

津波避難シミュレーションシステムの開発と 地区の避難安全性評価への適用

源 貴志¹・成行 義文²・藤原 康寛³・三神 厚⁴

¹徳島大学大学院先端技術科学教育部（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2丁目1番地）

E-mail: minamoto@ce-tokushima-u.ac.jp

²徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2丁目1番地）

E-mail: nariyuki@ce.tokushima-u.ac.jp

³兵庫県 県土整備部

⁴徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部准教授（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2丁目1番地）

今回の南海地震が今後30年以内に50～60%の確率で発生すると予測されている。また、南海地震は歴史的に地震動による被害とともに四国・近畿地方の太平洋沿岸部に津波被害をもたらしている。津波による人的被害を防ぐためには、全住民参加の避難訓練を定期的に行い、避難時における問題点の事前抽出を行うとともに、各住民の避難意識向上を図るべきである。しかし、全住民参加の避難訓練の実施は容易ではない。このことから、著者らはペトリネットを用いた精度の高い津波避難シミュレーション手法を開発し、それを用いて対象地区の問題点を抽出するとともに、対策効果の検討を行うため、シミュレーションより得られる避難完了率曲線に基づいた地区の津波避難安全性指標を考案し、その有用性を検討した。

Key Words : Nankai earthquake, Tsunami evacuation simulation system, Area refuge safety index

1. はじめに

日本は地震大国であり、繰り返し大規模な地震に見舞われている。巨大海洋型地震である南海地震は、今後30年以内に50～60%、50年以内に80～90%の確率で発生すると予測されている¹⁾。巨大海洋型地震では、その地震動による構造物の損壊、山・がけ崩れなどの被害のほか、沿岸地域では津波による被害を受けることが多い。例えば、著者らが住んでいる徳島県では、津波による県内の死者は、避難意識が低い場合約1400～1700人と予測されている²⁾。

津波による被害を軽減するために沿岸構造物や避難場所の整備などの対策が行われているが、人的被害をゼロにすることは不可能である。したがって、津波による死傷者を出さないためには、地震発生後速やかに安全な場所に住民全員が避難することが最重要である。そのためには、全住民参加による避難訓練を実施し、問題点を抽出するとともに避難意識向上を図るべきである。しかし、全住民参加の避難訓練を行うことは非常に困難である。そこで、代替手段として住民個々の挙動を反映し得る避難シミュレーションを行うことが有用であり、その結果を地区の避難安全性評価や津波対策に活用することが望ましい。

避難シミュレーションに関する研究は、近年盛んに行われている。片田ら³⁾は平常時の都市活動、災害時の情報伝達、災害現象および避難行動を考慮した災害総合シナリオ・シミュレータを開発し、想定シナリオに応じた被災状況がアニメーション、避難完了時間および犠牲者数の推計などから把握可能となっている。また、二神ら⁴⁾は中山間地域を対象としてPetri Net（ペトリネット）を用いた避難シミュレーションを提案し、シナリオの拡大化、精緻化が担保された空間変容対応型のシステムであることを示すとともに、このシナリオペトリネットおよびプローブ情報の利用技術の確立について検討している。ペトリネットは避難シミュレーションの他に、木俣ら⁵⁾の交通流のモデル化、辻原ら⁶⁾の火災延焼シミュレーションなどにも用いられており、様々なシステムに適用できるものであるといえる。

著者らは過去に津波避難シミュレーションシステム⁷⁾を開発したが、「迂回時の経路選択」、「避難者間の情報伝達」等が考慮されていなかった。そこで本研究では、より現実的な挙動を考慮するために、これらの項目についてシステムの改良を行った。そして、改良したシステムを用いて津波避難シミュレーションを行い、その結果を用いて地区の避難安全性について検討を行った。

2. 津波避難シミュレーションシステム

(1) システムの概要

本研究で用いる津波避難シミュレーションシステムの概要について示す。図-1に示すような流れで避難シミュレーションを行う。まずシステム適用地区を選定し（図-1①）、システム適用地区の全住民に対して住民属性および家屋属性についてのアンケート調査を行う（図-1②）。次にアンケート調査結果から住民属性データを作成する（図-1③）。また、GISを用いてシステム適用地区の道路ネットワークの構築とリンク属性データを作成する（図-1④）。そして、建物倒壊による道路閉塞を考慮する場合は、道路閉塞予測⁹⁾を行う（図-1⑤）。さらに、構築した道路ネットワークをペトリネットモデル化し（図-1⑥）、最短経路探索を行い（図-1⑦）最短経路探索の結果および作成した属性データを基にペトリネットを用いて津波避難シミュレーションを行う（図-1⑧）。最後にこの結果を出力および表示する（図-1⑨）。

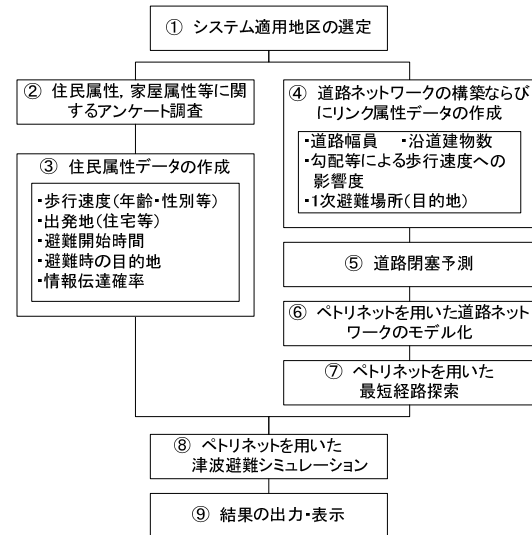


図-1 シミュレーションの流れ

(2) ペトリネット

本研究では、離散事象システムに対するモデル化の一手法であるペトリネットを用いて避難シミュレーションを行っている。ペトリネットは、図-2に示すようにプレース、アーク、トランジション、トークンから構成されており、これを用いて道路ネットワークを図-3に示すように、ノード（家屋、交差点、避難場所等）はプレース、リンク（道路）はトランジションとアーク、住民はトークンとしてモデル化を行った。また、ペトリネットでは、トランジションに様々な条件が設定できる。シミュレーション中にその条件を満たすと、トークンが他のプレースに順次移動し、目的地（一次避難場所）のプレースへ到達する。

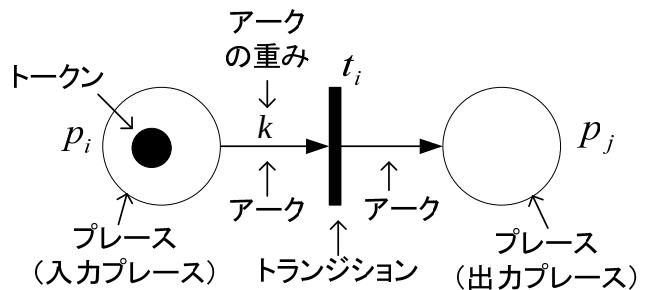


図-2 ペトリネットの構成要素

(3) システムの改良点

本システムは、既往の手法⁷⁾における経路選択方法および住民間の情報伝達について主に改良を行った。以下にその改良点について示す。

既往の手法⁷⁾では、各プレースには道路閉塞を考慮しない最短経路探索結果のみを用いて、「各一次避難場所まで最短経路を辿るためには、現在のプレースから次にどのトランジションを介して移動すべきか」の情報が付与されていた。そのため、道路閉塞を考慮する場合には、目的地から離れていくなどの不自然な挙動をするトークンが発生していた。そこで、各プレースに道路閉塞を考慮した最短経路探索結果の情報も追加した。また、道路閉塞を考慮した最短経路探索は、道路閉塞箇所の組み合わせ数だけ行われる。

対向するトークン間で、閉塞箇所および一次避難場所の定員超過についての情報伝達を行えるように

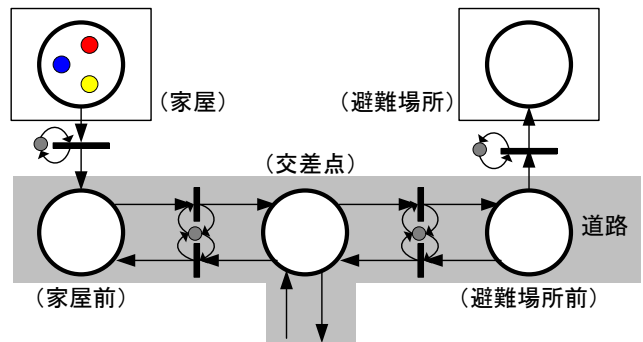


図-3 ペトリネットによる道路ネットワークのモデル化

した。これにより、新たな閉塞箇所や一次避難場所の定員超過の情報を取得し、その時点から他の経路または一次避難場所を選択するようになる。また、情報の発信率・受信率を0～100%の間で変更できるため、各住民の個性も反映可能である。

(4) 考慮可能なシナリオおよび条件設定

以下に本システムで考慮可能な避難シナリオおよび条件設定を列挙する。

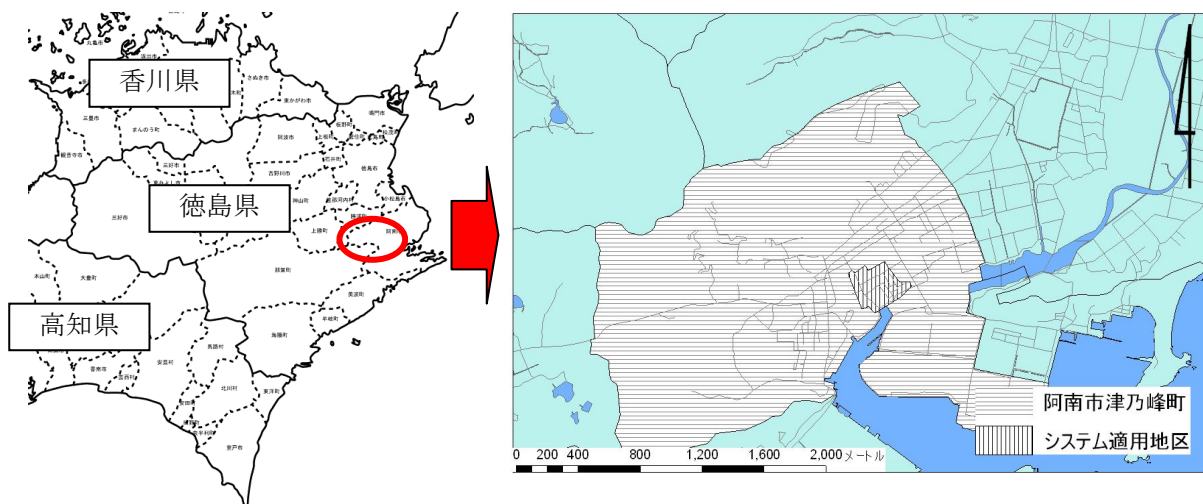


図-4 システム適用地区（右図中の縦線部）

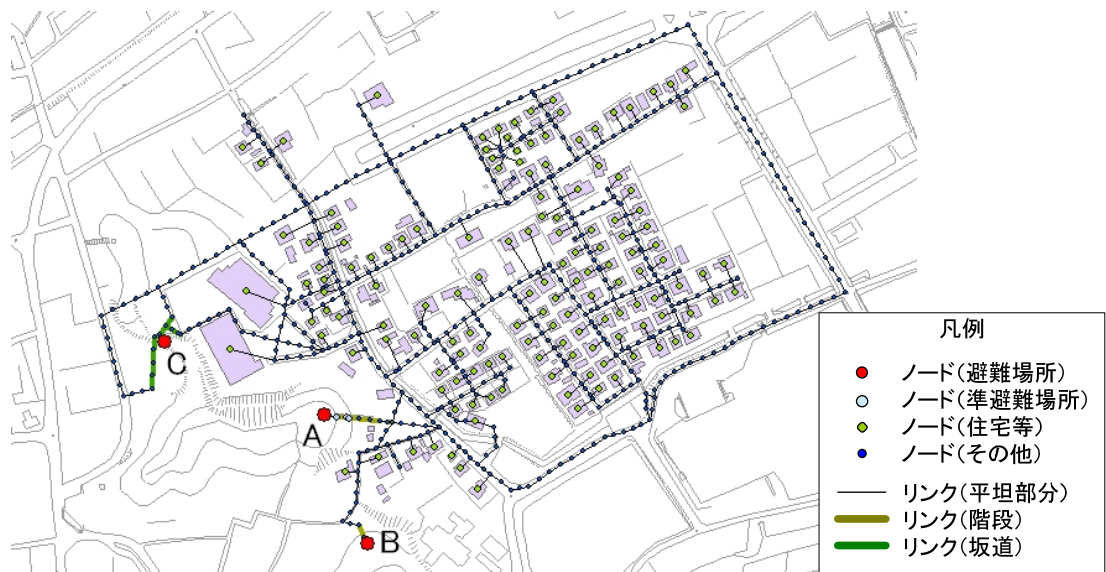


図-5 システム適用地区の道路ネットワーク

- ・移動単位の選択（個人，グループ（世帯））
- ・基本的な避難経路として最短時間経路または最短距離経路を選択する。
- ・各住民ごとに出発地，出発時間，目的地を設定できる。
- ・各住民ごとに基本歩行速度を設定できる。
- ・各リンクの混雑度に応じて歩行速度を変化させる。
- ・勾配等の道路条件に応じて歩行速度を変化させる。
- ・リンク，ノードの新入上限人数および避難場所定員が設定できる。（幅員，避難場所面積の考慮）
- ・津波到達位置より十分な高さを有する場合は準避難場所として避難者を収容できることとする。
- ・避難場所定員超過時には目的地を変更する。
- ・道路閉塞が考慮できる。
- ・道路閉塞を考慮した最短経路を選択できる。
- ・道路の混雑度に応じた経路変更ができる。（ランダムに経路を選択する）
- ・道路閉塞箇所および避難場所定員超過に関する避難者間の情報伝達（情報の発信確率，受信確率が

各住民ごとに設定できる）

3. 津波避難シミュレーション

(1) 前提条件

津波避難シミュレーションを行う際の前提条件について示す。

a) システム適用地区

システム適用地区として，過去の南海地震による津波被災経験を有する徳島県阿南市津乃峰町内で比較的自主防災組織が活発な3地区（長浜西3・4組防災会，津乃峰団地自主防災会，四宮団地自主防災会，以下それぞれを長浜西地区，津乃峰地区，四宮地区と呼ぶ）を選定した。図-4右中央部の縦線部が3地区である。

b) 対象地区の道路ネットワーク

システム適用地区の道路ネットワークを図-5に示す。図-5においてノードは4種類に分類して表示し

ており、避難場所および準避難場所のノードはモデル化時のプレースの分類に対応している。図-5中の赤丸A～Cは一次避難場所の位置を表しており、収容定員は表-1に示す通りである。そして、リンクは3種類に分類して表示している。住宅のノードに接続するリンクはモデル化時に1つのトランジションと2本のアークでモデル化した部分である。道路条件による歩行速度への影響は、階段のリンクで通常時の35%，坂道のリンクで通常時の40～80%とした。

c) 対象住民

対象住民は3地区の合計124戸、359人の住民とする。各地区の人数は表-2に示すとおりである。また、アンケート未回答の住宅が17戸あり、これらは各住宅1戸につき一律3人の住民がいると仮定し、対象住民に加えている。

d) 歩行速度

各住民の基本歩行速度は、表-3に示すようにアンケート結果をもとに年齢、性別、歩行能力などから設定した。0～4歳の子供については親に抱えられて避難することを想定し、親と同じ速度とした。なお、歩行能力に関するアンケート結果で通常歩行が困難とした人については、基本歩行速度を20%または40%低減させた。年齢・性別のデータが得られなかった住民の歩行速度は1.3m/sとする。また、本研究では、移動は世帯毎に行うものとし、基本歩行速度はその世帯の中で最も遅い住民の基本歩行速度とする。以上のようにして設定した各世帯の基本歩行速度を図-6に示す。

シミュレーション中は基本歩行速度により移動を行うが、表-4に示すリンク密度や道路条件（坂道・階段）に応じて速度を変化させる。

e) その他の前提条件

地震発生時刻は一般在宅の可能性が高い早朝とし、全住民が在宅しており、家屋倒壊等による負傷がなく、地動時間（2～3分）および避難準備時間（3～4分）を考慮した地震発生後の7分後に自力で避難を開始するものとする。対象とした徳島県阿南市津乃峰町の沿岸への津波到達時間は地震発生26分後とする。避難時は坂道・階段部分での歩行速度低下を考慮した最短時間経路を通り、最寄りの一次避難場所に向かうこととする。道路混雑時は歩行速度の低下を考慮し、迂回は考慮せず、避難場所に到着した避難者数が表-1の収容定員を超える場合には目的地変更することとした。このとき、対向するトークンには、目的地変更に関する情報伝達を考慮する。

表-1 一次避難場所収容定員

記号	一次避難場所名	収容定員(人)		
		避難場所	準避難場所	合計
A	塩釜神社	228	77(階段)	305
B	鎌田氏宅裏山	533	-	533
C	B&G財団阿南海洋センター裏山	300	-	300

表-2 避難シミュレーション対象住民

対象地区	シミュレーション対象住民数			対象地区戸数	
	アンケート回答者(人)	アンケート未回答者(推計)(人)	合計(人)	地区別戸数(戸)	内、アンケート未回答戸数(戸)
長浜西地区	147	12	159	46	4
津乃峰地区	112	36	148	60	12
四宮地区	49	3	52	19	1
全体	308	51	359	125	17

表-3 基本歩行速度

年齢(歳)	男性(m/s)	女性(m/s)	年齢(歳)	男性(m/s)	女性(m/s)
0～4	※0.90	※0.90	45～54	1.30	1.17
5～9	1.00	1.00	55～64	1.20	1.08
10～14	1.20	1.20	65～74	1.00	0.90
15～34	1.50	1.30	75～84	0.90	0.81
35～44	1.40	1.26	85～	0.80	0.80

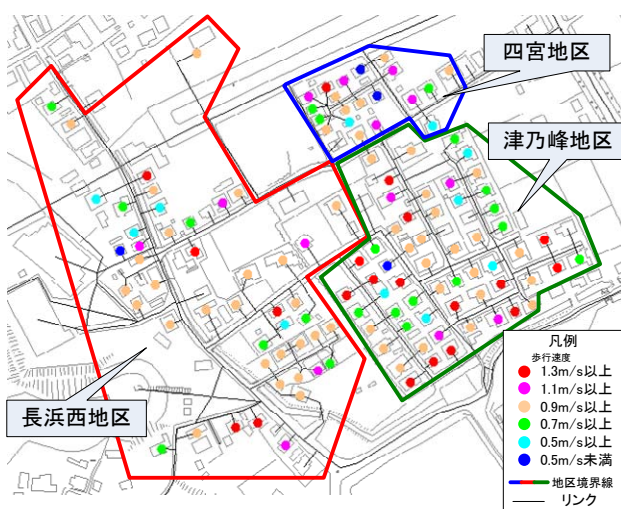


図-6 地区区分および対象住民（世帯）の基本歩行速度

表-4 基本歩行速度

リンク密度(人/m ²)	歩行速度	道路状態
1.5以下	基本歩行速度	-
1.5超3.8以下	0.5m/s	リンクの混雑状態
3.8超6.5以下	0.2m/s	リンクの混雑状態・渋滞発生
6.5超	-	リンクの過密状態・移動停止

表-5 基本歩行速度

シミュレーション パターン	道路閉塞 設定箇所	閉塞箇所の 情報伝達	シミュレーション パターン	道路閉塞 設定箇所	閉塞箇所の 情報伝達
1	なし	-	9	X	有
2	X	無	10	Y	有
3	Y	無	11	Z	有
4	Z	無	12	X,Y	有
5	X,Y	無	13	X,Z	有
6	X,Z	無	14	Y,Z	有
7	Y,Z	無	15	X,Y,Z	有
8	X,Y,Z	無			



図-7 道路閉塞設定箇所

表-6 基本歩行速度

シミュレ ーションパ ターン	前提条件		3地区全体の 避難完了時間 (地震発生=0分)
	道路閉塞 設定箇所	閉塞箇所の 情報伝達	
1	なし	-	21 分 45 秒
2	X	無	21 分 45 秒
3	Y	無	21 分 45 秒
4	Z	無	21 分 45 秒
5	X,Y	無	28 分 26 秒
6	X,Z	無	21 分 45 秒
7	Y,Z	無	21 分 45 秒
8	X,Y,Z	無	避難完了できず
9	X	有	21 分 45 秒
10	Y	有	21 分 45 秒
11	Z	有	21 分 45 秒
12	X,Y	有	23 分 22 秒
13	X,Z	有	21 分 45 秒
14	Y,Z	有	21 分 45 秒
15	X,Y,Z	有	避難完了できず

本章で行う避難シミュレーションのパターンを表-5に示す。避難シミュレーションは、図-7に示す道路閉塞設定箇所X, Y, Zと情報伝達有り、情報伝達無しの場合を組み合わせた場合について行った。また、この道路閉塞を設定した3箇所は、道路幅員が

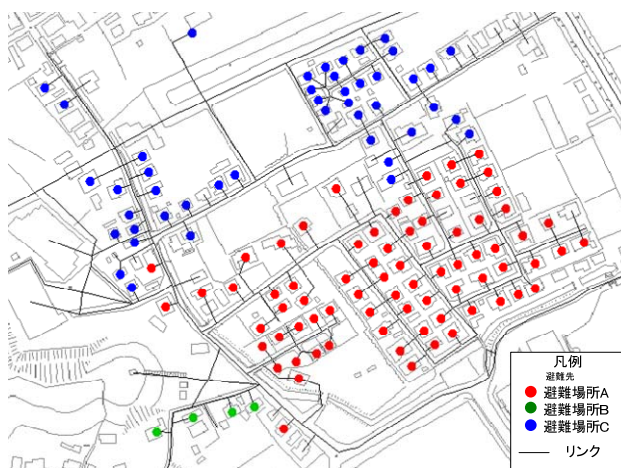


図-8 各世帯の避難先 (パターン1)

表-7 地区および避難所別避難者数

地区	一次避難場所別避難者数(人) (割合)		
	A:塩釜神社	B:鎌田氏宅 裏山	C:B&G財団 阿南海洋セ ンター裏山
長浜西地区	84(52.8%)	19(12.0%)	56(35.2%)
津乃峰地区	129(87.2%)	0(0%)	19(12.8%)
四宮地区	0(0%)	0(0%)	52(100%)
全体	213(59.3%)	19(5.3%)	127(35.4%)
定員	305人	533人	300人

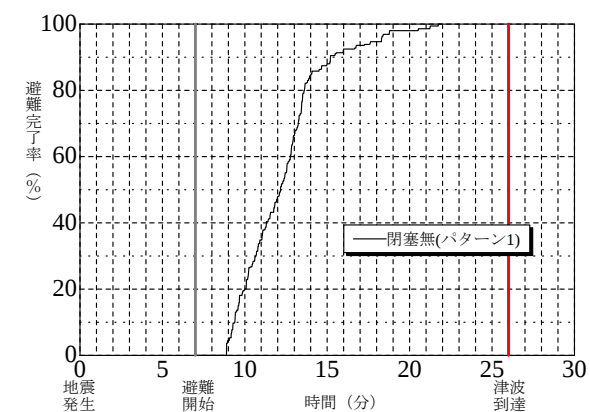
狭く家屋が道路の両側にあるため建物倒壊による道路閉塞が生じる可能性が高く、またその場合に影響が大きいと考えられる地点である。したがって今回は既往の研究⁹⁾での道路閉塞予測手法を用いていない。これらの閉塞箇所は完全に通行不可とする。

(2) シミュレーション結果と考察

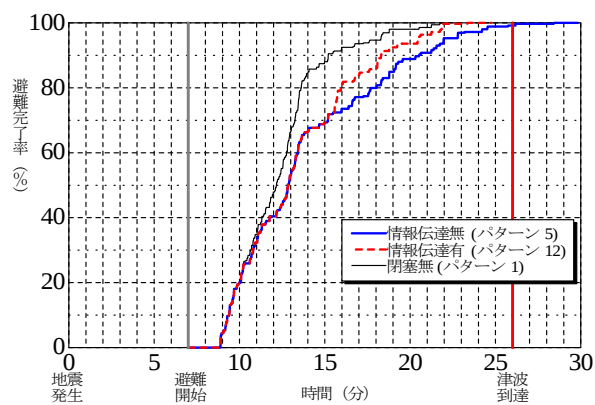
本研究で開発した手法を用いて、避難シミュレーションを行った結果を示す。表-6は各シミュレーションパターンにおける3地区全体の避難完了時間を示したものである。ここで、避難完了時間は地震発生から住民が避難完了するまでの時間とする。

a) 道路閉塞考慮の有無について

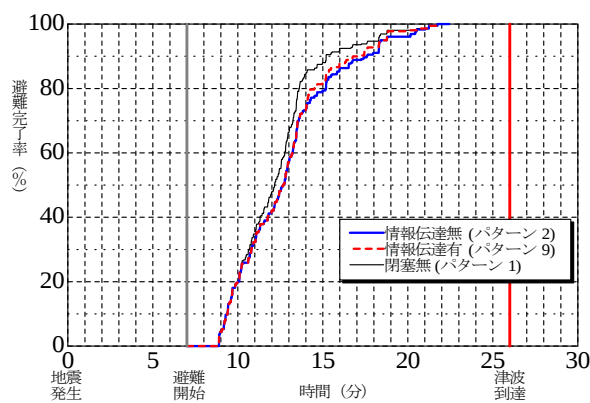
道路閉塞を考慮しないパターン1では、全住民の避難完了時間は21分45秒となり、津波到達予想時間より約4分早く避難が完了した。図-8、表-7はそれぞれ各世帯の避難先、地区別・避難場所別の避難者数を示している。最寄りの避難場所に避難した場合には、避難場所の収容定員は足りていることが分かる。また、津乃峰地区では避難場所A、四宮地区では避難場所Cにそれぞれ避難する傾向があるが、長浜西地区では3箇所の避難場所に分散して避難している。このように、同じ防災会に所属し家屋が隣接していても各住民の一次避難場所が異なる場合も考えられる。



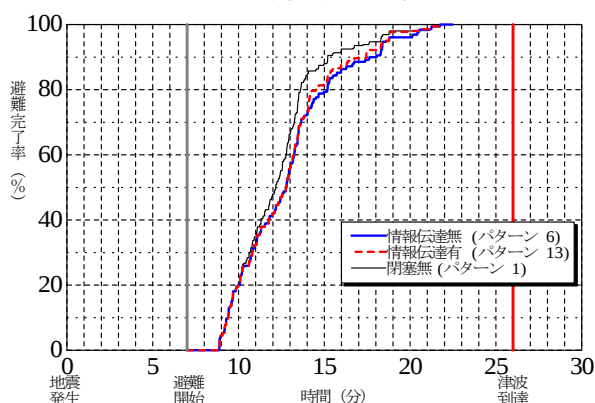
(a) 閉塞箇所：無し



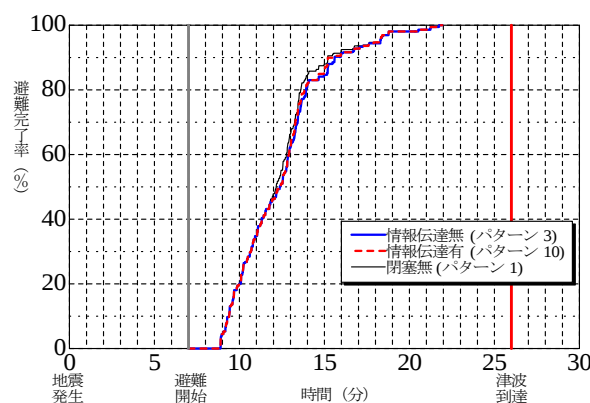
(e) 閉塞箇所：X, Y



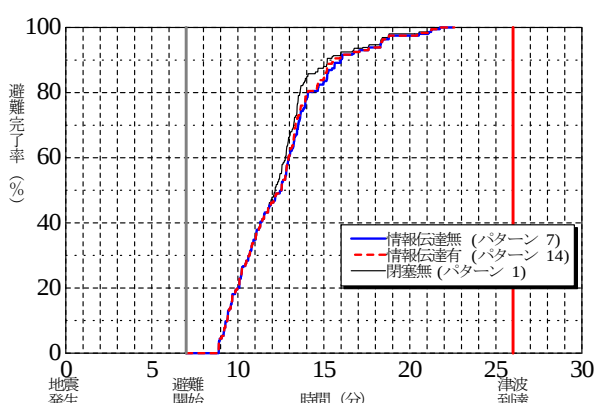
(b) 閉塞箇所：X



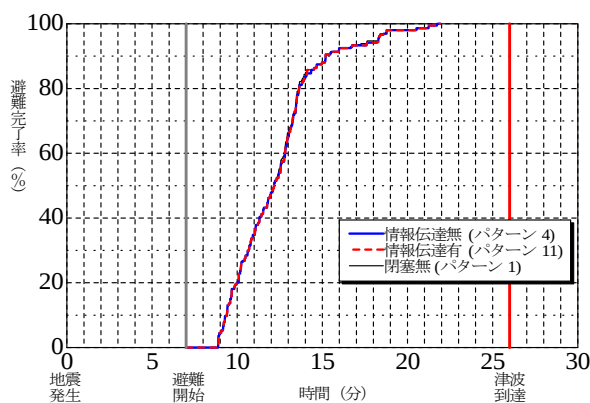
(f) 閉塞箇所：X, Z



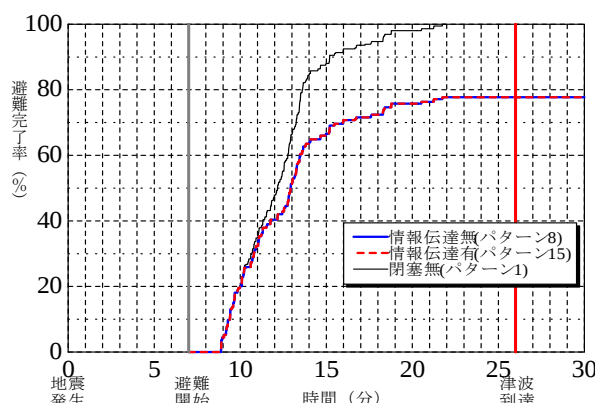
(c) 閉塞箇所：Y



(g) 閉塞箇所：Y, Z



(d) 閉塞箇所：Z



(h) 閉塞箇所：X, Y, Z

図-9 避難完了率曲線 (パターン 1~15)

図-9にパターン1～15の避難完了率曲線を示す。これは横軸に時間、縦軸に避難完了率をとっている。(a)は道路閉塞を考慮しないグラフ、(b)～(h)は閉

塞箇所別のグラフである。また、比較のために道路閉塞を考慮しないパターン1の避難完了率曲線も(b)～(h)に示す。図-9(a)より、地震発生から約14分後の避難完了率の勾配が大きく異なっていることが分かる。これは、14分以前に歩行速度の速い住民が避難を終え、歩行速度の遅い遠方の住民の避難が未完了なためである。これより、避難完了率曲線は住民の初期位置およびその歩行速度の影響により上昇割合が今回のように急激に変化することがあるといえる。

道路閉塞を考慮する場合、地点YまたはZが閉塞し、地点Xが閉塞箇所に含まれない(b)、(c)、(f)のケースでは、閉塞がない場合との差が小さかった。これは、地点Y、Zを通る最短経路が通行できなくても、道路閉塞がない場合の最短経路にほぼ並行する道路が存在するため、ほとんど引き返すことなく避難場所の方向へ進むことができるためと考えられる。一方、地点Xが閉塞する(a)、(d)、(e)のケースでは閉塞がない場合との差が大きく表れた。特に地点X、Yの両方が閉塞する(d)のケースで差が大きくなった。これは、閉塞していることを知った後、一度避難場所と反対方向に比較的長距離を移動しなければならないためといえる。そして、地点X、Y、Zのすべてが閉塞する場合には孤立状態となり、3地区の全避難者数の22.3%にあたる80人が避難完了できない結果となった。

b) 情報伝達の有無について

情報伝達の有無による比較を行う。図-10は、パターン5および12のシミュレーションで、住民がX、Yの道路閉塞箇所付近を移動する様子を避難開



図-10 閉塞箇所 X、Y 付近の住民移動状況 (パターン 5, 12)

始 1 分後～4 分後まで示したものである。図中の矢印はその時刻・位置における避難者の主な進行方向である。避難者は避難開始直後から閉塞箇所に到着し引返し始める。避難開始 2 分までに地点 Y の閉塞箇所を知り経路変更した避難者は次の最短経路上の閉塞箇所 X の方向へ進む。このとき、情報伝達を考慮しない場合は各トークンが 1 度は閉塞箇所 A の直前の地点に向かうため、この付近のリンクでは双方向に人が行き交っているが、情報伝達を考慮した場

合には閉塞箇所B方向に向かう集団とA方向に向かう集団が対向した時点で情報伝達が考慮され、A方向に向かっていて世帯は避難開始3分後には全員が引返している。以上より住民間での情報伝達が重要であることが分かった。

また、表-6の津乃峰地区の各世帯の避難完了時間の平均値を情報伝達の有無で比較すると、その差の大小はあるがすべての場合において避難完了時間が早まっているのがわかる。図-9で比較すると、地点XまたはYが閉塞するケースにおいて情報伝達の考慮の有無で差がみられ、情報伝達を考慮する場合には考慮しない場合より早く避難できる人が存在した。特に、地点X、Yの両方が閉塞する(d)で情報伝達を考慮することにより避難完了率の伸びが良くなっており、このように長距離を引き返さなければならない場合において情報伝達の効果が大きいことがわかった。これは、閉塞箇所まで行くことなく対向者からの情報伝達により途中で引き返すため、必ず閉塞箇所まで進行して引返すよりも引返す距離が短くなるためである。

4. 地区避難安全性評価

避難対策を考える上で、地区住民が安全に避難可能であるか、避難経路上に問題がないかを検討することが不可欠である。本章では3章の避難シミュレーション結果をもとに、対象地区の津波に対する避難安全性の検討を行う。

(1) 地区避難安全性指標の検討

従来、避難シミュレーションから得られる結果の中で、地区全体の避難完了時間、最終的な避難完了者数ならびに被害者数に注目することが多く、津波到達時に「全員が避難を完了」、「被害者数が0」となるときには、安全に津波からの避難が行われたといえることができる。このように様々なシナリオにおけるこれらの値の相違をもとに各種対策効果の検討が行われている。しかし、避難完了時間、最終的な避難完了者数ならびに被害者数は避難プロセスのすべてを反映したものではない。また、津波の到達予想時間及び規模の予測が必ずしも精度が高いとは限らず、より早く大きな津波が襲来する可能性が無いとは言えない。したがって、地震発生から津波到達までに、可能な限り早く時間的余裕を残して地区内の全員が避難できるように、対策を検討することが重要である。

そのためには、個人の移動の様子や避難完了率の時系列変化などの避難プロセスを考慮した避難状況を分析しておくべきである。本研究では、避難シミュレーション結果から得られる情報を基に、「その地区においてどの程度安全にスムーズに津波避難が可能であるか（避難安全性）」を示すことができる指標について検討した。地区の避難安全性を定量的に評価し得る指標があれば、対策前後の避難安全性

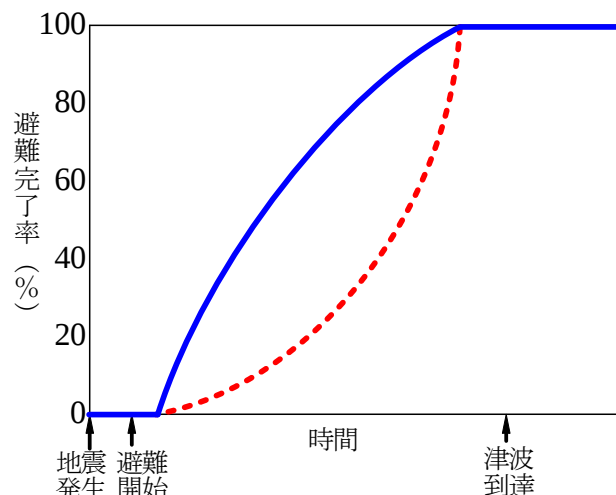


図-11 避難完了率曲線（模式図）

の向上の度合いを知ることおよび避難活動において存在する問題の大きさを地区間で比較することなどが容易になると考えられる。ここではこの指標を地区避難安全性指標と呼ぶことにする。

a) 避難完了率曲線

避難完了率曲線は、一次避難場所の設置状況、住民の個別属性、道路状況等の条件によって変化する。図-11は実線と点線の2つの場合で避難完了時間が同じとなるケースを表している。避難がより早くスムーズに行われる場合には、避難完了率曲線は実線のように上に凸となる。このように、避難完了率曲線は避難完了時間のみでは分からない避難状況の時系列変化（避難プロセス）を表わしており、避難の進行状況を判断することができる。このことから、避難完了率曲線を利用して評価を行うこととした。

b) 地区避難安全性指標

地区避難安全性指標を作成するにあたり、シミュレーション結果から得られる避難状況の時系列変化（避難プロセス）を表す情報を用いることとした。各時刻の避難者の存在位置は指標として利用するのが難しく、これは避難完了率および各時刻・各道路区間の通行人数にも関係するため用いない。また、各時刻・各道路区間の通行中人数は、地域内の道路の使用状況等を表す有用な情報であるが、このような情報は道路の混雑等を考慮することによって避難完了率の上昇過程に反映されると考えられる。したがって、ここではより簡単な指標とするため各時刻の避難完了率すなわち避難完了率曲線のみに着目した。また、避難完了率として「評価対象地区の住民で避難完了した住民数（避難した避難場所は問わない）」を「評価対象地区の全住民数」で除したものをを用いることとした。地区避難安全性指標 I_{rs} を次式に示す。

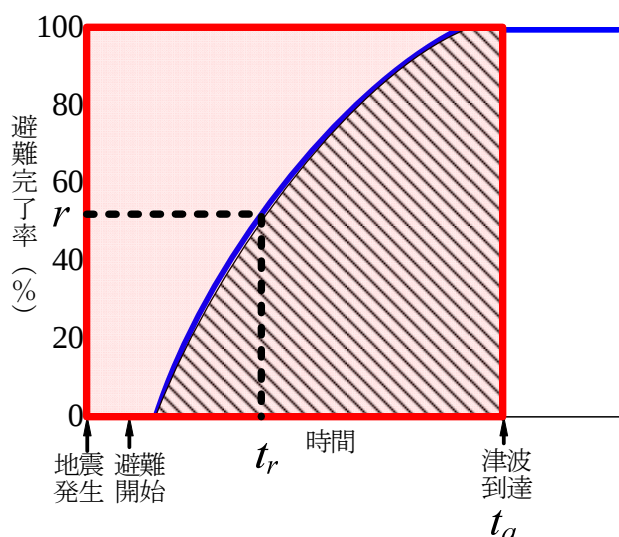


図-12 避難完了率曲線と
地区避難安全性評価指標の関係

$$I_{rs} = \frac{\int_0^{100} (t_a - t_r) dr}{\int_0^{100} t_a dr} = \frac{\int_0^{100} (t_a - t_r) dr}{100t_a} \quad (1)$$

ここで、 t_r ：避難完了率が $r(\%)$ となるときの地震発生からの経過時間、 t_a ：地震発生からの津波到達予想時間。

また、式(1)の分母は図-12中の赤色部の面積に相当し、分子は黒斜線部の面積に相当する。また、 $I_{rs} \leq 1$ であり、 I_{rs} が1に近くなるほど避難安全性が高いといえる。なお評価指標 I_{rs} は、場所依存性の高い t_a を規準化パラメータとして用いており、同地区内の避難対策の違いが安全性指標値に及ぼす影響、あるいは近接した地区間の相対的な避難安全性等の評価に適している。

(2) 避難安全性の検討

本研究で提案した地区避難安全性指標値を算出し比較を行う。図-13にパターン1の地区別および全体の避難完了率曲線を示す。これを用いて評価指標値を計算した結果を表-8に示す。また、パターン1では全員の避難開始時刻を地震発生7分後としたため、評価指標値が0.731を超えることはない。

この3地区の中で評価指標の値は長浜西地区が最も高くなり、長浜西地区が最も避難安全性が高いと判断できる。これは、3か所の一次避難場所すべてが長浜西地区の近傍にあるためである。また、津乃峰・四宮両地区を比較すると、避難完了時間による結果と異なり、津乃峰地区の避難安全性の方が高い結果となった。これは避難完了時間が、その地区で最後に避難完了する避難者の避難完了時間に依存することや、図-13において津乃峰地区の方が避難完了率の上昇が大きい時間帯が早く、このことが指標値に反映されているためといえる。したがって、津乃峰地区では全体の避難の進行状況が比較的良好いこ

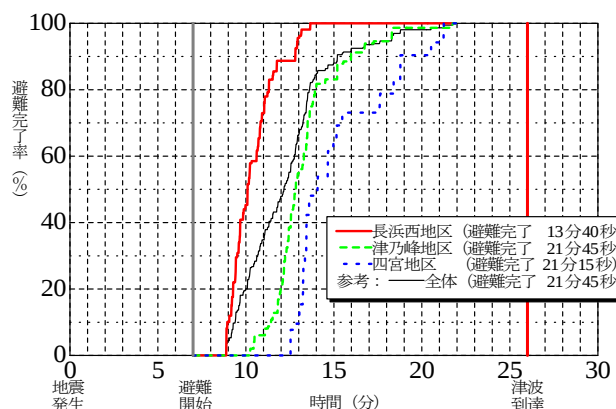


図-13 地区別避難完了率曲線（パターン1）

表-8 各地区の避難安全性評価指標値

地区名	評価指標 I_{rs}
長浜西地区	0.600
津乃峰地区	0.488
四宮地区	0.414
全体	0.527

とから、一部の住民の避難の遅れが発生すると考えられ、これに対する対策が必要であるといえる。

5. おわりに

本研究では、既往のペトリネットを用いた津波避難シミュレーション手法⁷⁾をより現実的な挙動を示すように改良し、「道路閉塞時の迂回行動」、「避難場所定員超過時の目的地変更」ならびに「道路閉塞箇所および避難場所定員超過に関する避難者間の情報伝達」等が考慮可能な避難シミュレーション手法を開発した。そして、実在地区に適用して津波避難シミュレーションを行った結果、住民の初期位置および歩行速度が避難完了率曲線勾配等に及ぼす影響は大きいことが分かった。また、道路閉塞が住民の避難に及ぼす影響を小さくするためには、避難場所方向へ通じる複数の道路の存在ならびにそれらの道路の複数か所での接続が有効であるとともに、避難住民間の情報伝達が効果的であることが分かった。さらに、避難完了率曲線を用いた地区避難安全性評価のための一指標を提案し、対象モデル地区の避難安全性を評価した結果、提案した地区避難安全性指標(I_{rs})は、避難の進捗状況を表す指標として有用であり、近接した地区間や避難対策前後の相対的な避難安全性の評価に利用できることが分かった。

参考文献

- 1) 文部科学省研究開発局地震・防災研究課 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：今までに公表した活断層

- 及び海溝型地震の長期評価結果一覧, 2009. 1. 9.
- 2) 徳島県：徳島県地震動被害想定調査 説明資料, 徳島県ホームページ<http://www.pref.tokushima.jp/>, 2005.
 - 3) 片田敏孝・桑沢敬行・金井昌信：発災時刻の都市アクティビティを考慮した津波による人的被害量の推定に関する研究, 土木学会論文集D, Vol. 63, No. 3, pp. 275-286, 2007.
 - 4) 二神透・木俣昇：背景画像上での避難ペトリネットシミュレーションへのプローブ情報技術の活用化研究, 土木情報利用技術論文集, Vol. 14, pp33-40, 2005.
 - 5) 木俣昇・岸野啓一・白水靖郎：交通流ペトリネットシミュレータの実用化システムの開発, 土木情報システム論文集, Vol. 9, pp. 31-40, 2000.
 - 6) 辻原治・寺田和啓・澤田勉：ペトリネットを導入した地震時同時多発火災に対する延焼シミュレーションの構築, 土木情報利用技術論文集, Vol. 14, pp129-136, 2005.
 - 7) 藤原康寛, 源貴志, 成行義文, 田中徳一：ペトリネットを用いた津波に対する住民避難シミュレーションに関する基礎的研究, 土木学会四国支部第13回技術研究発表会, pp122-123, 2007.
 - 8) 源貴志, 成行義文, 天野健, 平尾潔：GISによる道路網ネットワーク及び属性データの作成方法と道路閉塞予測への適用, 土木情報利用技術論文集 vol. 15, pp. 127-138, 2006.

DEVELOPMENT OF TSUNAMI EVACUATION SIMULATION SYSTEM AND APPLICATION ON THE REFUGE SAFETY ASSESSMENT OF THE AREA

Takashi MINAMOTO, Yoshifumi NARIYUKI, Yasuhiro FUJIWARA and Atsushi MIKAMI

The Nankai earthquake is predicted to occur with the probability of 50-60% within 30 years. The predicted damage of this earthquake is caused by the seismic ground motion and tsunami. It is necessary to do emergency evacuation drill of all inhabitants to prevent the human suffering caused by the tsunami. It is important to find the problems of evacuation and make people aware of such of crisis, but since it is difficult to perform emergency evacuation drills with the presence of all inhabitants. The tsunami evacuation simulation system was developed. The problems which might be encountered during the evacuation process were predicted. Then, the refuge safety index was proposed to evaluate the safety of the area.