

# 自主防災組織で活用可能な津波避難シミュレーションシステムの開発に関する基礎的研究

源 貴志<sup>1</sup>・成行 義文<sup>2</sup>・藤原 康寛<sup>3</sup>・三神 厚<sup>4</sup>・澤田 勉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>徳島大学大学院先端技術科学教育部 博士後期課程 (〒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

<sup>2</sup>徳島大学教授大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒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

<sup>3</sup>徳島大学大学院先端技術科学教育部 博士前期課程 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2丁目1番地)

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

今回の南海地震の発生確率は、50年以内に約80%と予測されている。南海地震のような海洋型の巨大地震では津波による被害を伴う事が特徴的である。津波から人命を守るためには、住民の防災意識を高め、全員参加の定期的な避難訓練により、問題点を事前に抽出し適切な対策を実施する必要がある。しかし、現実には全住民参加の避難訓練を行うことは容易ではない。以上のようなことより、本研究では、自主防災組織で活用可能な津波避難シミュレーションシステムの開発を目的として、各住民の歩行速度ならびに家屋倒壊による道路閉塞等を考慮した津波避難シミュレーションシステムをペトリネットを用いて構築し、徳島県阿南市の一部の津波被災リスクの高い地区に適用して、その有用性を確認した。

**Key Words :** tsunami evacuation simulation system, walking ability, Petri net, voluntary disaster preventing organization, Nankai earthquake

## 1. はじめに

南海地震は日本における代表的な海洋型の巨大地震であり、その次回発生確率は、10年以内に約10%、30年以内に約50%、50年以内に約80%と予測されている。一般に巨大海洋型地震では、大きな地動による構造物の損壊等だけでなく津波による被害を伴うことが特徴的である。

津波から人命を守る最も有効な手段は、津波到達までに住民を安全な避難可能場所に避難させることである。有事の際の避難活動をスムーズに行うためには、全住民参加による避難訓練を定期的実施し、住民の意識および避難スキル等の向上を図るとともに、問題点を抽出し、その対策を立てる必要があるが、規模の大小によらず避難訓練の実施は一般に容易ではない。そのため、コンピュータを用いた避難シミュレーション手法に関する研究が近年盛んに行なわれるようになった。

津波避難シミュレーションに関する代表的な研究として、片田ら<sup>1)</sup>の研究が挙げられる。片田ら<sup>1)</sup>は、「行政による住民への災害情報の伝達」、「住民の避難に関する意思決定と避難行動」および「津波氾濫による人的被害

の発生」を表現し得る津波災害総合シナリオ・シミュレータを開発し、三重県尾鷲市を対象とした津波災害のシナリオ分析等を通して、このシステムが危機管理ツールとして有効であることを示している。さらにこのシステムは、様々なシナリオ下で住民が自らの避難行動を想定し、避難の可否等をアニメーションにより確認できるため、住民にとっても大変興味深いツールとなっており、住民の防災意識向上にも有用であると考えられる。また、竹内<sup>2)</sup>らは、道路閉塞を考慮した視覚的避難経路解析法を開発し、高知県上ノ加江地区に適用して、道路網リンクの改善ならびに避難場所の追加等が避難経路網に及ぼす影響を検討している。住民個々の避難挙動を考慮することにより、より現実的な避難経路探索が可能になると思われる。

本研究では、自主防災組織単位で活用可能な津波避難シミュレーションシステム開発のための基礎的研究として、住民個別の避難挙動をペトリネットを用いて表現するとともに家屋倒壊による道路閉塞を考慮した津波避難シミュレーションシステムを構築し、徳島県南東部における津波被災リスクの高い地区に適用してその有用性を

検討した。

## 2. 津波避難シミュレーションシステムの概要

本研究では図-1に示すような流れで津波避難シミュレーションを実施した。図-1よりわかるように本システムには住民・家屋等の個別属性を把握するための全住民に対するアンケート調査が含まれている。

以下順次、図-1中の①～⑧について説明する。

## 3. 本システム適用のためのモデル地区の選定

本システムを適用するためのモデル地区として、津波被災リスクが高く、過去に南海地震による津波被害経験を有する徳島県阿南市津乃峰町（図-2中緑色部分）内で、比較的自主防災会活動が活発な地区（図-2中赤色部分：長浜西3・4組防災会、津乃峰団地自主防災会、詳細図-3参照）を選定した（図-1①）。

## 4. 住民・家屋属性に関するアンケート調査

より現実的な津波避難シミュレーションを行うために、前述のシステム適用モデル地区の全住民に対して、住民属性及び家屋属性についてのアンケート調査を行った（図-1②）。アンケート用紙（sample）を図-4に示す。図-4よりわかるように、住民属性については、歩行速度や年齢等を、家屋属性については家屋の位置等についての質問を行った。

各地区（以下、長浜西3・4組防災会が組織されている地区を長浜西地区、また津乃峰団地自主防災会が組織されている地区を津乃峰地区と呼ぶ）に対するアンケート用紙の配布戸数及び回収率は表-1に示すとおりである。

## 5. 道路ネットワーク及び属性データの作成

GISを用い、システム適用地区の道路ネットワーク及び属性データの作成を行った（図-1③）。

道路ネットワークは、国土地理院作成の数値地図2500の道路中心線とNTTネオメイト「ジオスペース」を用いて作成した（図-5参照）。ノードは各家屋ならびに道路の交差点と屈曲点に基本的に設けられているが、後出のペトリネットによる住民移動をよりきめ細かく表現するため、図-5のように道路の各リンク長が10m以下になる

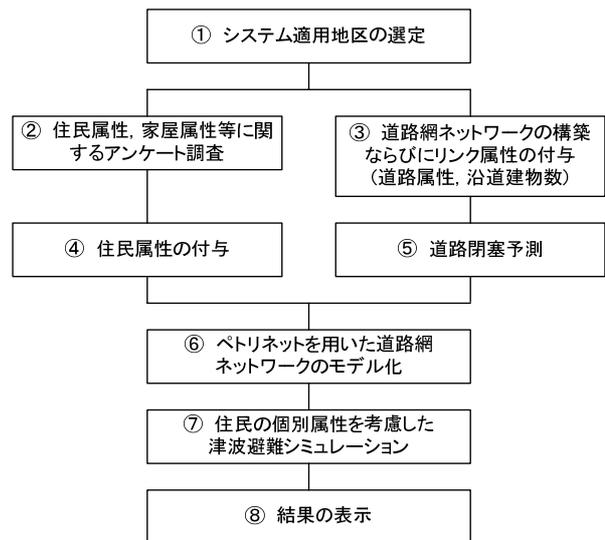


図-1 津波避難シミュレーションフロー

表-1 アンケート配布戸数及び回収率

配布地区	配布戸数	回収戸数	回収率(%)
長浜西地区	46	43	93.5
津乃峰地区	60	45	75.0
全体	106	88	83.0



図-2 モデル地区位置図（赤色）

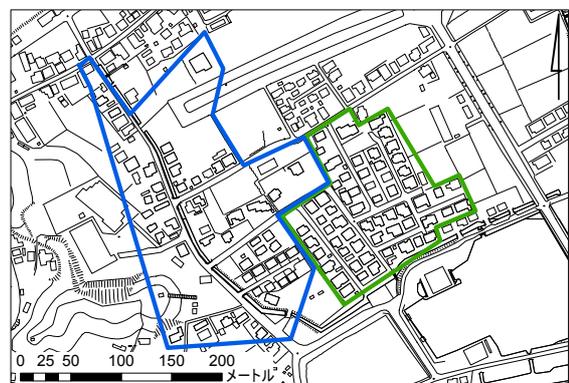


図-3 モデル地区詳細（長浜西3・4組防災会（青色）  
・津乃峰団地自主防災会（緑色））

### 記入例

【津波に対する避難シミュレーションに関するアンケート】回答用紙

記入日：H.18年11月23日 ※記入に当たっては別紙「記入例」をご参照下さい。

1. ご家族について：下表に現時点でのご家族の状況をご記入下さい。

通し番号	性別	年齢	歩行能力について (該当する欄に○を付けて下さい)			自分が行くべき避難場所について	
			通常歩行可能	ゆっくと歩行可能	自力歩行困難	知っている	知らない
1	女	85			○	○	
2	男	83		○		○	
3	女	65	○			○	
4	男	52	○				○
5	女	28	○			○	
6	男	26	○				○
7	女	2		○			○
8	男						○

2. あなたの家について

1) あなたの家の建築年等を下表にご記入下さい。

建築年	明治・大正 ( ) 昭和・平成 48年 (西暦 1973年)
家の階数	1 ( ) 2 ( ) 3・4・5・6・7・8 階
家の構造	(木造) コンクリート造・鉄筋コンクリート造・その他( )

2) あなたの家の上空からの形、配置等を下様にご記入下さい。(記入例をご参照下さい)

3) 下の地図内にあるあなたの家の枠をなぞって下さい。

※ご協力まことにありがとうございました。

図-4 アンケート用紙 (記入例)

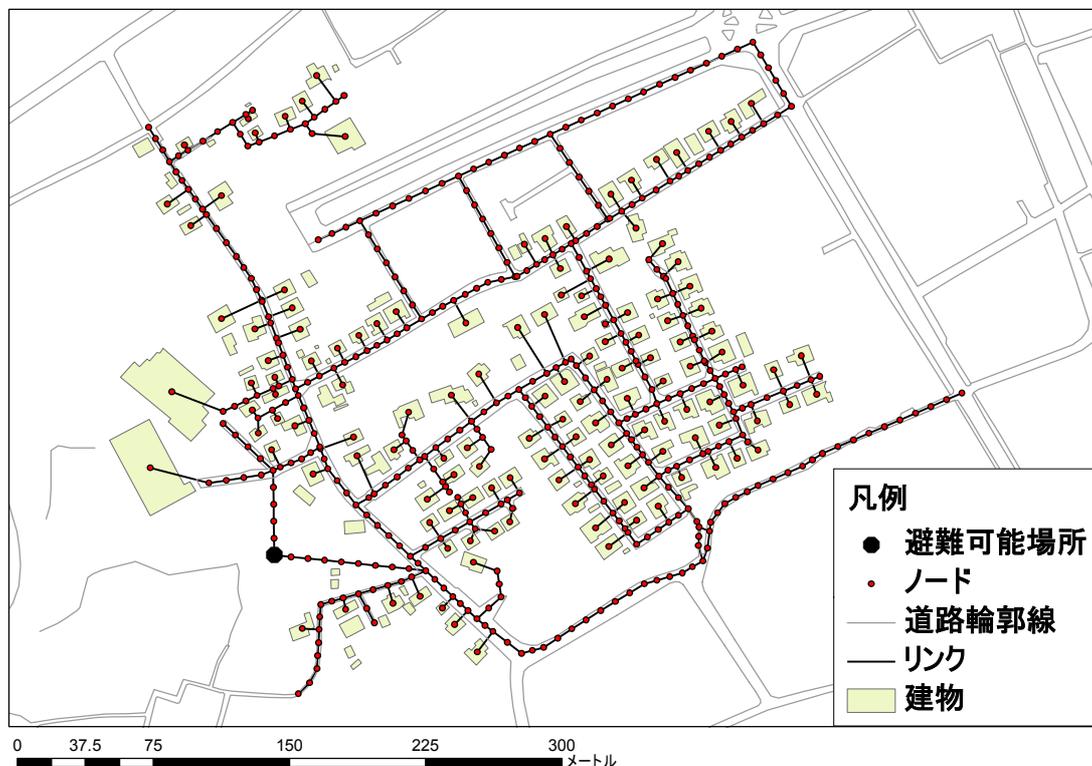


図-5 システム適用地区の道路網ネットワーク (長浜西地区・津乃峰地区、図-3参照)

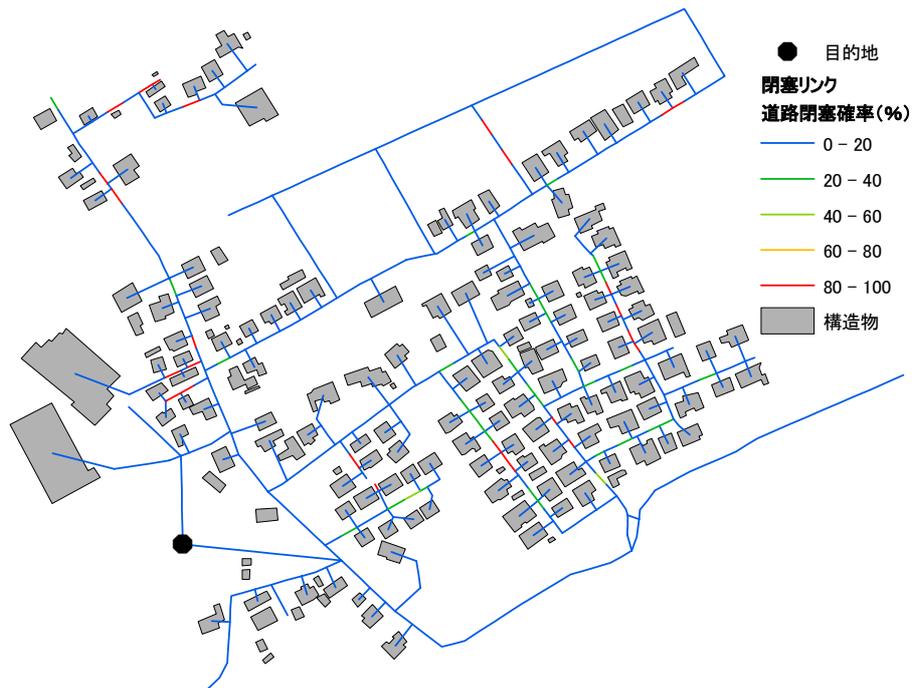


図-6 道路閉塞確率算定結果

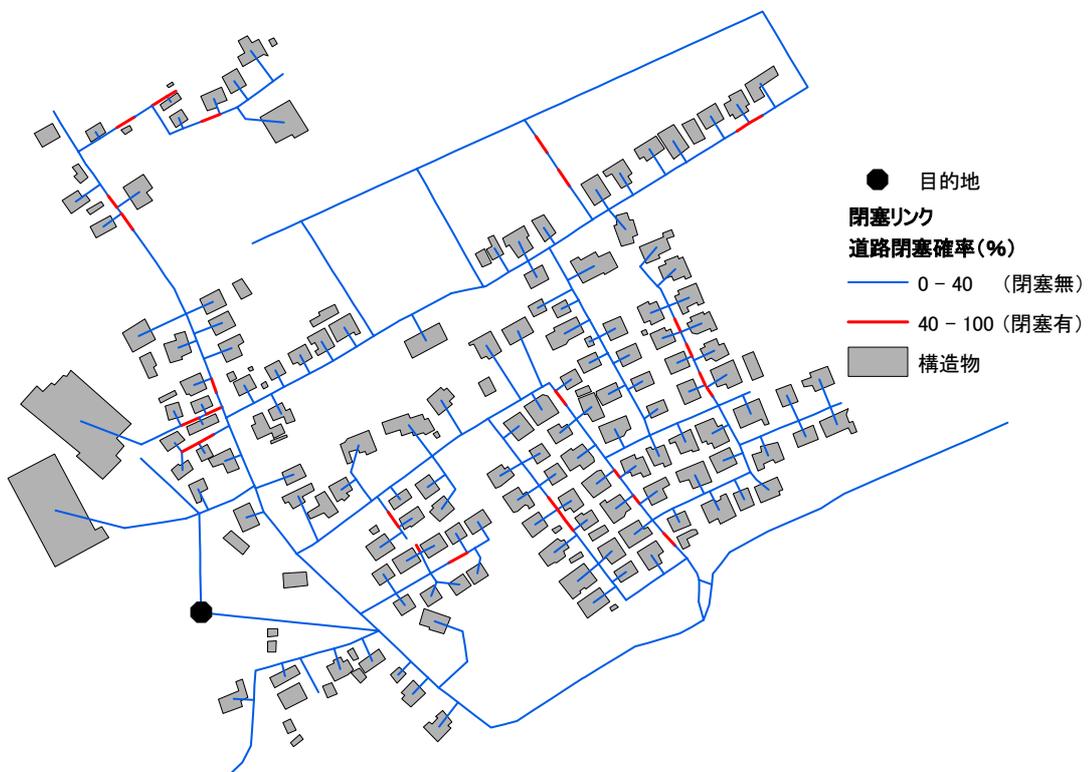


図-7 閉塞箇所の予測結果 (赤色部分閉塞)

ようにノードを設定している。ノード数およびリンク数はそれぞれ 542個および 550本である。

属性データとして、道路幅員および沿道建物数等を、本研究で作成した道路ネットワークと、MITネオメイト「ジオスペース」の道路輪郭線ならびに建物ポリゴンを用いて作成した<sup>3)</sup>。

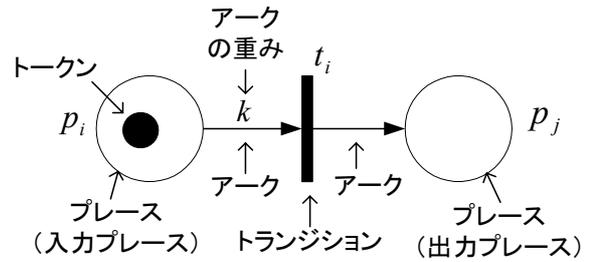


図-8 ペトリネットの構成

## 6. 道路閉塞予測

より実情に即した津波避難シミュレーションを行うためには地震時建物倒壊等による道路閉塞を考慮する必要がある (図-1⑤)。本研究では道路幅員4m未満および4m以上8m未満の道路に関してそれぞれ式(1)、(2)に基づいて道路閉塞確率の算定を行い<sup>3)</sup>、閉塞確率40%以上を閉塞と判定した<sup>4)</sup>。

$$P(\%) = \{1 - (1 - r)^{l+m}\} \times 100 \quad (1)$$

$$P(\%) = \{1 - (1 - r^2)^n\} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 $l, m$ : 沿道建物数,  $n$ : ロット数,  $r$ : 老朽建物割合である。図-6と図-7に対象地区における各リンクの道路閉塞確率ならびに閉塞の有無を示す。

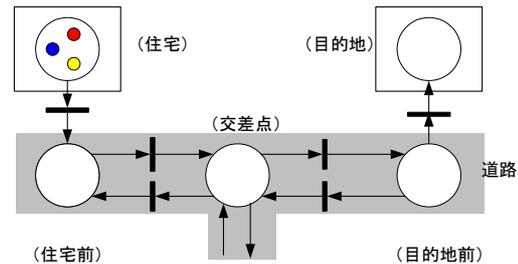


図-9 道路網ネットワーク及び住民のモデル化

## 7. ペトリネットを用いた道路ネットワーク及び住民のモデル化

本研究では、道路ネットワークを構成しているリンクとノードの表現や、住民の動的挙動の表現が容易であるペトリネット<sup>5),6)</sup>を用いて、津波避難シミュレーションシステムを構築した (図-1⑥)。ペトリネットとは、並行的・非同期的・分散的なシステムを表現するための数学的モデルである。図-8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いる。

シミュレーションを行う際には、トランジションに必要な応じた条件が入力されており、この条件が満たされると、入力プレース内に存在しているトークンが出力プレースへと移動する。ペトリネットでは、前述のようにトークンがプレース間を移動することにより動的な解析を表現することができる。

本研究では、ペトリネットを用いて図-9に示すように道路ネットワーク及び住民をモデル化した。住宅・目的地・交差点等をプレースで、住民をトークンでモデル化し、各住宅プレースにトークンを住民の人数分配置した。また、リンク(道路)はトランジションとアークにより

表-2 各住民の基本歩行速度<sup>7)</sup>

年齢(歳)	速度(m/s)	年齢(歳)	速度(m/s)
0~3	親と同じ速度	19~25	1.5
4~6	0.8	26~39	1.3
7~12	1	40~49	1.2
13~15	1.2	50~64	1
16~18	1.3	65~	0.8

モデル化した。トランジションを順次発火させ、全トークンを目的地へと移動させ、動的な避難シミュレーションを行う。

## 8. モデル地区における津波避難シミュレーションの適用

本研究ではペトリネットを用いて住民の個別属性を考慮した津波避難シミュレーションを行った (図-1⑦)。

以下にその前提条件と適用結果を示す。

### (1) シミュレーションの前提条件

a) 対象住民数：津波避難シミュレーションの対象住民数は、長浜西地区が147人、津乃峰地区が112人、その他が124人の、合計383人である。各地区の人数は、それぞ

れアンケート回答人数、またその他の人数はモデル地区内の空き家・アパート等を除いた建物に一律4人の住民がいると仮定した場合の人数である。

b) **歩行速度**：各住民の基本歩行速度は、火災便覧<sup>7)</sup>を参考に表-2に示すように年齢により分類した(図-1④)。また、道路(リンク)の人口密度により歩行速度は変化するものとし<sup>7)</sup>、それらの関係は、火災便覧<sup>7)</sup>の速度分布を参考に表-3のように仮定した。なお本研究では、リンクの進入上限人数の算出には式(3)を用いた。

$$\text{リンク進入上限人数}(m) = w \times l \times 6.5 \quad (3)$$

ここで、 $w$ ：道路幅員(m)、 $l$ ：リンク長(m)である。

また、上り坂や階段等では歩行速度が1/2になるとした。

なお、本研究では移動距離に応じた疲労による移動速度の減少を無視しているが、それらの関係が定量的に把握できれば容易に考慮することができる。

c) **経路選択**：各ブレースには目的地への最短経路情報が付与されており、これによりトークンは最短経路を選択する。道路閉塞箇所が経路上に含まれておりその直前のブレースに到着した場合、閉塞していないリンクをランダムに選択して迂回を行う。また、表-3で示したように、リンク内の密度が6.5人/m<sup>2</sup>以上の場合はそのリンクには侵入せず、現在のブレースにとどまるか他のリンクへと迂回する。迂回路を選択する場合、他に通行可能なリンクが存在しない場合を除き、直前に通過したリンクには引き返さないとする。

d) **シミュレーションパターン**：津波避難シミュレーションは、表-4に示すように、道路閉塞の有無、年齢による速度変化の有無、年齢による速度変化が有る場合に速度変化の単位が世帯もしくは個人、の3つの条件を組み合わせた6つのパターンについて行った。ここで、速度変化の単位が個人の場合、表-2より速度を決定する。速度変化の単位が世帯の場合、まず表-2より全員の速度を決定し、次にその世帯の中で最も遅い住民の速度にその世帯内の住民全員の速度を変更する。年齢による速度変化がない場合、全住民の基本歩行速度を1.3m/sとした。

e) **その他**：本研究では、地震発生時刻は、在宅の可能性が高い早朝とし、その26分後にシステム適用地区に津波が到達するとした。さらに、家屋の損壊等により死亡あるいは負傷する住民は皆無とし、全住民が地震発生後の5分後に自力で避難を開始することができ、避難可能場所の容量は十分であるとした。

## (2) シミュレーション結果

本研究は表-4のような6パターンの津波避難シミュレーションを実施した。図-10にパターン(d)の避難完了率

表-3 リンク内密度と歩行速度の相関

リンク内密度(人/m <sup>2</sup> )	歩行速度
1.5未満	基本歩行速度(表2)
1.5以上3.8未満	0.5m/s
3.8以上6.5以下	0.2m/s
6.5以上	進入不可

表-4 シミュレーションパターン

パターン	道路閉塞	年齢による速度変化	移動単位
(a)	有	有	世帯
(b)	有	有	個人
(c)	有	無	
(d)	無	有	世帯
(e)	無	有	個人
(f)	無	無	

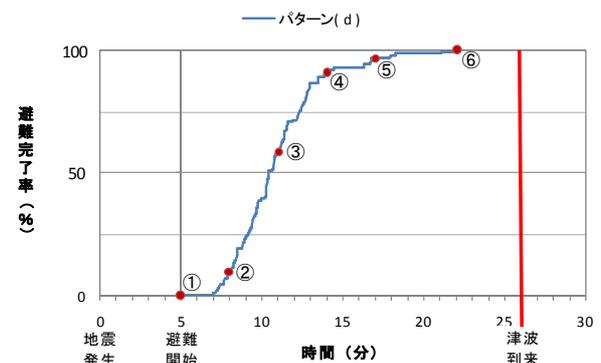


図-10 避難完了率曲線(パターン(d))

曲線を示す。パターン(d)では、避難開始から約2分後に最も早い住民の避難が完了し、また避難開始から約9分後には住民の約90%の避難が完了している。なお、この時点で避難が完了していない住民の多くは1世帯を除きすべて津乃峰地区に集中している。また、図-11①～⑥は避難開始から避難完了までの住民移動状況を示したものである。図-11及び後出の図-13中に示されている様々な色の丸印はカラートークンと呼ばれ、住民を表している。なお各カラーは白色以外の色がランダムに割り当てられている。図-11①～⑥より住民が各家屋から目的地(避難可能場所)へ向かって移動している状況がよくわかる。

表-5は、津波避難シミュレーションによる各パターンの避難完了時間及び避難完了人数(率)を示したものである。また、図-12は各パターンの避難完了率の推移を

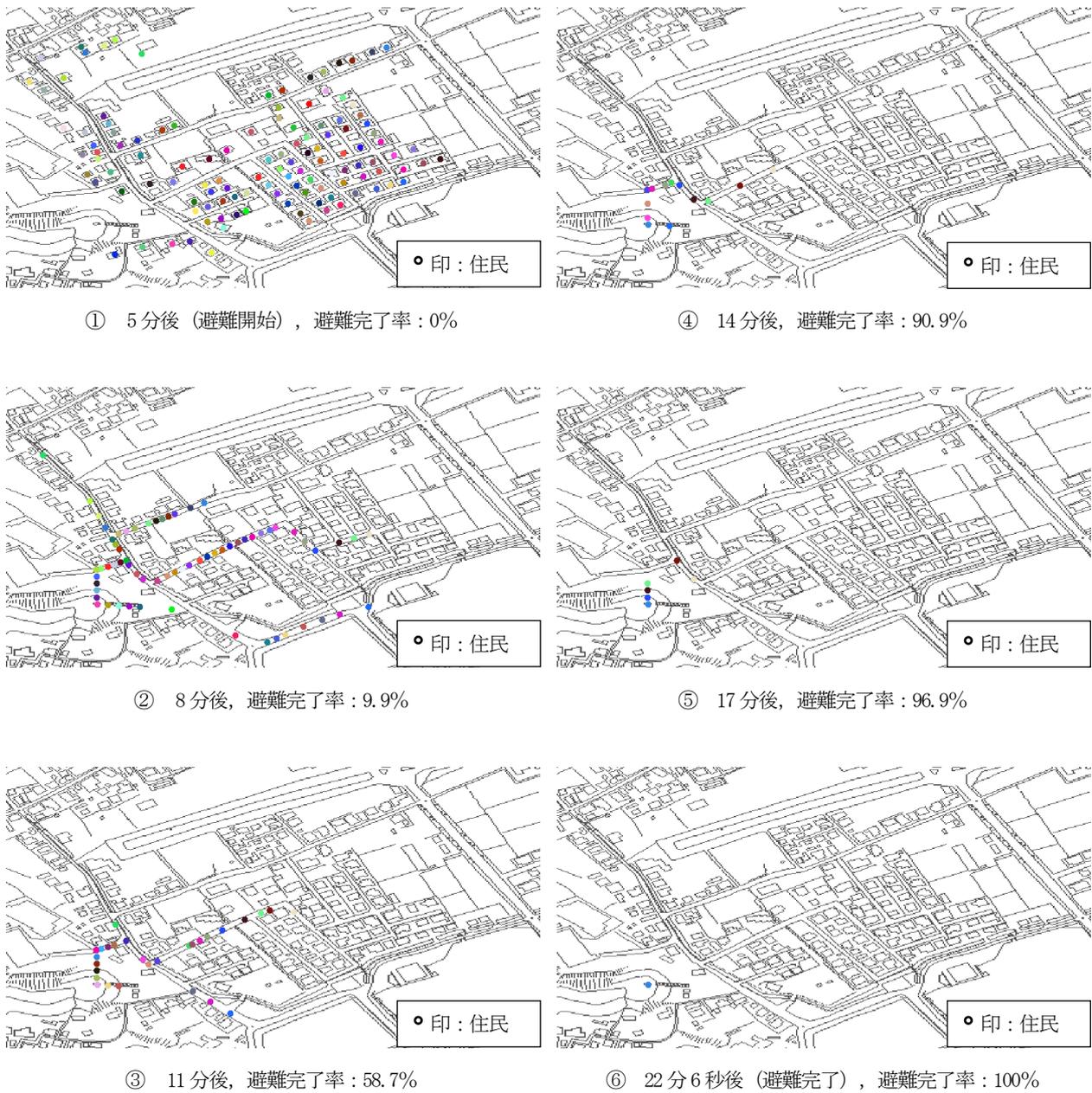


図-11 津波避難シミュレーション（パターン(d)）

表-5 シミュレーション結果

	道路閉塞考慮		
	年齢による速度変化有		年齢による速度変化無
	家族単位(パターン a)	個人単位(パターン b)	(パターン c)
避難完了時間	避難完了できず	避難完了できず	避難完了できず
避難完了人数	193人 (50.4%)	194人 (50.7%)	196人 (51.2%)

	道路閉塞無視		
	年齢による速度変化有		年齢による速度変化無
	家族単位(パターン d)	個人単位(パターン e)	(パターン f)
避難完了時間	17分6秒	17分6秒	8分16秒
避難完了人数	383人 (100%)	383人 (100%)	383人 (100%)

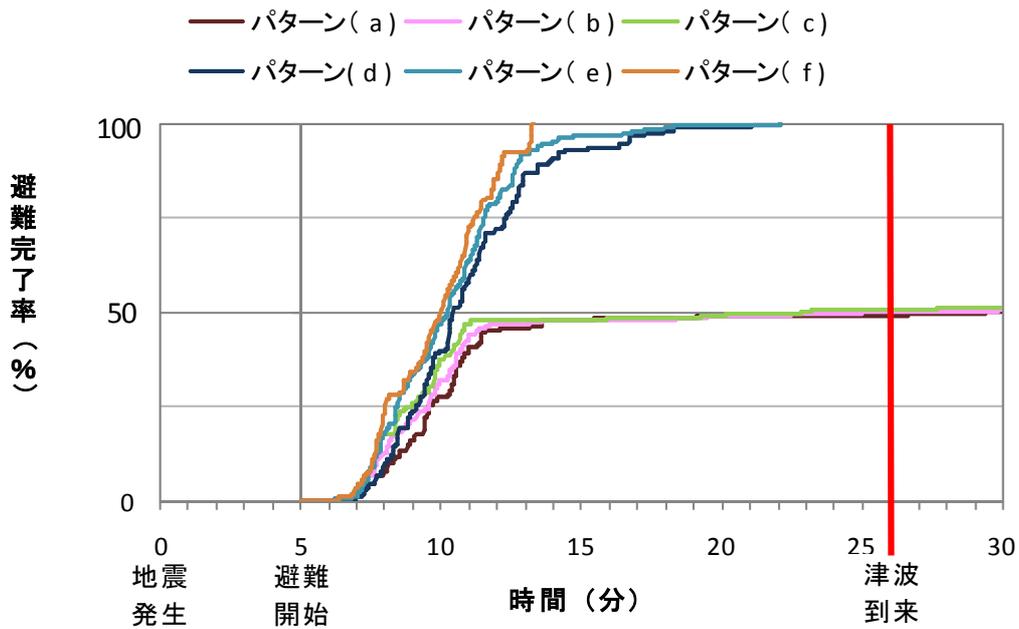


図-12 避難完了率曲線



図-13 津波避難シミュレーション (パターン(a), 収束状態)

示している。

道路閉塞を考慮した場合は、全パターン ((a)~(c)) で避難完了することはできなかった。図-13はパターン (a)の避難収束状態を示したものであるが、前出の図-7に見られる道路閉塞のために発生した孤立エリア間の住民が閉じ込められていることが分かる。しかし、道路閉塞を無視した場合 ((d)~(f)) では全住民の避難が完了

した。また、図-12より、比較的初期における避難完了率の増分は、閉塞を考慮した場合は考慮しなかった場合に比べ小さくなっている。これは、道路閉塞が発生したことで当初の最短経路を通ることができなくなり迂回しているためと考えられる。これらのことは、道路閉塞対策の重要性を示している。また、パターン (d)はパターン (e)よりも移動速度が遅い住民が多いにもかかわらず

全住民の避難完了時間に差は無かった。これは、パターン(d), (e)ともに同一のトークンが避難完了までに最も時間がかかっているためである。パターン(d), (e)の各住民の避難完了時間を比較すると、世帯の中に高齢者がいる住民ほど両者の避難完了時間の差が大きい傾向にある。また、図-12よりどの時間においても、パターン(f)が最も大きく、パターン(a)が最も小さかった。これは、パターン(a)では、移動速度を世帯の中で最も遅い住民に合わせたことで移動速度の遅い住民が増えたため、パターン(f)では、移動速度を一定(1.3m/s)にしたことで多くの住民の移動速度が速くなったためだと考えられる。各住民の移動速度の設定を変えることで、避難完了時間に差が見られ、避難完了時間が同じでも時間ごとの避難完了率に差が見られるなど、住民の移動速度がシミュレーション結果に大きな影響を与えていることが分かる。

## 9. 結論

本研究では、歩行能力等の住民個別属性ならびに建物倒壊等による道路ネットワークの閉塞・切断等を考慮し得る実用的で精度の高い動的津波避難シミュレーションシステムの構築に関する基礎的研究として、住民および家屋等の属性データの収集方法ならびにペトリネットを用いた津波避難シミュレーション手法を開発し、それらを津波被災リスクの高い徳島県阿南市津乃峰町の一部に適用してその妥当性を検討した。今後、シミュレーション結果の精度を検証するために対象地区での実施が予定されている避難訓練時の結果との比較を行うとともに、対象地区の道路ネットワークの生成ならびに住民属性データの入力方法をより簡易にすることにより、自主防災組織等の実質的な地域コミュニティ単位で活用可能な津

波避難シミュレーションシステムに改善する予定である。

**謝辞：**津乃峰団地自主防災会の青木慧氏ならびに長浜西3・4組防災会の山田修氏にはアンケート調査等で多大なご支援をいただきました。また、和歌山工業高等専門学校准教授辻原治氏にはペトリネットに関する数々のご教示をいただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 片田敏孝, 桑沢敬行: 津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発, 土木学会論文集Dvol. 62No. 3, pp. 250-261, 2006年7月.
- 2) 竹内光生, 山崎陽子, 岡林優太: 道路網リンクの閉塞率判定データを用いた数値的・視覚的避難経路解析-上ノ加江を事例として-, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, pp. 47-48, 2005年9月.
- 3) 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年10月.
- 4) 福井佑一郎, 西川香里, 成行義文, 平尾潔: 兵庫県南部地震時の木造建物倒壊長の統計分布とそれを用いた街路閉塞予測, 土木学会四国支部 第10回技術研究発表会 講演概要集, pp. 70-71, 2004年5月.
- 5) 奥川峻史: ペトリネットの基礎, 共立出版株式会社
- 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, pp. 129-136, 2005年10月.
- 7) 日本火災学会: 火災便覧, 共立出版株式会社

(2007.4.6 受付)

## Fundamental study on development of practical tsunami evacuation simulation system for voluntary disaster preventing organizations

Takashi MINAMOTO, Yoshifumi NARIYUKI, Yasuhiro FUJIWARA,  
Atsushi MIKAMI and Tsutomu SAWADA

Huge marine earthquakes, like the Nankai earthquake which is predicted to occur within the next 50 years near Shikoku island, cause tsunami. Though emergency evacuation drills are very important to find the problems of actual evacuation and make people aware of a sense of crisis, it is difficult to perform such drills with all inhabitants present. In this study, we developed a practical tsunami evacuation simulation system for voluntary disaster preventing organizations as an alternative tool of such drills. In this system, a multi-agent simulation model in which walking ability of each inhabitant can be considered is represented by Petri net. We applied the system to evacuation simulations for Tsunomine area in Anan City which is one of the highest risk tsunami area and found that this system was practical for voluntary disaster preventing organizations.