

# 津波避難シミュレーションを用いた地域の安全性向上

武田 篤 史      副 島 紀 代  
萩 原 由 訓

## Tsunami Evacuation Simulation to Improve Social Safety

Atsushi Takeda      Michiyo Soejima  
Yoshinori Hagiwara

### Abstract

Non-structural measures for tsunami disaster prevention, for example the development of hazard maps, have been developed. However, it is difficult for local residents to understand the hazard map and make their own evacuation plans. In addition, it is difficult to determine whether the effects of structural measures such as seawalls are sufficiently understood. Therefore, as a method which local residents without technical knowledge can understand intuitively the effect of structural measures and the importance of tsunami evacuation plan, the technique to link the tsunami simulation and evacuation simulation was developed. By showing the run-up of the tsunami and evacuation of local residents concurrently as an animation, it is possible to directly visualize the relationship between the tsunami run-up and evacuation. As an example, simulations were carried out in this study with the following variables: the presence or absence of a seawall and knowledge of the evacuation routes. The results showed that both the structural and non-structural measures were effective at securing time for refugees, and the developed technique was clearly able to express their effects.

### 概 要

津波防災のためのソフト対策として、ハザードマップの整備などが進められている。しかし、地域住民それぞれがハザードマップを理解し、避難計画を立てることは困難である。また、防潮堤などのハード対策に対する適切な理解も十分進んでいるとは言い難い。そこで、専門的知識のない地域住民が津波避難計画の重要性やハード対策の効果を直感的に理解できる手法として、津波シミュレーションと避難シミュレーションを連動させる手法を考案した。地図上に津波の遡上が表示されるとともに、地域住民が避難している状況がアニメーションとして映し出されれば、津波の遡上と避難の関係を直接的に想像することが可能である。本論文では、例として、防潮堤の有無および避難ルートに関する避難者の知識レベルをパラメータとして、シミュレーションを実施した。その結果、防潮堤の設置や避難ルートに関する知識レベルを上げることで、逃げ遅れる避難者を低減させる効果があることが明らかとなった。また、その効果をわかりやすく表現することができた。

## 1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震津波以降、津波対策技術は注目を集めている。特に、防潮堤や防波堤などのハード対策に関しては、津波被害を直接的に防ぎ、または低減することができるため、技術の進展が著しい。例えば、直立浮上式防波堤は、常時は海底下に収納することで船舶航行を確保しつつ津波・高波来襲時など非常時にのみ浮上して防波機能を発揮するものである<sup>1)</sup>。すでに、和歌山下津港において試験工事が行われた<sup>2)</sup>。防潮堤については、石炭灰を利用した防潮堤が開発されている<sup>3)</sup>。石炭火力発電所で発生する石炭灰を有効利用しようとするとともに、復旧・復興工事で不足する盛土材等の土木資材を補うことが可能である。

一方、中央防災会議などでは、「発生頻度は極めて低いものの、甚大な被害をもたらす最大クラスの津波」に対しては、住民等の生命を守ることを最優先とし、住民

の避難を軸に、とりうる手段を尽くした総合的な津波対策を確立する<sup>4)</sup>という対応、つまりソフト対策の活用を示している。これは、ハード対策だけで津波被害を完全に防ぐことは非常に困難なためである。例えば、内閣府に設置された南海トラフの巨大地震モデル検討会では、最大クラスの地震津波として、最大津波高34.4mの津波が高知県に発生する可能性を示唆している<sup>5)</sup>が、防潮堤をこの津波高さに対応させることは建設費の問題のほか、日照や視界の問題など多くの問題を生じてしまう。

住民の避難を軸としたソフト対策において、最初に必要となるのが津波ハザードマップである。ハザードマップは、内閣府などが作成した津波・高潮ハザードマップマニュアル<sup>6)</sup>に則って作成するもので、想定する最悪の津波が発生した際の浸水高予測を地図上に落とし込んだものである。浸水予測には、一般に非線形長波理論を用いた差分法による津波シミュレーションが用いられるが、このシミュレーション手法は、著者らが行った東北地方

太平洋沖津波の再現解析によって精度を確認している<sup>7)</sup>。2014年5月現在で449の市町村が公開<sup>8)</sup>しており、着実に整備が進んでいると言える。

ソフト対策として次に必要となるのが、地域住民それぞれに対して、ハザードマップを理解した上で避難計画を立てるように促すことである。しかし、津波に関する専門的知識のない地域住民にとっては、ハザードマップを理解するのは困難であるし、津波がどちらの方向からどれくらいの時間で到達するかなどの経時的な様相はハザードマップにおいて表現されていないことが一般的である。

また、防潮堤などのハード対策の整備に対する正しい理解を地域住民に促すことも大切である。防潮堤の効果を地域住民が過信すると避難の遅れにつながり、住民等の生命を守るという目標を達成することができない。一方で、防潮堤の効果を過小評価した場合、ハード対策の整備に対する地域住民の理解を得ることが困難となり、地域安全性の向上に支障をきたすこととなりうる。

以上のような背景から、専門的知識のない地域住民が津波避難計画の重要性やハード対策の効果を直感的に理解できる手法が求められている。直感的に理解する方法の一つとして、津波シミュレーションの結果をアニメーションにより経時的に表現する方法が考えられる。しかし、簡便に見るためには時間軸を短縮せざるを得ず、その経過時間を避難行動と関係づけて直感的に把握することは困難である。そこで、津波シミュレーションと避難シミュレーションを連動させる手法を考案した。地図上に津波の遡上が示されるとともに、地域住民が避難している状況が映し出されれば、時間軸を意識することが容易であるし、どのように避難すればよいかを理解することが可能である。

本論文においては、津波シミュレーションと避難シミュレーションを連動させて行った例を示す。津波シミュレーションは非線形長波理論を用いた差分法によるもので、建築物等も地形としてモデル化した。避難シミュレーションはマルチエージェントシステムを用いて、領域内の避難者が地震発生とともに津波避難ビルを目指して避難するというモデルとした。この解析例を用いて、上記表現方法が保有する可能性を示すことを目的とする。

## 2. 津波シミュレーション

### 2.1 解析対象

津波および避難のシミュレーションは、仮想の地形を対象とした。対象地域の地形図をFig.1に示す。地形図は、メッシュのサイズにより、領域Aから領域Dまでに分けて示している。

対象とする地形は、周囲を山地に囲まれており、3km程度の海岸線に対して、1km程度の奥行きに平野が形成されている。海域は、浅瀬はほとんどなく、沖に向かって急激に深度を増している。

平野部には大小あわせて50棟程度の建築物が存在している。山際は崖となっているため、崖の手前に津波避難

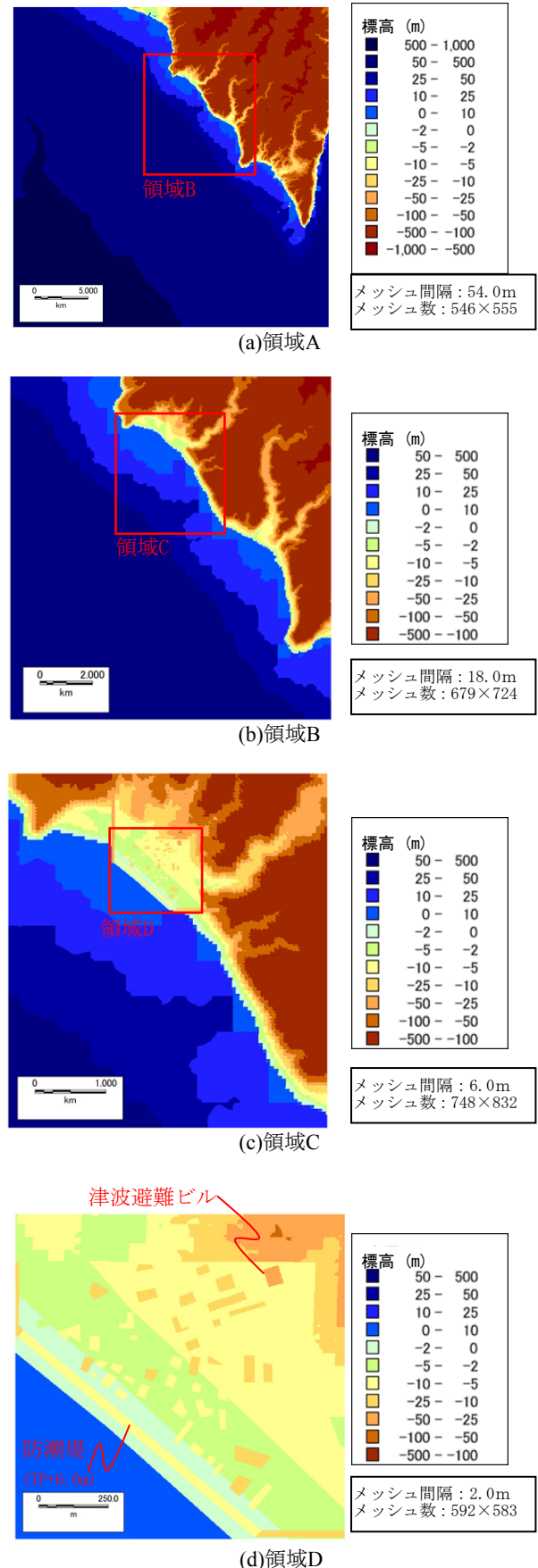


Fig. 1 解析対象地形図 (防潮堤有り)  
Contour Map of Analysis Object

Table 1 解析条件  
Analysis Conditions

領域	A	B	C	D
領域サイズ (km×km)	29.5×30.0	12.2×13.0	4.49×4.99	1.18×1.17
メッシュ間隔 (m)	54.0	18.0	6.0	2.0
メッシュ数	546×555	679×724	748×832	592×583
計算時間間隔 (s)	0.27	0.09	0.03	0.01
陸側境界条件	完全反射	遡上計算		
粗度係数	$n_f=0.025$			

Table 2 避難シミュレーションの解析ケース  
Analysis Case

ケースNo.	防潮堤	避難ルートを知っている人の割合
Case1	なし	50%
Case2	なし	100%
Case3	あり	50%
Case4	あり	100%

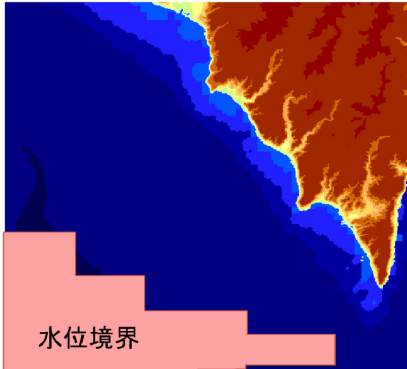


Fig. 2 水位境界設定領域 (領域A)  
Region of Water Level Boundary

ビルがある。図中海岸線に沿って、高さTP+6.0mの防潮堤を示しているが、防潮堤がない場合も解析を実施している。

## 2.2 解析方法

津波シミュレーションの解析は、津波・高潮ハザードマップマニュアル<sup>9)</sup>に示される方法で行った。本手法は、運動方程式および連続の式から導いた非線形長波理論を、差分法により離散化して数値解を得るものである。

解析条件をTable 1に示す。計算時間の短縮のためメッシュ間隔は54.0mから2.0mまでの4段階とし、A～Dの領域に分けて計算した。A領域は津波を安定的に発生させるのに十分大きな領域としている。一方、D領域では建築物を地形として表現するために2.0mのメッシュとしている。各領域間の接続部においても、各計算ステップで連続的に計算している。

計算時間間隔は、領域Dにおいて0.01(s)とし、メッシュ寸法に合わせて大きくした。陸側の境界条件は、B～D領域は陸域への遡上を計算した。A領域は、着目点であるD領域と距離が離れておりD領域への影響が小さいことが想定されるため、計算時間短縮のため完全反射とした。

粗度係数は、底面摩擦や構造物などの抵抗を表現するものであり、一般に土地利用区分によって $n_f=0.020$ から0.080が用いられる<sup>9)</sup>。しかし、本解析では構造物を標高として入力しているため、粗度係数は、底面摩擦の影響のみを表現すればよい。そこで、土地利用区分にかかわらず、空き地、緑地および水域で用いられる値 $n_f=0.025$ を一律に用いた。

津波の発生は、断層モデルを用いずに水位境界として、Fig. 2に示す領域への水位時刻歴を与えた。水位時刻歴は、周期40(min)、振幅5mの正弦波、継続時間20(min)=1/2周期とした。

## 3. 避難シミュレーション

### 3.1 解析方法

マルチエージェントシステム(Multi-Agent System, 以下、MASと示す)を用いた避難シミュレーションについて示す。MASはエージェントと呼ばれる要素を用いて、エージェントの自立的な挙動とそのエージェントが属するシステムの全体的な挙動とを連携させて考察するための手法である<sup>9)</sup>。避難シミュレーションはFig.1の領域Dを対象として実施し、領域内にランダムに配置された避難者(エージェント)が、地震発生とともに避難ビルを目指して避難するというモデルを構築した。そして、避難者全員が避難ビルまでのルートを知っている場合と、ルートを知らない避難者が一定の割合で存在する場合との2通りのシナリオを用意し、それぞれの避難状況に2章で述べた津波シミュレーションの結果(防潮堤がある場合/ない場合)を重ね合わせ、避難者の被災状況を判断するものとした。シミュレーションには「Artisoc 3.0」(構造計画研究所)を解析プラットフォームとして利用した。

### 3.2 解析条件

3.2.1 解析ケース Table 2に避難シミュレーションの解析ケースを示す。防潮堤の有無、および避難ルートを知っている人の割合をパラメータとした計4ケースの解析を実施した。

3.2.2 解析に利用する基本データ 解析は各ケースとも以下の基本データに基づいて実施する。

- a) 標高データ
- b) 流速データ
- c) 浸水深データ
- d) 道路データ

a)～c)のデータはメッシュ単位で設定されており、メッシュの大きさは対象エリア(約1km×1km)を500×500に分割したもの(約2m×2m)である。また、b)とc)は津波シミュレーション解析で得られた結果であり、各メッシュにおいて10秒毎に設定されている。

d)の道路データは座標を持つノード(点)と、各ノードをつなぐリンク(線)とで構成するネットワークデータとし

て設定されており、3.2.4項に示す通り、避難者はこの道路ネットワーク上のみを移動することができる。

**3.2.3 避難者モデルの設定** モデルとする避難者の総数は各ケースとも $n=1500$ (人)とした。避難者モデルの属性は避難ルートの知識の有無のみとし、年齢や性別等による詳細な属性の設定は行っていない。個々の避難者は、解析開始時(避難開始時)に対象とする領域内の道路ネットワーク上にランダムに配置され、その位置から避難を開始する。各避難者の移動速度は、属性によらず $v=1.1\pm 0.3$ (m/s)の範囲で解析開始時にランダムに設定され、個々の避難者は避難完了(または避難困難による停止)までその速度で移動するものとする。

**3.2.4 避難者の行動条件** 各避難者は地震発生時(津波シミュレーションにおける5m正弦波の開始時刻)を $t=0$ (s)として、Fig. 1内の右上に位置する津波避難ビルを目指して避難を開始するものとする。移動経路は道路ネットワーク上とし、分岐点となるノードに到達した際には、それぞれの避難者の属性に応じて設定された行動ルールに従い、いずれかの経路を選択する。ここでは避難ルートの知識の有無により、下記のように異なる行動ルールを設定する。

- 1) 避難ルートの知識がある(知っている)人:避難開始時の位置から津波避難ビルまでの最短経路を解析開始時に計算し、その経路に従って津波避難ビルに移動する。
- 2) 避難ルートの知識がない(知らない)人:避難を開始すると、移動可能な隣接するノードの中からより標高の高いノードを目指して移動する。ただし、隣接するノードに現在の位置より標高の高いものがなくなった場合は、その地点から津波避難ビルまでの最短経路を計算し、以降はその経路に従って津波避難ビルに移動する。

なお、避難者が避難経路の途中で浸水域に遭遇した場合は、水深による水圧と流速による流体力を考慮して提案された避難困難度指標<sup>10)</sup>に基づいて、避難行動継続の可否を判定する。領域内の流速および浸水深は、3.2.2項で述べたように、津波シミュレーションの結果に基づき時間の経過とともに変化していく。津波の遡上が始まり避難者のいる地点のメッシュが浸水した場合は、式(1)に従い $M_0$ を算定し、 $M_0$ が所定の避難困難度指標を超えた場合に避難困難と判断した。

$$u^2h/g+h^2/2 = M_0 \quad (1)$$

$u$  : 流速(m/s)

$h$  : 浸水深(m)

$g$  : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)

$M_0$  : 単位幅比力(m<sup>2</sup>)

今回は参考文献<sup>10)</sup>に基づき、成人男性の安全避難に対する指標である $M_0=0.125$ (m<sup>2</sup>)を一律に用いて判定を実施した。判定の結果、避難困難と判断された場合は、避難者はそれ以上避難行動を継続することができず、その場で停止(被災)する。被災せず無事に津波避難ビルに到達

した避難者は避難完了となる。

## 4. シミュレーション結果

### 4.1 解析結果

[Case1](#)、[Case2](#)、[Case3](#)、[Case4](#)におけるシミュレーションの状況を時刻断面で比較した図をFig. 3～Fig. 5に示す。また、それぞれのケース名をクリックすると、シミュレーション結果の動画を見ることができる。各図における青色の丸印は津波避難ビルまでのルートを知っている避難者を、赤色の丸印はルートを知らない避難者を示している。また、津波の来襲により避難が困難となり被災した避難者は黒色で示している。

**4.1.1 地震発生から10分後** 地震発生から10分後の状況をFig. 3に示す。いずれのケースでも、地震発生から約10分後に津波が海岸線に到達する(Fig. 3)。防潮堤のないケース(Case1およびCase2)では、この時点から陸地への遡上が始まっていく(Fig. 3(a)および(b))。一方で、防潮堤を設置したケース(Case3およびCase4)では、防潮堤により津波の遡上が食い止められている様子がわかる(Fig. 3(c)および(d))。

**4.1.2 地震発生から12分後** 地震発生から12分後の状況をFig. 4に示す。防潮堤を設置したケース(Case3およびCase4)でも、津波が防潮堤を越流し陸地への遡上を始めている(Fig. 4(c)および(d))。また、避難ルートを全員が知っている場合(Case2およびCase4)ではほとんどの避難者が海岸線から離れたところまで移動できているが(Fig. 4(b)および(d))、半数しか知らない場合(Case1およびCase3)では一部の避難ルートを知らない避難者に避難の遅れが生じ(Fig. 4(a)および(c))、津波遡上の早い防潮堤のないケース(Case1)では、比較的海岸線に近い場所に位置する避難者が被災してしまう結果となっている(Fig. 4(a))。

**4.1.3 地震発生から15分後** 地震発生から15分後の状況をFig. 5に示す。約15分後には防潮堤のないケース(Case1およびCase2)で避難ビル地点まで津波が到達してしまう(Fig. 5(a)および(b))。これらのケースでは、避難ルートを知っている避難者でも、津波避難ビルから遠い海岸沿いから避難を開始した避難者は津波から逃げ切れず、途中で被災してしまう結果となっている。一方で、防潮堤を設置したケース(Case3およびCase4)では、最終的に津波は避難ビルに到達しない結果となった(Fig. 5(c)および(d))。これらのケースでは、避難ルートを知っている避難者は全員避難完了できる(Fig. 5(c))が、避難ルートを知らない避難者の一部が途中で被災してしまう結果(Fig. 5(d))となっている。

以上から、防潮堤の有無および避難ルートの知識の有無により、津波の遡上の様子や避難者の被災状況に違いが出るのがシミュレーションによって表現できることが示された。

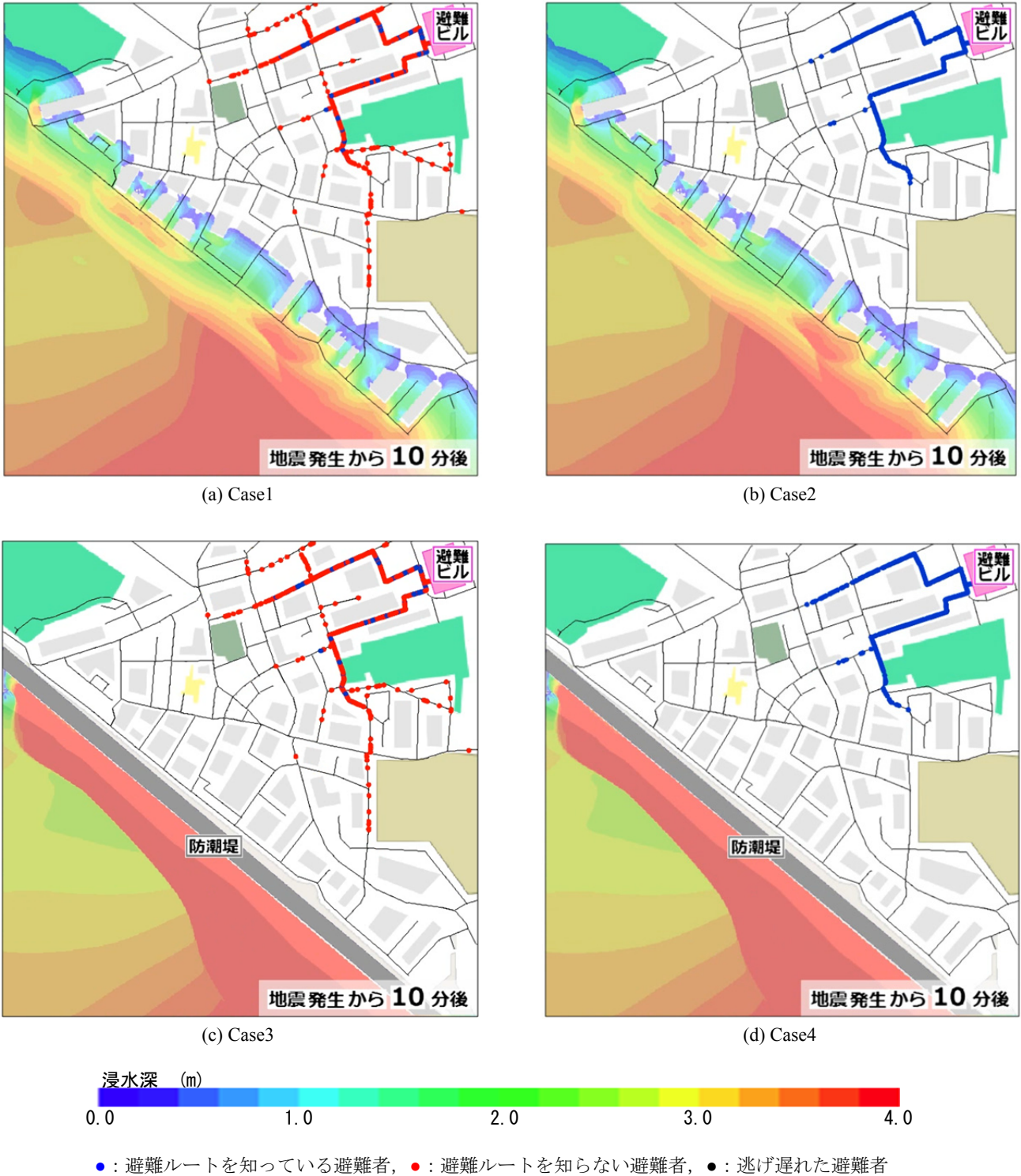


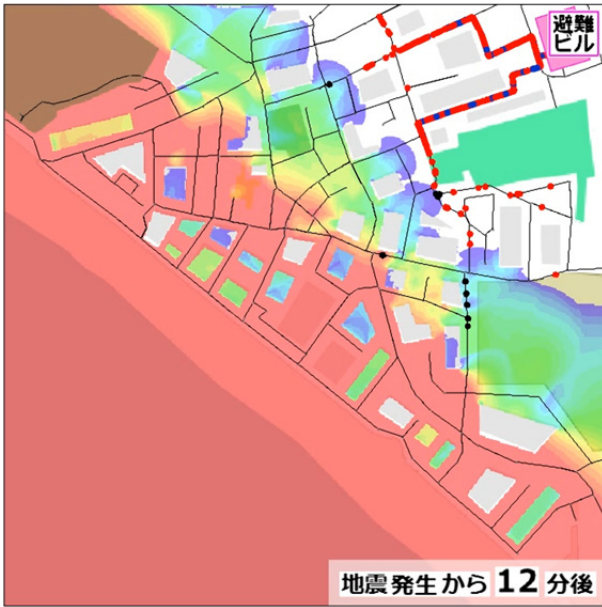
Fig. 3 避難シミュレーション結果 (地震発生から10分後)  
Simulation Result (at 10 minutes after an earthquake)

## 4.2 対策の効果

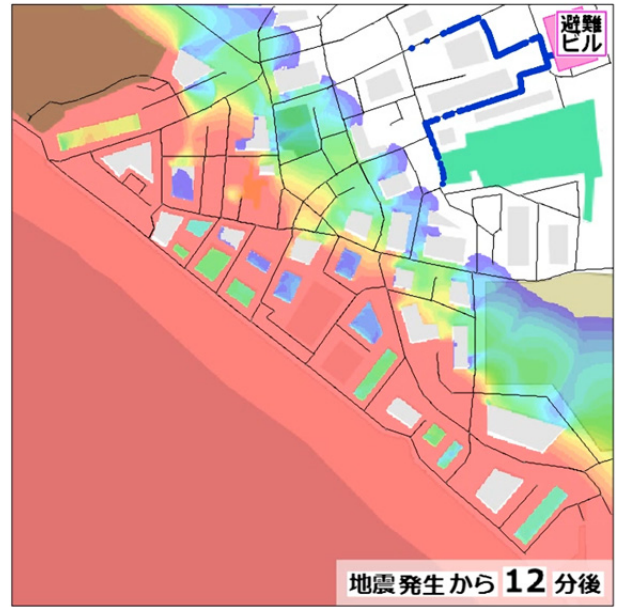
4.2.1 防潮堤の効果 防潮堤の有無で比較すると (Case1とCase3, Case2とCase4), 防潮堤があることで陸地への津波の遡上開始が2分程度遅れることが示された。また防潮堤によって流速が低減されることから、津波の到達する範囲も小さくなることがわかった。以上から、防

潮堤には避難者の避難余裕時間を稼ぐとともに浸水域を縮小する効果があり、逃げ遅れる避難者を少なくできる可能性があると考えられる。

4.2.2 避難ルート周知の効果 避難ルートを全員が知っている場合と半数しか知らない場合で比較すると (Case1とCase2, Case3とCase4), 全員知っているケースで



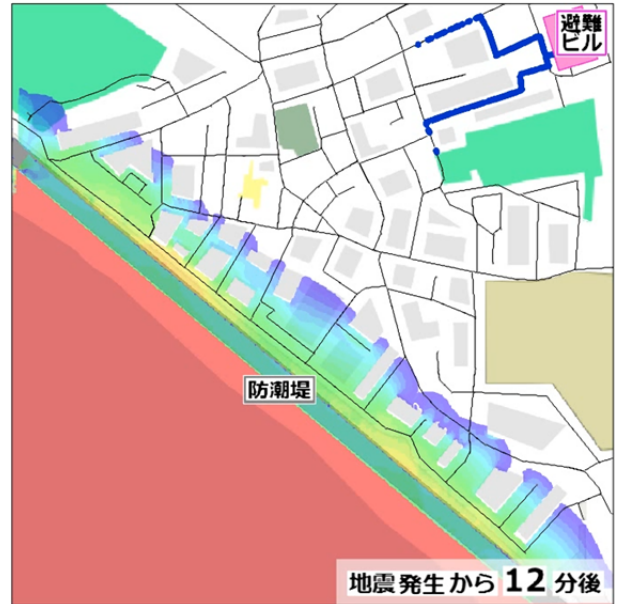
(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3



(d) Case4

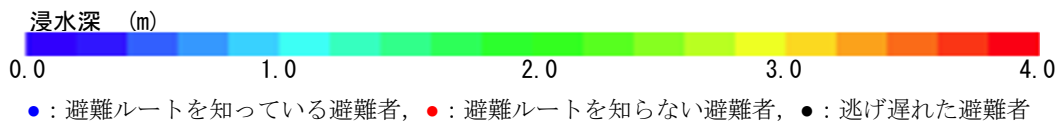


Fig. 4 避難シミュレーション結果 (地震発生から12分後)  
Simulation Result (at 12 minutes after an earthquake)

は地震発生から約17分後に全員の避難が完了するのに対し、半数しか知らないケースでは全体の避難完了が地震発生から約19分後となり、約2分間の遅れを生じることがわかった。遅れを生じた避難者の一部は、遡上してくる津波から逃れることができず被災してしまう。避難ルートを知らない避難者の割合が半数より高くなれば、避難

完了の遅れや被災する避難者数はより大きくなるものと予想される。以上から、避難ルートの周知により避難者全体の避難完了までに要する時間を短縮する効果が期待でき、防潮堤と同様、逃げ遅れる避難者を少なくできる可能性があると考えられる。

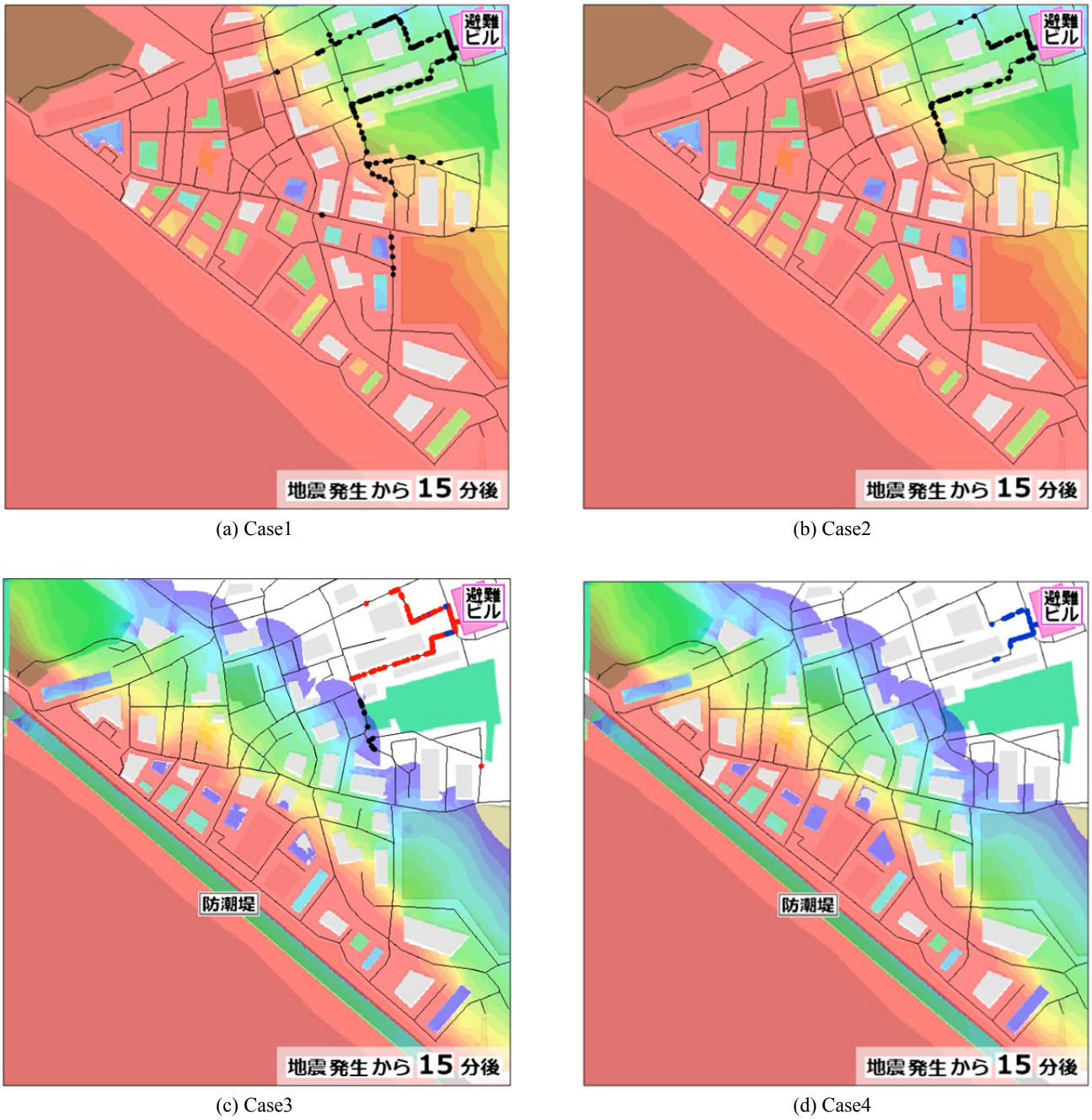


Fig. 5 避難シミュレーション結果 (地震発生から15分後)  
Simulation Result (at 15 minutes after an earthquake)

## 5. まとめ

津波シミュレーションと避難シミュレーションを組み合わせ、津波来襲時の避難安全性に対する防潮堤の有無や避難ルートの周知度合が避難の成否に及ぼす影響・効果を検討した。その結果、いずれも避難余裕時間を確

保する効果があることが示された。また、今回のケースでは、全員が無事に避難できるようにするためには、両方の対策を組み合わせる必要があるという結果となった。

東日本大震災の津波による甚大な被害を受けて、当初は防潮堤をより高くしようという動きが目立ったが、昨今では逆に、防潮堤に頼らず避難路の整備や教育・訓練

で対応すべきという声も多く聞かれる。しかし今回の検討結果は、ハード対策とソフト対策を適切に組み合わせることが重要であることを示唆しており、このようにシミュレーションで可視化することで、いずれの効果も直感的にわかりやすく表現できると考えられる。

今回は避難者のモデルを単純化して解析を行ったが、今後は地域の特性(避難者の年齢特性や地形条件、避難時の移動手段など)を考慮し、より現実的なシミュレーションを行うことも可能である。またその結果を、より効果的な津波避難ビルの配置や避難経路の設定、一般市民や観光客への避難経路の啓蒙などにも活用することができる。今後、さまざまな場面でこのような技術が地域の災害安全性の向上に貢献できることを願っている。

#### 参考文献

- 1) [小林真, 武田篤史: 世界初の直立浮上式防波堤, 大林組技術研究所報, No.76, 2012](#)
- 2) 村井伸康, 由木誠, 平澤充成, 杉田博章, 黒川文宏: 和歌山下津港海岸(海南地区)津波防波堤について, 沿岸技術研究センター論文集, No.10, 2010
- 3) 佐々木 徹, 井出一貴, 熊谷祐一: 石炭灰を活用した復興工事への取組み: 石炭灰を活用した防潮堤盛土実証試験 (特集 防災月間に考える) -- (防災・減災関連技術の動向), 土木施工, 54(9), pp.87-90, 2013
- 4) 中央防災会議・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: 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, 2011
- 5) 中央防災会議・南海トラフの巨大地震モデル検討会: 南海トラフの巨大地震モデル検討会中間とりまとめ, 2012
- 6) 内閣府(防災担当), 農林水産省農村振興局, 水産庁, 国土交通省河川局, 港湾局: 津波・高潮ハザードマップマニュアル, 2004
- 7) [武田篤史, 野村敏雄: 東北地方太平洋沖地震津波の再現解析と防潮堤の効果に関する検討, 大林組技術研究所報, No.76, 2012](#)
- 8) [国土交通省ハザードマップポータルサイト:](http://disapotal.gsi.go.jp/)
- 9) [副島紀代, 萩原由訓, 野畑有秀: マルチエージェントモデルによる災害時の広域参集シミュレーション, 大林組技術研究所報, No.76, 2012.12](#)
- 10) 石垣泰輔, 戸田圭一, 尾崎平, 馬場康之, 井上和美: 内水氾濫時における大規模地下空間浸水と避難, 京都大学防災研究所年報第54号B, pp.471-476, 2011.6