

## 津波避難シミュレーションと避難安全性の評価

熊谷 兼太郎

国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部 主任研究官

### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震の津波による死者・行方不明者は18,564人（警察庁、2013）<sup>1)</sup>、死因の9割が溺死と報告されています（同、2012）<sup>2)</sup>。被害にあわれた方々やご遺族の心情を思うと心苦しいものがありますが、現実を直視しながら、大規模な津波に対する取組みを考える必要があります。

取組みの一つとして、津波避難シミュレーションの活用が挙げられます。具体的には、シミュレーションを用いて、ある地域を対象に現時点の避難安全性を評価したり、対策を講じた場合の将来時点の避難安全性を評価したり、いくつかの対策の中から優先的に講じるべき対策を決定するためにそれぞれの対策の効果の相互比較を行ったりするものです。

本稿では、国土技術政策総合研究所（国総研）が開発している津波避難シミュレーションシステムNILIM-TES2を例に、シミュレーションの仕組みと、避難安全性を評価した事例についてご紹介します。

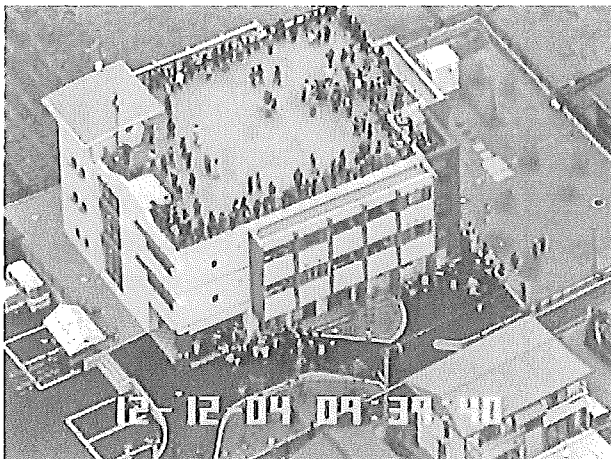


写真1 避難ビルへ避難(訓練の様子、高知市提供)

### 2. 津波避難シミュレーション

#### 2.1 対象範囲と対象者

まず初めは、シミュレーションの対象範囲、対象者などをどのように決めるかという点です。

対象範囲の大きさは、もちろんニーズにあわせて自由に決めればよいのですが、津波が来る前に移動できる距離は限界がありますし、避難場所の最適解を求める際の計算負荷（後述）、結果の活用にあたってシミュレーション結果を一覧で見ようとしたときの限界などにより、自ずとある程度の大きさに限られてきます。「津波避難対策推進マニュアル検討会報告書」（総務省消防庁、2013）によれば、「避難できる限界の距離は最長でも500m程度を目安とする」とあり<sup>3)</sup>、1つの地区を一体で分析することを考えますと、概ね数百m～数km四方を対象範囲の大きさにします。例えば国総研の試算した事例<sup>4)</sup>では、1.5km×2.5kmの市街地を対象範囲としています。

対象者は、例えば国勢調査の結果を使って対象範囲内の総人口を決めますが、昼間人口と夜間人口とは異なりますので注意が必要です。また、人口増加・減少が著しい場合、利用可能なデータと現状の人口のギャップを埋めるため、近年の変動傾向をもとに推定するなどの作業が必要です。

#### 2.2 建物・街路ネットワークデータ

建物と街路をデータ化したネットワークデータを作成します。建物や街路の位置関係は地図などを参考にGISソフトウェアなどを用いて作成するのですが、例えば建物については位置だけでなく、床面積、階数、構造形式などの情報が必要になります。その理由は、一般的に、津波に先立って地震の強い揺れが想定されるため、建物が倒壊することの影響をシミュレーションで考慮する必要があるためです。建物の倒壊確率を構造形式などから求め、倒壊して発生するガレキの量を床面積と階数から求め、ガレキの量、建物前面の街路の幅員などから街路を閉塞判定するというステップで進めます。閉塞した街路はシミュレーション上では通行不能として表現します。こうした情報を得るため、市街地で建物と街路の現地調査をそれぞれ行います（写真2）。



(1) 建物の構造形式、階数などの調査



(2) 街路の幅員、塀倒壊の危険度、階段などの調査

写真2 建物と街路の現地調査

### 2.3 避難者の初期配置

建物や街路上に避難者を初期状態として配置します。図1は、2011年東北地方太平洋沖地震の発生時に自宅にいた人数を岩手県について調べたものですが、この場合は地震発生時に1~2名が在宅していた場合が約7割を占めていて、不在の場合は約1割と少ない結果となっています。

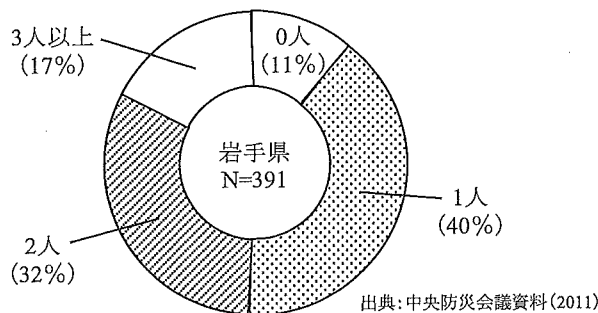


図1 地震発生時に自宅にいた人数<sup>5)</sup>

そこで、例えば昼間の初期配置を考えるには、まず住宅に1名または2名を配置します。対象範囲に配置したい総人口から住宅に配置した人数を差し引き、残りの人数は大規模建物(ホテル、工場、市役所、学校、病院、魚市場など)に等分配置します。

現実には、大規模建物のなかでも所在する人数に偏りがあつたり、街路上に歩行者がいたり、イベントで一時的に多数の人が集中していたりしますので、シミュレーション結果の分析と並行して初期配置のデータを修正し、精度を高める必要があります。

### 2.4 歩行速度

歩行速度は、年齢、単独・グループ歩行の違い、階段の有無などによって変化します。図2は、年齢と歩行速度の関係を示したのですが、一般に年齢とともに歩行速度は低下します<sup>4)</sup>。また、グループ歩行の場合、階段がある場合などの既往の調査結果を整理すると、老人の単独歩行速度は1 m/sをやや下回る値、老人以外の歩行速度では1.2~1.3m/s程度ですが、グループ歩行速度は0.8~1.3m/s程度でばらつきがあるようです<sup>4)</sup>。歩行者の個人属性を考慮する場合、こうした区分に従って避難者の歩行速度をそれぞれ設定します。歩行者の個人属性を考慮しない場合、例えば総務庁消防庁(2013)では歩行速度の目安として1.0m/sを示しています<sup>3)</sup>。

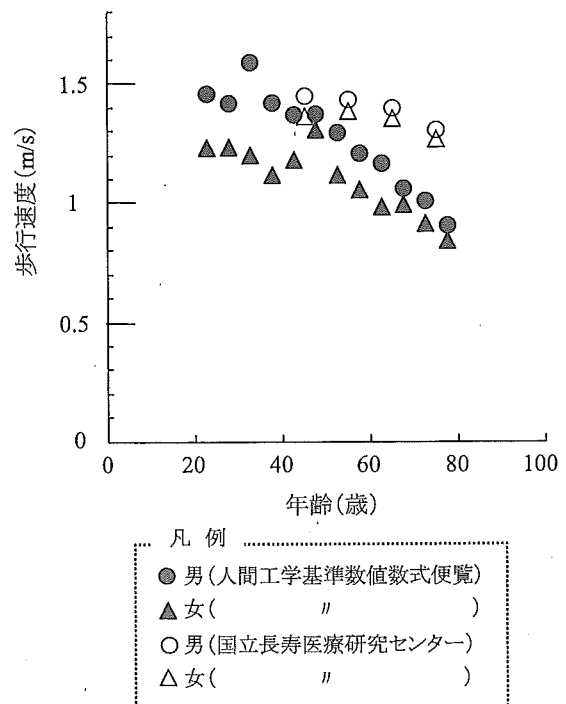


図2 年齢と歩行速度の関係<sup>4)</sup>

なお、国土交通省都市局（2013）によると2011年東北地方太平洋沖地震の際の平均歩行速度は0.62m/sとなっています<sup>6)</sup>。この値は、年齢や単独・グループ歩行の違いという「個人属性の効果」、平野部、リアス海岸沿岸部などの「地形的な効果」、混雑、逃げ惑い、街路閉塞の有無などの「主に市街地構造に起因する効果」などの影響を全て含んで平均した値です。従って、本稿で考えているような地域を特定した避難シミュレーションにおいては、この値を単純に適用するのは適切ではないと考えています。

また、本稿は徒歩の避難行動について考えています。車を利用した避難行動は、移動速度も異なりますし、経路選択にあたって距離よりもアクセスの容易さを優先する場合があるなど、徒歩とは違う点が発生するので、別にモデル上の工夫が必要です。

## 2.5 浸水シミュレーション

「津波浸水想定の設定の手引き」（国土交通省、2012）<sup>7)</sup>などを参考に、津波の浸水シミュレーションを実施します。この結果と、避難シミュレーションより得られる人の動きとの重ねあわせによって、浸水から避難できたことの安否判定を行います。

このように浸水計算と避難行動計算とを別々に行った場合、「津波が浸水してくる様子を目撃し、避難する方向を当初予定から変更した」という行動は再現できないこととなります。ただし、津波の避難は津波の浸水前に避難場所に到着することが原則ですし、津波が陸上に遡上して進行する速度は時速40kmほどの場合もありますので接近してきた津波から走って逃げ切るのは難しく、浸水の計算と避難行動の計算とを別々に行った場合でも安否判定の結果はある程度は妥当なものと考えています。

危険性が高いですが、水深と流速がともに比較的小さい場合は水中でも歩行できるとの仮定を置く場合は、須賀ら（1995）の水深・流速と水中歩行可能性の関係を示す図<sup>8)</sup>などを使用します。ただしこの場合は、水中では歩行速度が低減することについても考慮する必要があります。

## 2.6 避難場所の収容人数

避難場所の収容人数を推定するため、現地調査などを行います。写真3は、自治体が指定する津波避難場所の例で、広場部分は幅約14m、奥行約7mの

大きさです。面積にすると、 $14 \times 7 = 98 \text{ m}^2$ となります。総務省消防庁（2013）によると、避難場所の収容人数は「最低限1人あたり $\text{m}^2$ 以上を確保することが望ましい」とされていますので<sup>3)</sup>、この避難場所については $98 \text{ m}^2 \div 1 \text{ m}^2/\text{人} \div 100 \text{ 人}$ と設定します。

避難シミュレーションで試算すると、収容人数に達した避難場所が発生し、最短距離ではない避難場所が避難者に割り当てられるケースが計算上で発生することがあります。すなわち、シミュレーションで設定した収容人数の値が計算結果に大きな影響を与えます。そこで、避難場所の収容人数の設定値は、避難訓練の際の実績などを参考に慎重に調整し、計算結果の精度を高める必要があります。



写真3 自治体が指定する避難場所の例

## 2.7 シミュレーションモデルと計算負荷

図3は、NILIM-TESS2のプログラムのフローを示したものです。プログラムでは、まずデータ及び条件設定ファイルを読み込みます。次に、避難場所・経路を各避難者に与えるため、線形計画問題ソルバーで最適解（対象者の避難距離平均値が最小となる解）を得ます。こうして得られた避難者ごとの経路情報について、歩行速度、混雑に伴うロスタイムなどを考慮して避難所要時間を算出・出力します。

計算負荷は、処理時間に最も大きく影響する避難場所・経路を避難者ごとに経路の解を得る過程についてみると、例えば約4,700人を約20箇所に振り分ける問題を汎用的なパソコン環境を用いて解くと数分程度の処理時間です。

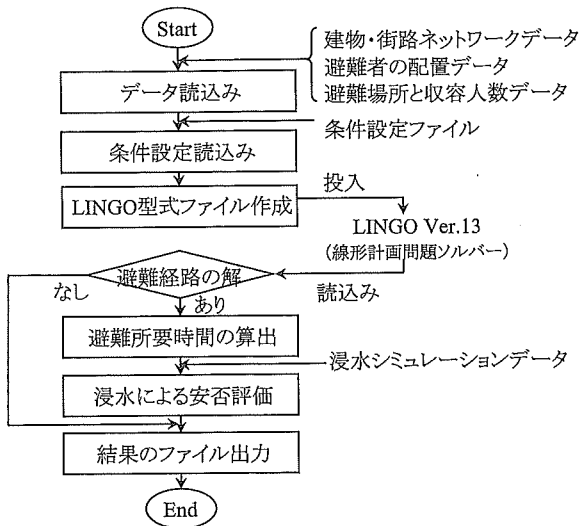


図3 プログラムのフロー

### 3. 避難安全性の評価

#### 3.1 東日本大震災の避難行動の再現

図4は、NILIM-TESS2を用いて2011年東北地方太平洋沖地震の津波の避難行動を再現したものです。図で、横軸は避難を開始してから時間をとっています。縦軸は避難を完了した人が全避難者に占める比率で、0というのはまだ誰も避難を完了していない状態、1というのは全員が避難を完了した状態にあたります。破線と一点鎖線は、対象範囲で行われたいくつかのアンケートのうち代表的な二つの結果であり実際の避難行動を示している、実線はシミュレーション結果を示しています。

これによると、実線は二つのアンケート結果のうち破線のアンケート結果に近い形状を示していることから、ある程度は再現できているようです。

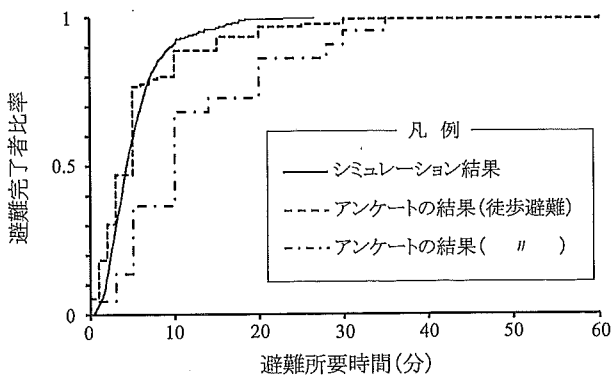


図4 避難所要時間の分布

#### 3.2 避難施設を整備した効果

図5は、3.1節とは別の地区について、避難施設を現状よりも増やした場合の効果を試算したものです。図で、横軸は避難施設の数で、3箇所とは既設の避難施設の数であり現状を示しています。横軸を右に進むにつれて避難施設を1箇所ずつ増やした条件です。縦軸は避難者の避難距離の平均値を示しています。

これによると、基本的には避難施設を整備すると避難距離の平均値が小さくなるように、右肩下がりとなっています。例えば白丸について、現状(横軸で3の位置)の避難距離は約310mですが、新たに5箇所整備した場合(横軸で8の位置)では避難距離は約160mになっています。その差は150mとなり、歩行速度を仮に1m/sとすると<sup>3)</sup>、避難施設の整備に伴って避難所要時間が150秒(2分30秒)短縮されたという見方ができます。

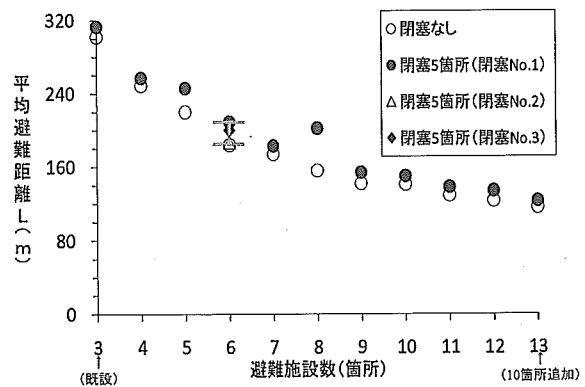


図5 避難施設を整備した効果

#### 3.3 その他の評価事例

前節までに紹介した国総研の試算の他にも、避難シミュレーションを用いた避難安全性の評価の事例として、渡辺ら(2007)による住宅耐震化の効果の検討<sup>9)</sup>、片田ら(2012)による最適な車避難者の比率に関する検討<sup>10)</sup>、仙台市(2013)の避難施設整備の効果の検討<sup>11)</sup>などがありますので、ご興味がありましたら参考文献をご覧ください。

#### 4. おわりに

本稿では、津波避難シミュレーションの仕組みと、避難安全性を評価した事例についてご紹介しました。

ここで挙げた他にも、多様な心理的特性や身体的特性の影響が避難行動に生じると考えられます。心

理的特性としては、本稿では避難者が避難場所をあらかじめ知っているものとしてシミュレーションを行いました。例えば避難場所を明確に意識せずに、避難開始時点ではとりあえず海から遠ざかる方向に避難を始め、あとは周囲の人の動きに追随するような行動がありうるかもしれません。これは、海水浴場をレジャーで訪問し周辺の避難施設の情報に詳しくない人の行動などが該当します。

また、身体的特性としては、本稿では歩行速度について疲労の効果に触れませんでした。例えば高齢者の方は長距離を避難した場合に疲労により歩行速度が低減するかもしれません。

こうした現象を表現するためには、さらにモデルの工夫が必要です。国総研では今後も、一つひとつの現象についてシミュレーションを改良していく取り組みを継続して参ります。

#### 参考文献：

- 1) 警察庁：平成 23 年東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置，2p，2013 年 4 月 10 日。
- 2) 警察庁：東日本大震災と警察，p.14，広報誌焦点，第 281 号，2012。
- 3) 総務省消防庁：津波避難対策推進マニュアル検討会報告書，194p，2013 年 3 月。

- 4) 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.742，22p，2013。
- 5) 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第 7 回会合，参考資料 1，p.131，2011 年 8 月 16 日。
- 6) 国土交通省都市局：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（第 3 版），p.101，2013 年 4 月。
- 7) 国土交通省：津波浸水想定の設定の手引き，Ver.2.00，86p，2012。
- 8) 須賀堯・利根川研究会：利根川の洪水 語り継ぐ流域の歴史，山海堂，p.117，1995。
- 9) 渡辺公次郎ら：防災に関するソフト的施策を評価するための津波避難シミュレーションモデルの開発，都市計画研究講演集，日本都市計画学会，Vol.5，pp.17-20，2007。
- 10) 片田敏孝ら：津波襲来時における自動車避難と人的被害の関係に関する一考察，日本災害情報学会第 14 回研究発表大会予稿集，pp.152-155，2012。
- 11) 仙台市：避難施設配置案等に係る効果検証（避難行動シミュレーション），津波避難施設の整備に関する検討委員会，第 5 回，資料 2，2012 年 11 月 28 日。

#### ◇ 投稿歓迎 ◇

《読者の皆様の投稿を歓迎いたします》

建築防災に関する調査、研究、随想または災害（火災、地震その他）の体験等何でも結構です。ふるってご投稿ください。（投稿された原稿は原則として返却いたしません。）

掲載については、本誌に御一任下さい。

送り先：一般財団法人 日本建築防災協会建築防災編集係宛

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-3-20 虎ノ門 YHK ビル 3F TEL 03 (5512) 6453