

津波避難リスクに基づく避難安全性 評価手法に関する基礎的検討

岩見 達也¹・竹谷 修一²・木内 望³

¹非会員 国土交通省国土技術政策総合研究所総合技術政策研究センター（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

E-mail: iwami-t92jx@nilim.go.jp

²正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所総合技術政策研究センター（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

E-mail: takeya-s92jf@nilim.go.jp

³非会員 国土交通省国土技術政策総合研究所都市研究部（〒305-0802 茨城県つくば市立原1）

E-mail: kiuchi-n92ta@nilim.go.jp

津波による人的被害軽減として、短期的には避難誘導等が求められる一方で、中長期的には避難場所の指定、津波避難ビルや避難路・避難階段の整備、土地利用・建築制限といった市街地整備が求められる。

そこで本研究では、市街地の構造としてどの程度の安全性を確保できるかという点に主眼を置いた津波避難安全性評価手法の基礎的知見を得るための検討を行った。

検討に際し避難行動モデルについて、避難者が認知する津波リスクと避難者自身の許容リスクに基づいて避難行動を行うものと仮定した。その上で、避難開始・避難終了の意志決定、避難目的地・目的地への移動経路の選択に関するモデルの検討を行うとともに、津波避難行動シミュレータへの実装を行った。試算の結果、様々な津波リスクに基づく様々な避難行動を表現可能であることを確認した。

Key Words : *Tsunami Evacuation, Multi-agent Simulation, Evacuation Timing, Route Selection, Estimation of Evacuation safety*

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災（東北地方太平洋沖地震、及びその後発生した複数の地震）によって、死者15,883名、行方不明者2,681名、負傷者6,143名という甚大な人的被害が発生した¹⁾。また、この地震による岩手県・宮城県・福島県における死因としては、溺死が92.4%²⁾であったことから、津波対策の重要性が指摘されることとなった。

津波対策のうち人的被害軽減としては、短期的には迅速かつ的確な避難誘導等が求められる。一方、中央防災会議の防災対策推進検討会議³⁾では、海岸保全施設等の整備に加え、土地のかさ上げ、避難場所の指定、津波避難ビルや避難路・避難階段の整備、土地利用・建築制限など、ハード・ソフトを組み合わせた地域づくりを推進すべきとしており、いわば中長期的な対策の必要性について言及している。

避難場所・津波避難ビル・避難経路の整備や、土地利用制限といった市街地整備による津波対策については、整備に時間を要すること、膨大な費用が必要となること

から、効果的・効率的な整備を進めていくことが必要となる。そのためには、市街地における津波リスクを踏まえ、津波避難安全性評価に基づきながら整備される必要がある。しかしながら、市街地整備という視点に立脚した津波避難安全性評価手法は必ずしも十分に検討されているとは言えない。

そこで本研究では、津波避難リスク軽減のために必要となる効果的・効率的な市街地整備手法に必要な、津波避難安全性評価手法の基礎的知見を得ることため、津波リスクに基づく避難行動を表現可能な避難行動モデルを作成し、その有効性を確認することを目的とする。

なお、本研究では、避難行動の正確な記述そのものよりは、むしろ、避難行動を単純化、理想化し、ある程度、合理的・理想的な行動を前提として、その中で、市街地の構造としてどの程度の安全性を確保できるかを評価できるモデルを作成することに主眼を置いている。

2. 避難行動における津波リスクの概念

避難者が津波避難を行う際に、津波リスクに基づいて

行動を決定すると見なし、避難者が認知する津波リスク（認知津波リスク）と避難者自身の許容リスクに基づいて、式1に示す避難行動モデルを仮定した。

$$\begin{aligned} P < R_{allow} \text{の時, 待機（避難行動を取らない）} & \quad \text{式1} \\ P \geq R_{allow} \text{の時, } P \text{が最小となる行動を選択} \\ P: \text{認知津波リスク} \\ R_{allow}: \text{許容リスク} \end{aligned}$$

ここで、許容リスクは、避難者が許容するリスクの上限値であり、本来的には個人ごとに異なることも想定されるが、許容リスクの大小は、認知避難リスクの大小とモデル上は同義であることから、単純化のため一定値を外部パラメータとして設定する。

$$R_{allow} = C(\text{const}) \quad \text{式2}$$

認知津波リスクは、避難者の現在地から避難目的地までの移動経路上及び目的地到着後において津波に巻き込まれる津波被災リスクについての避難者が認知するリスクである。

避難者にとっての津波被災リスクは、

- i) 現在地に津波が到達しないか、
 - ii) 避難場所に津波が到達しないか、
 - iii) 避難場所までの移動中に津波に巻き込まれないか、
- という3つの観点で評価を行う。

(1) 現在地の津波到達リスク

ある地点に津波が到達するリスクは、式3で表すことができる。

$$\begin{aligned} R_{hi} = \text{Prob.}(H_{wi} \geq H_i) & \quad \text{式3} \\ R_{hi}: \text{地点 } i \text{ における津波到達リスク} \\ H_{wi}: \text{地点 } i \text{ における津波最大標高} \\ H_i: \text{地点 } i \text{ における標高} \\ \text{Prob. (式)}: \text{式を満たす確率} \end{aligned}$$

ただし、避難者が行動を決定する際には、津波高さは確定的な値ではなく、代表値に対する一定の幅をもって予想されるものと考えられる。そこで、当該地点標高と予想津波高さ代表値（避難者による津波が到達する標高の予想値の代表値）の差に応じて認知リスクが変化するモデルとして式4を仮定する。（例えば、避難者が、「この辺りには高さ6 m 程度の津波が到達する」という予想を立てたとすると、当該地点の標高が6 m の場合には1となり、高いほど認知リスクが0に漸近し、6 m 以下では1以上に認知リスクが増大する）

$$\begin{aligned} P_{hi} &= \exp(-k_1 \times (H_i - H_{wej})) & \text{式4} \\ P_{hi}: \text{地点 } i \text{ における認知津波到達リスク} \\ H_{wej}: \text{地点 } i \text{ における予想津波最大標高の代表値} \end{aligned}$$

予想津波最大標高は、周囲からの情報（例えば、防災無線や近隣住民による津波に関する情報、直接目視による津波の確認等）により、時々刻々修正しながらリスクの評価を行う。

(2) 避難場所の津波到達リスク

避難場所の津波到達リスクの評価式は式3及び式4における「当該地点」及び「地点 i」を「避難場所」に置き換えることにより得られる。

(3) 避難場所までの移動リスク

移動経路上のある地点において津波に巻き込まれて当該地点を通過できなくなるリスクは、式5で表すことができる。

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \text{Prob.}(T_{wi} \leq T_i) & \text{式5} \\ R_{ij}: \text{津波閉塞リスク} \\ T_{wi}: \text{当該地点津波到達時刻} \\ T_i: \text{当該地点通過時刻} \end{aligned}$$

ただし、避難者が行動を決定する際には、当該地点における津波到達時刻は確定的な値ではなく、代表値に対する一定の幅をもって予想されるものと考えられる。そこで、当該地点通過時刻と予想津波到達時刻代表値（避難者による津波が到達する時刻の予想値の代表値）の差に応じて認知リスクが変化するモデルとして式6を仮定する。（例えば、避難者が、「あの辺りにはあと3分程度で津波が到達する」という予想を立てたとすると、避難者自身の歩行速度と現在地から評価地点までの距離から求められる評価地点までの所要時間を比較し、津波と同時に評価地点に到着する場合には1となり、避難者の到着が早いほど認知リスクが0に漸近し、避難者の到着が津波の到達より遅ければ1以上に認知リスクが増大する）

$$\begin{aligned} P_{ij} &= \exp(-k_2 \times (T_{ai} - T_i)) & \text{式6} \\ P_{ij}: \text{認知津波閉塞リスク} \\ T_{ai}: \text{当該地点予想津波到達時刻} \\ T_i: \text{当該地点通過時刻} \end{aligned}$$

2地点間を結ぶ特定の移動経路に関する移動リスクは、移動経路上の全ての地点xにおける津波閉塞リスクの最大値であり、式7により求められる。

$$P_{mq} = \text{MAX}(P_{tx}) \quad \text{式7}$$

P_{mq} : 地点*i*から地点*j*まで、移動経路*q*を通して移動する際の認知移動リスク

x : 移動経路*q*上の任意の地点を表すサフィックス

3. 避難行動のモデル化

本稿で扱う避難行動モデルは、

i)避難開始及び避難終了（中断）の意志決定

ii)避難目的地及び目的地への移動経路の選択に関するモデルとする。

以下では、前章に示す津波リスク認知モデルに基づいて具体的な避難行動に当てはめた場合の適用を示す。

(1) 避難開始及び避難終了（中断）の意志決定モデル

避難開始の意志決定過程においては、現在地における認知津波到達リスクが許容リスクを超えた場合、すなわち式8となった時点で避難を開始する意志決定を行う。

$$P_{hj} > R_{allow} \quad \text{式8}$$

ただし、時間的な切迫性を認識していない場合には、すぐには避難を開始せず、他の行動（例えば家族の安否確認等）を採り、(2)に示す、現在地から周囲の避難場所までの総合避難リスク最小値が許容リスクを超えた時点、すなわち式9となった時点で実際の避難行動を開始する。

$$\text{MIN}(P_{sij}) > R_{allow} \quad \text{式9}$$

また、避難場所等に到着した場合、当該地点において式8が成立しない限りは、当該地点に止まり続け、津波に関する情報の更新によって認知到達リスクが増加し、式8が成立すると再度避難を開始する。

(2) 避難目的地及び目的地への移動経路の選択モデル

避難者は、周囲に複数の避難場所を認知している場合、その中から特定の1つの避難場所を選択し、当該避難場所までの移動経路を選択する。

これらの選択は、現在地から避難場所までの移動経路上で津波に巻き込まれるリスク及び避難場所が津波に巻き込まれるリスクを総合した総合避難リスクが最小となる選択を行う。

現在地から特定の避難場所へ避難する場合の総合避難リスクは、式10により表すことができる。

$$P_{sij} = \text{MAX}(P_{hj}, P_{mij}) \quad \text{式10}$$

P_{mij} : 地点*i*から地点*j*までの認知移動リスク

ここで、 P_{mij} は、次式により得られる。

$$P_{mij} = \text{MIN}(P_{mq}) \quad \text{式11}$$

q : 地点*i*から地点*j*までの全ての移動経路のひとつを表すサフィックス

なお、避難場所を1つも認知していない場合には、目的地を失い、周囲の避難者の行動に追従して移動を行うものとする。

4. 津波避難行動シミュレーションの実装

以上の避難行動モデルに基づいてパーソナルコンピュータ上で避難計算を行う津波避難シミュレータを作成した。津波避難シミュレータの概要を以下に示す。

(1) 市街地の構成

道路網は、ノード及びリンクによるネットワーク構造として表現する。ノードは、一般交差点や避難場所等のノード種別を設定し、リンクは、道路幅及びスロープや階段等のリンク種別を設定する。

また、市街地内の建物からその周囲のノード又はリンクへ最短距離で結ぶ経路を内部的に生成し、建物内からの避難経路も道路ネットワークに組み込む。

(2) 地震による建物倒壊及び津波遡上

市街地内の建物は、外的に与えるPGVや建物構造及び建築年に応じて倒壊率を計算し、乱数生成により各建物に倒壊状況を割り当て、さらに、倒壊状況に応じて道路への瓦礫流出幅を求め、道路ネットワークの健全性（リンクの通行可否及び通行可能幅）を求める。

津波遡上に関しては、別途行う津波遡上計算プログラム等によるグリッドデータとして出力された結果を読み込み、グリッドごとの津波到達時刻及び時刻歴の津波到達高さを取得する。

(3) 避難者の行動

避難者行動の計算は、個々の避難者が前章までに示した避難行動モデルに基づいて、自立的に行動を決定し行動するマルチエージェント手法を用いて行う。避難者エージェントは、初期地点において、待機状態から計算を開始し、前章までに示した避難行動モデルに基づいて意志決定、行動選択を行う。移動する場合には、歩行速度に応じて、時間経過とともに位置の変更を行う。

歩行速度は、既往研究⁴⁾を参考に、避難者密度に応じて歩行可能速度が変化する式12に示す関係を設定した。

$$v = (1.0 - 0.25 \rho) \times v_{std} \quad \text{式12}$$

ただし、 $v < 0.05$ の時は $v = 0.05$ とする。

v : 実歩行速度

ρ : 避難者密度

v_{sd} : 標準歩行速度

避難者密度は、避難者の現在地から避難者の移動方向前方3 mまでの範囲における道路面積を同範囲内の避難者数で除して求める。

式11を満たす移動経路を求める際には、ダイクストラ法を用いて、最小リスクとなる経路を求める。

予想津波高さ及び予想津波到達時刻は、津波状況を直接目視した場合と、その他の場合で異なるものとした。

直接目視した場合には、実際の到達時刻及び到達高さがある程度の精度で予測できるものとした。直接目視できない場合には、同報無線や近隣住民の避難の呼びかけ等による知識に基づくこととし、外部パラメータとして一律に与えるものとした。

(4) 結果出力

計算結果の出力として、下記の情報を出力する機能を実装した。

- i)最終的な目的地
- ii)避難に失敗した場合の失敗場所
- iii)避難に失敗する避難者の初期地点

5. パラメータ設定と避難行動の表現

作成した避難行動シミュレータが、計算パラメータの違いにより、実際にどのような計算特性を示すか、どのような避難行動を表現できるかを確認するため、パラメータを様々に変化させて計算を行った。計算条件及び計算結果を以下に示す。

(1) 計算条件

以下の計算条件に基づいて津波避難計算を実施した。

a) 市街地の構成

- ・1 km×1 kmの市街地を想定
- ・50棟×50棟の建物をグリッド状に配置
- ・5棟×5棟ごとに1街区を形成し、街区間に幅員4 mの道路を配置
- ・避難場所は、高台と避難ビルを想定し、それぞれ1つずつ設定

高台は標高30 mとし、南北に走る中央の道路の北端から北へ100mの地点に設定した。

避難ビルは、グリッド中心のノードから北へ15 mの地点に設定し、床高さは標高15 mとし、収容可能人数は、無制限又は1000人の2種類の計算を実施した。

高台及び避難ビルへのアプローチは、各避難場所から

最も近いノードからとし、アプローチの幅員は、2.0 m又は0.5 mの2種類の計算を実施した。

b) 地震による建物倒壊及び津波遡上

地震による建物倒壊は、本ケースでは発生しないものとした。

津波遡上に関しては、海岸線をグリッド南端位置に東西方向に無限に伸びる海岸線を想定し、海岸線に計算開始から20分経過後に津波が到達し、5 m/sの速度で真北方向に、グリッド市街地全体が浸水するまで（海岸線から1000mまで）一様に遡上する条件とした。

c) 避難者の配置

避難者は、各建物に1人ずつ計2500人の避難者を配置した。標準歩行速度は避難者ごとに1.2～1.5 m/secの間で一様乱数を用いてランダムに設定した。

d) 計算パラメータ

避難行動のパラメータ k_1 、 k_2 、及び、避難場所のパラメータ（避難ビルの収容可能人数及びアプローチ幅）は、表-1のパラメータ列に示す組み合わせで計算を行った。その他、 $R_{allow} = 10^6$ 、 $H_{wej} = 3.0$ は一定値、 T_{aj} は実際の津波到達時刻と同一とした。

パラメータ k_1 、 k_2 と認知リスクの関係を図-2に示す。 k が大きくなると、横軸が0近傍で急激に立ち上がっていることから、予想値との標高差あるいは時間差について、少ない余裕で安心（リスクを小さく）する傾向となり、 k が小さくなると、大きな余裕を見込む傾向となる。

表-1 パラメータ k_1 及び k_2 の設定と計算結果

CASE	パラメータ			避難者人数(人)		
	k_1	k_2	避難ビル収容可能人数(人)	アプローチ幅(m)	高台	避難ビル
#1	0.2	0.2	*	2.0	2,500	0
#2			*	0.5	1,530	0
#3	0.2	0.5	*	2.0	2,500	0
#4			*	0.5	1,470	0
#5	0.2	1.0	*	2.0	2,500	0
#6			*	0.5	1,525	0
#7	0.5	0.2	無制限	2.0	926	1,574
#8				0.5	926	1,372
#9			1,000	2.0	1,500	1,000
#10				0.5	1,094	1,000
#11	0.5	0.5	*	2.0	2,375	125
#12			*	0.5	1,528	125
#13	0.5	1.0	*	2.0	2,500	0
#14			*	0.5	1,465	23
#15	1.0	0.2	無制限	2.0	919	1,581
#16				0.5	919	1,378
#17			1,000	2.0	1,500	1,000
#18				0.5	1,102	1,001
#19	1.0	0.5	無制限	2.0	919	1,581
#20				0.5	919	1,378
#21			1,000	2.0	1,500	1,000
#22				0.5	1,090	1,000
#23	1.0	1.0	*	2.0	2,286	214
#24			*	0.5	1,141	220

※避難収容可能人数欄の「*」は、避難ビルへ向かう避難者数が1000人に満たないため、設定内容が「無制限」の場合と「1,000」の場合で計算結果が同一であることを表す。

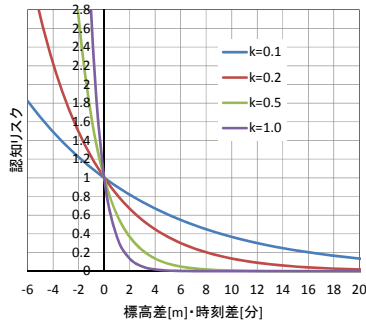


図-1 パラメータ k_1 及び k_2 と認知リスクの関係

(2) 計算結果

計算対象領域の全体図を図-2に示す。図-2上端及び中央の黄色に着色した位置に避難場所を配置した。図-3は計算途中を図化した一例である。

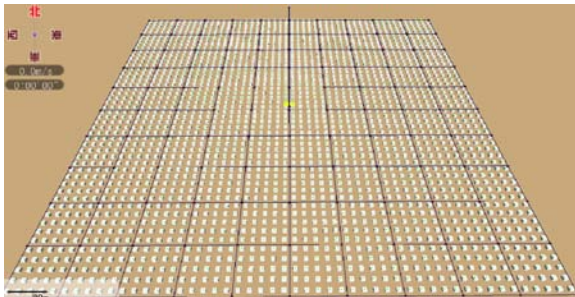


図-2 計算対象領域全体図

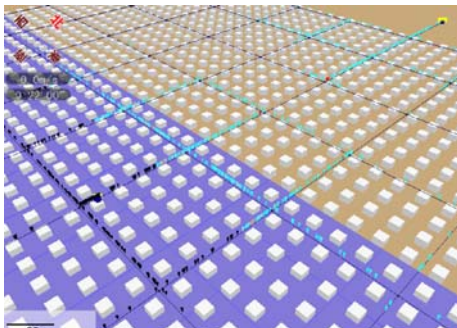


図-3 津波避難計算状況

表-1の避難者数列は、避難計算による、高台への避難者数、避難ビルへの避難者数及び避難失敗者数の結果を計算ケースごとに示している。また、図-4に、避難者の出発地点ごとの避難先を計算ケースごとに示す。以下では、計算で見られた避難行動及び避難失敗状況について考察する。

a) 避難開始の意志決定

#23, #24 を除くすべてのケースでは、時刻 0 の時点で避難行動を開始している。選択した避難場所まで安全に避難するためには、すぐに避難を開始する必要があると判断したことによる。

一方、#23, #24 では、ある程度津波が近づいてから、

高台までの距離が遠い避難者から順に避難を開始している。 $k_1 = k_2 = 1.0$ のケースであり、あまり余裕を持たずに、言い換えれば、少しの余裕で安心して（リスクを感じず）避難行動をとるケースである。その影響もあり、#24では、最も避難失敗者が多い結果となった。

b) 避難場所の選択行動

避難場所の選択行動に関しては、パラメータ k の違いにより大きく2つのグループ（図-4の上側3段の12ケース（以下、「上段ケース」という。）と下側3段の12ケース（以下、「下段ケース」という。））に分けられる。上段ケースは、ほとんどの避難者が高台を避難先として選択するケースであり、下段ケースは、高台と避難ビルで選択が分かれるケースである。

前者は、避難場所そのもののリスクを重視し、避難ビルよりも標高の高い高台が選択されている。ただし、#11, #12, #23, #24については、高台から最も遠い地域の避難者は、高台までの移動過程でのリスクが高いことから、相対的に避難ビルで被災するリスクが低くなり、避難ビルを選択する避難者が一部存在する。

後者は、避難場所そのもののリスクより、移動過程でのリスクを重視するケースであり、 k_1 が k_2 よりも大きい値を設定したケースが該当する。この場合、避難ビルの収容可能人数に限りがある場合、避難ビルから遠い避難者は、避難ビルに到着した時点で収容可能人数を超えているため、高台への避難先の変更を強いられている。この過程では、一度避難ビルに向かった避難者が、避難ビルが容量を超えていることを確認し、避難ビルアプローチを引き返して高台を目指すことになるため、対向流が発生することにより、避難ビルアプローチ周辺の混雑が激しくなっている。

c) 避難失敗の発生状況

避難失敗は、アプローチ幅 0.5 m の全てのケース（偶数番号のケース）で発生している。

上段ケースでは、高台のアプローチ部及びアプローチ入口で混雑が発生し、津波に巻き込まれて避難失敗となっている。

下段ケースでは、#8, #16, #20 では、避難ビルアプローチ部及びアプローチ入口で同様に混雑が発生し、津波に巻き込まれて避難失敗となっている。#10, #18, #22 では、避難ビルアプローチ周辺から離脱する際に時間を要するため、高台へ向かう途中で津波に巻き込まれて避難失敗となっている。

6. まとめ

津波避難上のリスク概念を定義し、リスクを算定する計算モデル及びリスクに基づいて避難行動を計算する避難行動モデルを提案した。

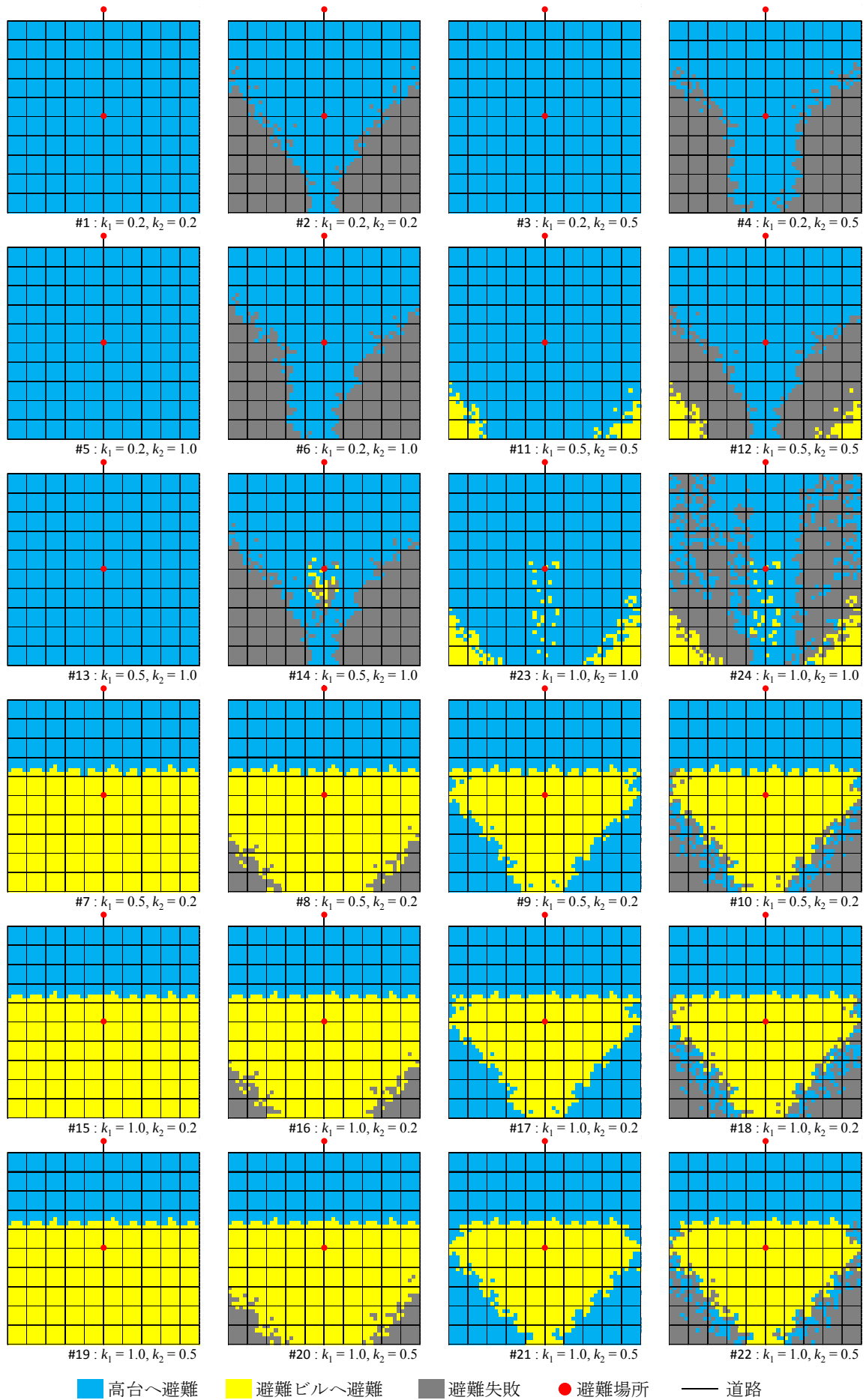


図-4 避難者出発地点ごとの避難先の分布^{注1), 注2)}

これらのモデルを用いてパーソナルコンピュータ上で計算可能な津波避難行動シミュレータを作成し、様々なパラメータを変化させて避難行動モデルの試計算を行った。これにより、

- i) 周囲の避難場所や避難場所までの移動安全性を踏まえた避難開始の意志決定行動
 - ii) 距離や標高など、安全性の異なる複数の避難場所がある場合の目的地選択行動
 - iii) 避難場所のアプローチ幅や容量といった市街地構造の影響を踏まえた避難行動
- 等の様々な避難行動を表現できることを確認した。

また、避難失敗ケースの考察から、避難開始のタイミングの重要性及び避難場所アプローチの混雑への対応（アプローチ幅だけでなく、避難場所の数や配置の問題を含む）の重要性について示唆が得られた。

今後、過去の災害時の避難実態に近いパラメータや、最も合理的な避難行動を示すパラメータ等を確認し、計算目的に応じて計算ができるよう改良を行うことを予定している。

注1) 図4での避難場所の位置は、表記の都合上実際の位置から少し南側へずらして標記している。

注2) 図4の並びは、ケース番号順とは一部異なっている。

参考文献

- 1) 警察庁緊急災害警備本部：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の被害状況と警察措置，p.1，<http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>，2013/4/10.
- 2) 内閣府：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 1 回）資料 3-2 今回の津波被害の概要，p.22，2011.
- 3) 中央防災会議防災対策推進検討会議：防災対策推進検討会議最終報告書～ゆるぎない日本の再構築を目指して～，p.34，2011.
- 4) 建設省：都市防火対策手法の開発報告書，p.156，1982.

(2013.?.? 受付)

FUNDAMENTAL STUDY OF EVACUATION SAFETY ASSESSMENT METHOD IN ACCORDANCE WITH THE TSUNAMI EVACUATION RISK

Tatsuya IWAMI, Shuichi TAKEYA and Nozomu KIUCHI

Mitigation of human damages caused by the tsunami is very important. As tsunami countermeasures, evacuation, etc. are required in the short term, and also the city designated the tsunami shelter, improvement of evacuation routes and evacuation stairs, tsunami evacuation building, and land use and building restrictions is required in the medium to long term maintenance. In this study, the authors examined the evaluation methods of tsunami evacuation safety that depended upon city structure to obtain the basic knowledge

In the study, it is assumed that those carrying out the evacuation based on the acceptable risk of evacuees own risk and tsunami evacuation user-perceived. Therefore, the authors examined that decision model of evacuation start and evacuation end, and selection model of evacuation site and evacuation route. And also, these models were implemented to a tsunami evacuation simulator.