県のある地域)

項目	詳細
避難経路	図-22 参照
避難所	避難タワー無し 7 ヲ所 (図-22 内の 2 番と 5 番を設定しない) 避難タワー有り 9 ヲ所 (図-22 内の 2 番と 5 番も設定する)
格子間隔	10.0m
格子数	x : 162, y : 162, z : 1
タイムステップ間隔	0.1s
計算時間	7200s
避難開始時間	0s, 300s, 600s~1800s 間の 100s 毎
避難速度	全 agent 一律で 1.0m/s, ハイキング関数
避難経路選択	最短経路
agent 数	2700 人
agent 配置場所	経路上にランダム
死亡判定水深	1.0m

4.3.3. 津波避難タワーの効果

津波避難タワーの整備前後の避難を開始する場所から避難所までの最短経路の距離を、図-23 に津波避難タワーがない場合の、図-24 に津波避難タワー有りの場合の図を示す。津波避難タワーの整備によって、特に沿岸部から避難する際の、避難経路距離が大きく改善されていることがわかる。

津波避難シミュレーションの結果から、死亡率と避難開始時間の関係を図-25、避難タワーの有無の差を図-26 に示す。避難開始時間が 0~600 s では、津波避難タワーの整備前後に関わらず死亡率は 0 %であり、早期避難が重要であることを示している。

避難開始時間が 700 s を超えたあたりから、津波避難タワーの有無による差が生じ始め、その差は、1000s あたりでピークとなった。近くに避難場所ができたため、避難時間を短くした効果が表れている。

本検討化では、津波到達が 1400s 程度であるが、1000s を超えたあたりからは、避難場所が近くにあったとしても、避難時間が十分ではなくなり、避難タワーの有無の差が小さくなっていくことがわかる。

ここから、津波避難タワーによって、避難移動時間を短くすることで、避難開始時間を稼ぐ効果があることがわかる。



図-23 避難タワー無しの場合の避難距離



図-24 避難タワー有りの場合の避難距離

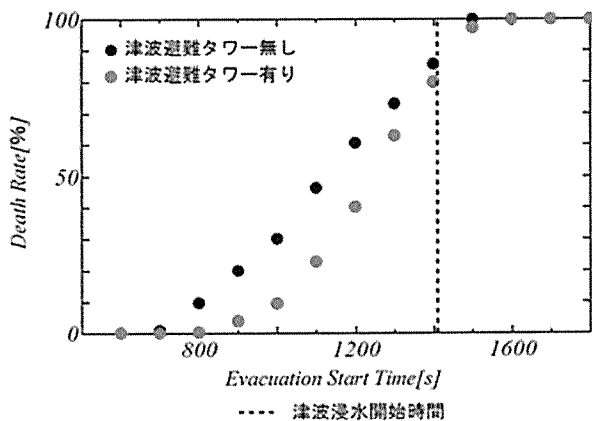


図-25 津波避難タワーの有無による死亡率の違い

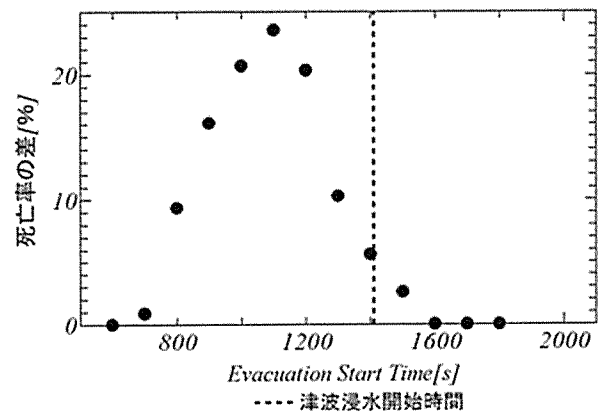


図-26 避難タワーの有無による死亡率の差

4.3.4. 避難距離の変化による死亡者数の違い

津波避難タワーの設置により、避難所までの距離が変化するが、その変化した距離に応じて死亡者数がどのように変わるかを検討した。図-27は、避難タワーを設置したことによる避難距離の変化を示したものである。ここでは、避難開始時間は1200sとした。

変化した距離を100m毎に区切って、死亡者数の違いを整理した結果を図-28に示す。ここで「避難タワー無し」とは、避難タワーを設置した場合に提示されている距離が変化する場所において、かつ、避難タワーが設置されなかった場合の死亡者数を示している。

この結果から、避難距離が300m以上変化した場所では、津波避難タワーによって死亡者数を減少させている一方で、避難距離が0～100mでは、避難タワーがあるほうが増加した。

これは、避難タワーの設置により、ほとんど避難距離が変わらないが、この場合では、避難タワーのある海側のほうに避難することによるものである。そのため、避難している途中で津波に遭遇しやすくなり死亡者数が増大したことがわかった。従って、避難タワーの有効範囲を把握していることが大事ということがわかる。これは、避難開始時間によって変化すると考えられる。

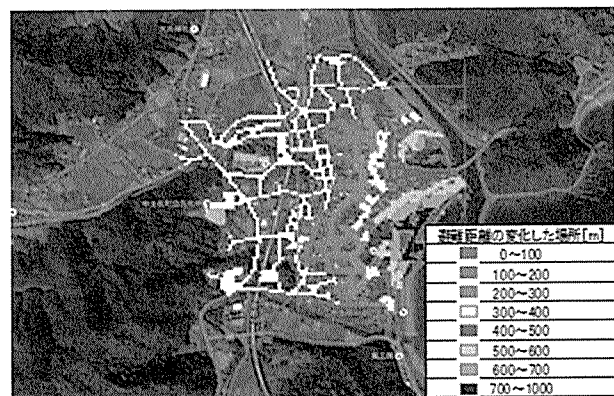


図-27 避難タワー設置による避難距離の変化

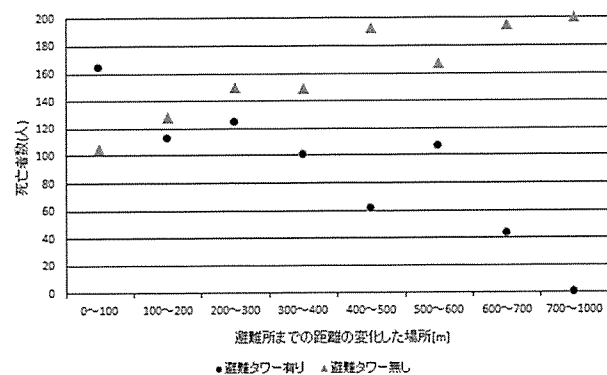


図-28 避難距離の変化による死亡者数の違い。「避難タワー無し」は、避難タワーを設置した場合に変化する距離の位置にいたものの数である。

4.4. 避難路ならびに避難ビルに関するまとめ

避難路ならびに避難ビルは、避難移動時間を短縮するという効果があり、避難シミュレーション等を使用すると、その効果を定量的に示すことができる。これらは、避難する時間と津波の到達時間の関係でわかることであるため、最短経路で調べるなら、コンピュータを使用しなくてもわかるのではないかという意見も

ある。他方、コンピュータで行うメリットは、多くの場所もしくは、人の検証を一度にできるところにあると考えられる。また、人の行動を精緻にモデルかすることは、かえって、避難に関する本質的な問題点を見過ごす可能性もある。今後は、通行が困難な場所や、道が細いため、速度が遅い人が律速になるなどの影響を、地域、地区ごとに考えていくことが重要である。

5. 堤防倒壊の影響

仮に、防護施設が倒壊した場合、津波到達時間や津波の高さが局所的に変わる場合が生じる。その影響は未だ研究途上にあるが、想定外を可能な限りなくすには、必要な情報と考え、以下に検討する。

5.1. 計算条件および防護施設の設定方法

5.1.1. 計算格子・計算領域条件

数値モデルは、STOC-ML¹²⁾を使用し、高知県の浦戸湾を対象とした。本検討で対象とした波源は、内閣府¹⁸⁾による南海トラフ巨大地震のケース4(四国沖に大すべり域+超大すべり域)である。計算時の潮位はT.P.0.0mとした。最小格子サイズ30mとし、対象遡上域を図-29に示す。

5.1.2. 防護施設の設定条件

STOC-MLでは、各計算セルに対して防護施設の天端高を設定することにより、防護施設の影響を計算に組み込んでいる。そこで、以下に示す2種類の防護施設の状況を想定する。

一つは、地震により防護施設の天端高が、一律に低下した状況である。ここでは、天端高減少率0%（防護施設健全）～100%（防護施設なし）までを10%間隔で設定した。

もう一つは、地震により防護施設の一部が倒壊した状況を想定したものである。倒壊した防護施設の計算セルでは防護施設なしとして計算を行った。倒壊する防護施設の位置については、不確実性が伴うものとして取り扱い、防護施設を設定したセルに対して一様乱数を用いて所定の倒壊率になるように倒壊セルを設定するものとした。また、倒壊率は10%～90%の範囲を10%間隔で設定し、各倒壊率において倒壊パターンを変えるため、異なる乱数初期値を用いて各倒壊率で50ケースの計算を実施した。

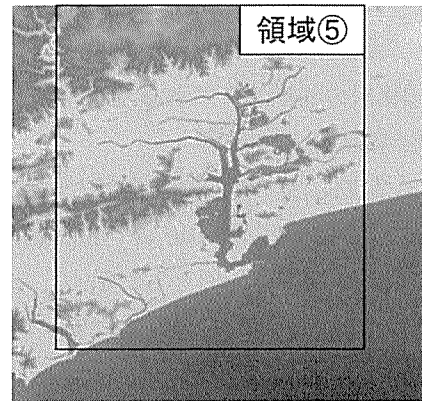


図-29 計算対象の遡上領域

表-5 防護施設の計算条件

減少率	一律低下	ランダム倒壊	越流倒壊
0	1		
10	1	50	
20	1	50	
30	1	50	
40	1	50	
50	1	50	
60	1	50	
70	1	50	
80	1	50	
90	1	50	
100	1		1

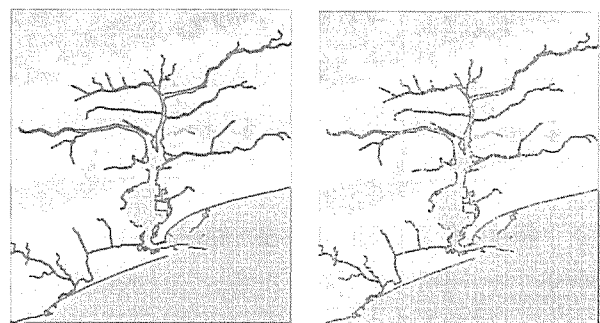


図-30 防波堤・堤防倒壊位置の決定サンプル
(左：完全残存，右図：50%倒壊)

表-5 に計算ケースをまとめて示す。図-30 には、対象とした防護施設の平面分布および倒壊率 50% の場合のサンプルを、図-31 に、その際の構造物の残存比率を示す。

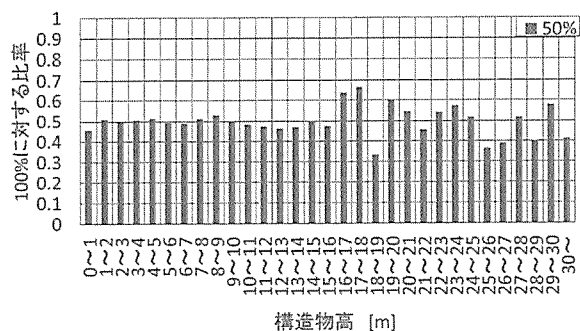


図-31 構造物高さ別の残存比率

5.2. 防護施設の被災度が浸水に及ぼす影響

防護施設の高さの違いによる浸水範囲ならびに浸水開始時間に及ぼす影響について検討する。

5.2.1. 防護施設の初期沈下による浸水深および浸水開始時間に及ぼす影響

図-32 に、初期に堤防高を減少させた場合における浸水深および浸水開始時間の違いを示す。ここでは具体的に初期に全倒壊(減少率 100%, 図中(a)), 完全に残存(減少率 0%, 図中(b)), 初期に一律に高さ方向に半壊(減少率 50%, 図中(c))を例として示す。完全に残存している場合と、倒壊した場合では差が大きいですが、初期に半壊と、初期に全倒壊では大きな差はない。



(a) 浸水図 (左から、減少率 100%、0%、50%)



(b) 浸水開始時間 (左から、減少率 100%、0%、50%)

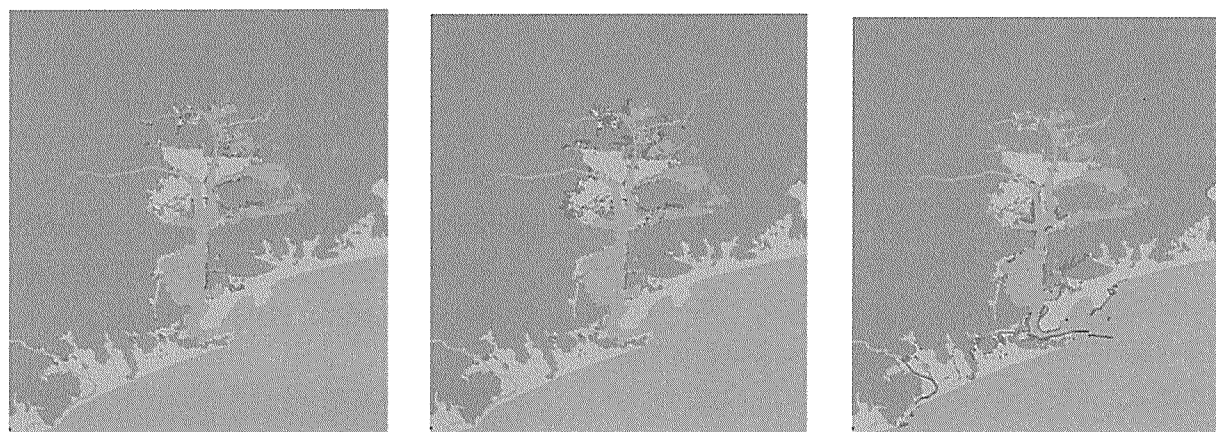
図-32 防護施設の減少率が浸水深(上図)および浸水開始時間(下図)に及ぼす影響

5.2.2. 様々な倒壊状況による浸水範囲の違い

図-33 は、初期に全倒壊した場合の浸水範囲と、防護施設の倒壊条件を変えることによって浸水が発生した地点を、倒壊条件の違いに分けて示したものである。図中の濃い部分は、初期に全倒壊として計算された浸水範囲と異なった場所を示している。

これは、ある部分の堤防高が残ることにより、他の部分に対してどの程度影響するかを示したものとなっ

ている。防護施設の状態により、全倒壊の場合に比べて浸水が発生する地点があるが、その範囲は少なく、本検討条件においては、概ね、初期に全倒壊した浸水範囲で、本検討で想定した防護施設の影響の浸水範囲が示している。



(a) 一律に 10%~90%初期沈下 (b) ランダムに 10%~90%初期沈下 (c) 越流時に 100%倒壊

図-33 各条件による浸水範囲の違い (■：全倒壊での浸水エリア，■：防護施設の状態を変えたことにより増えた浸水エリア)

図-34 に、浸水体積(越流総量)、浸水した範囲における平均浸水深、最大浸水深、浸水範囲(面積)について、初期に全倒壊した結果と、それぞれの堤防高を初期にランダムに変化させたときの平均値を比較したものを示す。

防護施設の倒壊の影響を入れた場合、初期に全倒壊した結果(減少率 100%)よりも、平均浸水深は大きくなっているが、浸水範囲は減少していることがわかる。これは、防護施設で囲まれたエリアなどは排水されず、越流したものが貯留される影響や、ある場所に浸水が集中している影響である。浸水体積は防護施設が存在することにより減少することがわかる。

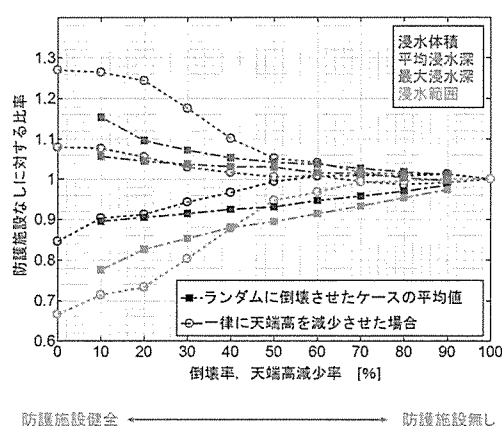


図-34 浸水深および浸水範囲の比較

5.2.3. 浸水開始時間の違い

図-35 に浸水開始時間の違いについて、初期に全倒壊と、初期に一律に半壊(減少率 50%)との比較をしたものを示す。初期に半壊のケースでの到達時間から初期に全倒壊のケースの到達時間を引いたものと定義しており、正の値の場合は全倒壊の方が早く到達していることを示している。また、図-36 に、浸水開始時間の違ったセル数の度数分布ならびに累積比率について、完全に残存した場合および一律に半壊した場合のそれぞれについて示した。

これらをみると、720s 以上と極端に早くなっているところもあるが概ね、1 分から 2 分程度浸水開始時刻が早くなっていることがわかる。極端に早くなっている場所は、沿岸部などであり、揺れたら即座に避難するような場所であ



図-35 初期に全倒壊と半壊の場合の浸水開始時間の違い

る。一方で、湾奥部で1分から2分程度の浸水開始時刻の違いがあり、避難に必要な時間を合わせて検討することにより、防護施設の状態が避難成功率に対する影響について、今後検討する必要があると考えられる。

5.2.4. 浸水確率

図-37 に、全ケースについて、セル毎に浸水するケース数をカウントし、それを全ケース数で割ったものを示す。あらゆるケースを想定できているわけではないが、ここでは、これを浸水確率として定義する。赤い色の部分が100%浸水する場所であり、青い部分では、ほぼ浸水する可能性は無いものの、場合によっては浸水する可能性のあることを示す。本条件のように、津波が大きい場合には、防護施設の影響が相対的に小さくなり、多くの範囲で、浸水確率が100%となった。今後津波の高さの影響について、検討する必要がある。

5.3. 考察

防護施設の影響による浸水範囲や浸水開始時間の変化を具体的に検討した。最大クラスの津波を用いた検討においては、防護施設をはじめから倒壊したものと検討したことと、大きな違いがないことがわかった。

浸水開始時間などは、多くのところで、1～2分程度早くなる可能性があることから、避難開始時間を1～2分短くする必要があると考えられる。

このように、倒壊を加味した検討を行うことで、どの程度の影響があるのかがわかれると考えられる。今後、津波の高さの影響や地域による違いを検討していく必要がある。

6. 安全で安心なまちづくりに向けて

ここでは、避難のしやすさに対する堤防の影響を中心に、まちづくりを考えた。地震津波災害は、大小を問わず、また、時期を問わず、今後も沿岸部を襲うことは間違いないであろう。それに対して、どのように備えるかということに対する共通点は、いかに災害に遭いにくいような仕組みを作り、そこに人々が共感をして備えていくかということだと思われる。

たとえば、避難シミュレーションは、実際の人の行動を模擬していないため、それを精緻に模擬する方向性の研究も行うべきであると思われるが、一方で、どのように人を動かすことができれば、犠牲者がゼロになるかを知ったうえで、そのように人を動かす方策を考えるという方向性もあると考えている。最短経路や標識に従って人が動けば良いのであれば、そのように人が動くような、訓練方法等を考えれば良いのである。そうすると、避難に関しては、物理的なシミュレーションの問題となり、比較的合理的な解を得やすいと考えられる。つまり、文化や文明などに依存しない解が得られる。それは、人々が同じ方向性を向いて議論をするために重要な要素だと思われる。

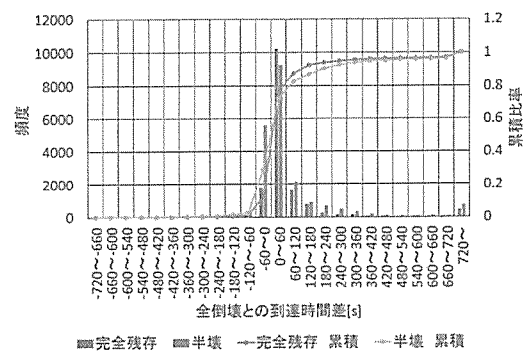


図-36 初期に全倒壊の結果と、完全残存および半壊の場合の浸水開始時間の違いのセル数の度数分布ならびに累積比率

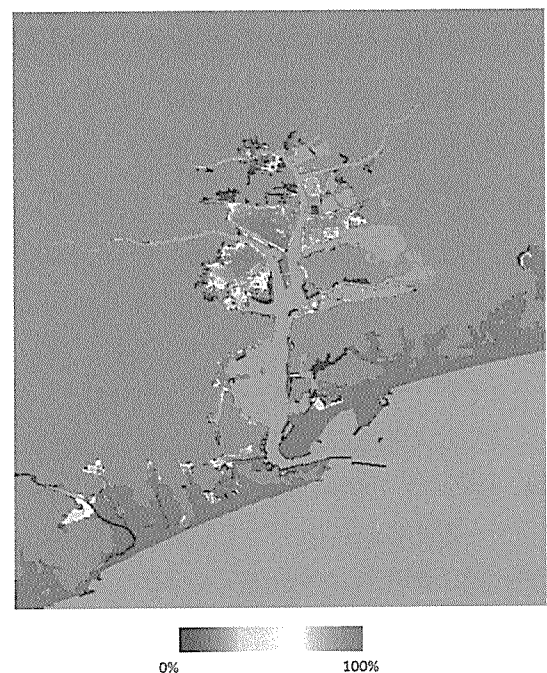


図-37 倒壊状態の違いによる浸水確率

過去の教訓の石碑にも同じ役割が与えられているように思う。重茂の事例¹⁹⁾がわかりやすい。重茂姉吉では、「高き住居は、児孫の和楽、想へ惨禍の大津浪、此处より下に家を建てるな、明治二十九年にも昭和八年にも、津浪は此处まで来て、部落は全滅し、生存者僅かに前に二人、後に四人のみ、幾歳経るとも要心あれ」と石碑が残されている(写真-2)。また、田老地区においては、昭和三陸津波後の復興²⁰⁾において、街路の工夫がなされ、少しでも避難しやすいように考えられている(図-38)。東日本大震災後、岩手県は、沿岸部に対して、表-6の土地のかさ上げを実施した。これも、単に遡上する津波の高さを軽減するだけでなく、避難する時間を稼ぐという効果があるものと考ええる。このように考えると、津波に強いまちづくりには王道はなく、こういった対策の積み重ねが重要なのだらうと思われる。



写真-2 重茂姉吉にある石碑

1章で記したが、中央防災会議における提言、「津波からの避難を容易にするためには、海岸保全施設等の整備に加えて、交通インフラなどを活用した二線堤の整備、土地のかさ上げ、避難場所・津波避難ビル等や避難路・避難階段の整備、浸水リスクを考慮した土地利用・建築規制などを組み合わせ、地域の状況に応じて適切に実施する必要がある。」、を実現したまちづくりをしていくためには、最後の「地域の状況に応じた適切な対応」が必須である。様々な地域、外力条件が考えられるため、その手助けになるシミュレータの構築は急務と考えられる。本報告でまとめたようなシミュレーション手法が、そのような手助けの一助となれば幸いである。

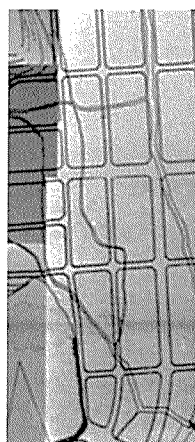
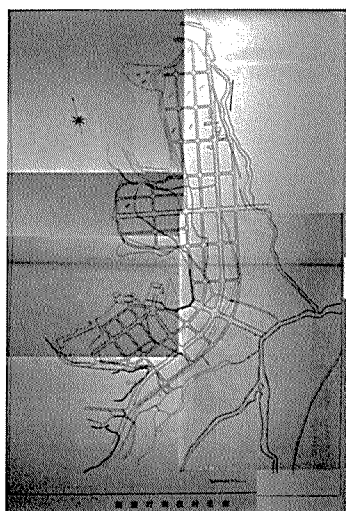


図-38 田老地区の昭和三陸後のまちづくり計画
(右図は拡大図、道路の切り欠きの工夫が見える)

表-6 主な区画整理事業(嵩上げ)箇所(岩手県)

市町村名	地区名	防潮堤整備高	まちづくり平均盛土高
宮古市	田老地区	T.P. 14.7m	約 1.6m
山田町	山田地区	T.P. 9.7m	約 2.0m
大槌町	町方地区	T.P. 14.5 m	約 2.2m
釜石市	鶴住居地区	T.P. 14.5 m	約 1.7m
釜石市	嬉石・松原地区	T.P. 6.1m	約 2.2m
大船渡市	大船渡駅周辺	T.P. 7.5m	約 3.0m
陸前高田市	高田地区	T.P. 12.5m	約 7.4m

参考文献

- 1) 国土交通省河川局監修：海岸—50年のあゆみ—、(社)全国海岸協会、2008
- 2) 津波対策検討委員会：津波対策検討委員会提言、国土交通省、2005
- 3) 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告、中央防災会議、2011
- 4) 内閣府：東日本大震災時の地震・津波避難に関する住民アンケート調査、2012
- 5) 国土交通省：復興支援調査アーカイブの個人向けの避難行動調査、URL: <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>

- 6) 国土交通省：津波避難を想定した避難路、避難施設の配置及び避難誘導について， pp.20， 2013
- 7) 岩手県：岩手県沿岸における海岸堤防高さの設定について， 2011
- 8) 宮城県：宮城県沿岸における海岸堤防高さの設定について， 2011
- 9) 岩手県：岩手県東日本大震災津波の記録， 2011
- 10) 宮城県：東日本大震災における被害等状況， pp.27， 2015
- 11) 総務省統計局 浸水範囲概況にかかる人口・世帯数， 2011
- 12) 富田孝史， 柿沼太郎：水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用， 港湾空港技術研究所報 No.044， pp.83-98， 2005
- 13) 有川太郎， 大家隆行：数値波動水槽と連成した避難シミュレータによる避難行動特性についての検討， 海岸工学論文集， Vol. 71 No. 2， pp.319-324， 2015
- 14) T. Tomita, T. Arikawa, T. Takagawa, K. Honda, Y. Chida, K. Sase, and R. Olivares: Results of Post-Field Survey on the Mw 8.3 Illapel Earthquake Tsunami in 2015, Coastal Engineering Journal, Vol. 58, No. 2, June 2016.
- 15) 熊谷兼太郎：2011年東北地方太平洋沖地震津波の避難行動への津波避難シミュレーションの適用性， 国土技術政策総合研究所資料 No.742， 2013.
- 16) 有川太郎， 大家隆行：数値波動水槽と連成した避難シミュレーションによる避難行動特性についての検討， 土木学会論文集 B2(海岸工学)， Vol.71， No.2， pp. I_319-I_324， 2015.
- 17) 伊藤渚生， 一ノ瀬友博：津波避難場所選定指標を用いた現状の避難ビル適地選定分析-鎌倉市における事例研究-， 都市計画報告書， No.13， pp. 156_159， 2015
- 18) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会， 2012
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/data_teikyou.html， 参照 2015-08-01.
- 19) 山口弥一郎：津浪と村、三弥井書店、2011
- 20) 内務大臣官房都市計画課：三陸津波に因る被害都町村の復興計画報告書、1934、(津波デジタルライブラリーより引用、<http://tsunami-dl.jp/>)

以下の4件については、本報告を記載するにあたり抜粋し、加筆修正をしてものである。

- 21) 有川太郎、野地徹、平野弘晃、遠藤雅人：防護施設の津波避難に及ぼす影響に関する考察、土木学会論文集 B2(海岸工学)， Vol.72， No.2， 2016(掲載予定)
- 22) 平野弘晃：避難シミュレーションによるチリの避難行動特性の検討、卒業論文、中央大学
- 23) 小柳雄揮、有川太郎：津波避難シミュレーションを用いた津波避難タワーの効果の検討、土木学会論文集 B2(海岸工学)， Vol.72， No.2， 2016(掲載予定)
- 24) 関克己、有川太郎、富田孝史、千田優：防護施設の被災度を考慮した津波浸水範囲評価手法の開発、土木学会論文集 B2(海岸工学)， Vol.72， No.2， 2016(掲載予定)

謝辞

岩手県より現行の嵩上げ計画などをいただきました。また、本報告の一部は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）によって実施されました。その際、国土交通省四国地方整備局ならびに高知県には、防護施設のデータ等を提供いただきました。ここに記し深謝の意を表します。