

地震時市街地避難計画のシナリオシミュレーション技術に関する基礎的研究*

Study on Scenario Simulator for Evacuation Planning in Urban Area at Earthquake*

木俣 昇**・寺西伸太郎・***二神 透****

By Noboru KIMATA **・Shintaro TERANISHI ***Toru FUTAGAMI****

1. はじめに

阪神・淡路大震災より12年が経過した。その間にも中越地震があり、国・自治体を挙げて地震防災計画の実効性の向上への取り組みがなされている。特に“いつでもどこでも”と言われるわが国では、減災への取り組みが重要となる。中央防災会議は「災害を軽減する国民運動の推進に関する基本方針」¹⁾を策定し、“さまざまな主体が連携して減災のために行動すること”を求め、毎年策定される「総合防災訓練大綱」²⁾を通じて、その実施への取り組みを指示している。

具体的には、平成18年度の大綱では、従前は“広報の充実と国民参加型訓練の工夫・充実”とされていた項目を、“災害を軽減する国民運動の推進に寄与する防災訓練の工夫・充実”という項目に差し替えて明示化するとともに、“「日常においていかに備え、災害時に何をすべきか」を考える機会となるよう工夫する”ことを求めている。前出の「基本方針」では、そのための防災教育ツール開発にも言及し、“災害をイメージし、的確に行動する能力を高める”ことや、“将来、身近に起こりうる災害イメージを分かりやすく想起できるような工夫”が肝要であるとしている。

そのようなツールとして、幾つかのシステム開発が為されてきている^{3)~6)}。それらは、視覚化をテコに上記の要望に応えるものではあるが、「大綱」にある“訓練実施において最も重要となる①状況設定及び②被害想定並びに③応急対策として講ずるべき事項(いわゆるシナリオ)をより実践的に作成する”という面では十分とは言えない。また、実効性の向上に必要なもう一つの要件、即ち主役である住民自身による“自前性”という面にも弱点がある。

著者らは、視覚性を備え、“自前性”が最大の特質と

なりうるペトリネットを導入したシナリオシミュレーション技法^{7)~11)}を提案し、建物内火災に伴う避難シミュレーションへの適用化研究^{10, 11)}を試みてきた。そして、まず、背景画像上でのシミュレーションネットの構築性との関連で、上述の①の状況設定及び②の被害想定が、対象系の実空間との対応下での想起性を基に行えること、次に、ネットの漸近的構築性及び即時シミュレーション実行性との関連で、③の応急対策として講ずるべき事項の検討機会の創出にも寄与するしることを示した。地震時市街地避難計画では、住民のより自主性の発揮と、より広範なシナリオ検討が要請される。本研究の目的は、この訓練計画への適用化に向けての技法開発・技法整備にある。

具体的には、従前の避難訓練は単なる指定避難場所への徒歩移動の体験に留まっていたが、近年では、避難時阻害を組み入れた訓練も試みられるようになってきている。とはいえ、まだまだ限定的な試みのレベルにある。本研究では、この組み入れ阻害シナリオの広範化と、それらを組み入れた避難訓練方式の支援を目指す。即ち、地震時には、建物倒壊に伴う経路閉塞¹²⁾と、同時多発火災の延焼に伴う避難阻害とが予想される。本研究では、避難シナリオの基本ペトリネット整備とともに、これらの阻害シナリオの組み入れ技法の開発を行う。特に、後者では、延焼に伴う阻害地点の拡大化が問題となる。そのために、著者らが開発してきた火災延焼シミュレーション・システム^{13)~15)}との連携化をも試みる。

2. 市街地避難シナリオのペトリネット表現技術

(1) 地避難シナリオの基本構成

地震防災計画書において、避難計画は応急対応計画として位置付けられ、校下単位での避難場所の指定がなされ、そこへの避難訓練が、予防計画の一環として位置付けられている。図-1は、地震時災害想定の下での市街地避難訓練シナリオを検討する際に必要となる基本要素を、避難者が避難路を移動して指定避難場所に至る過程を中心に、地震発生に伴う諸事象が作用する形で提示したものである。

避難開始部①は、地震発生に伴い避難者が避難開始

*キーワード：計画手法論，システム分析，防災計画，

**正員，工博，金沢大学大学院自然科学研究科教授
社会基盤工学専攻

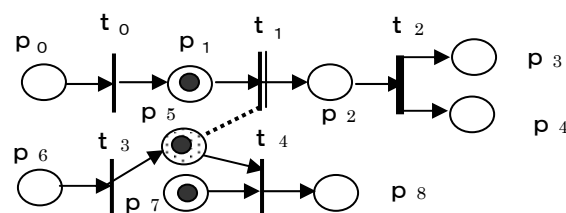
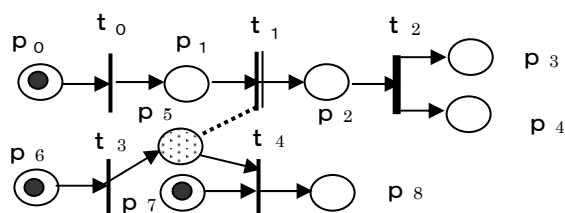
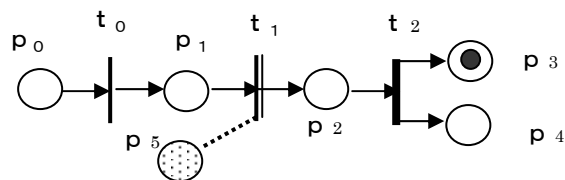
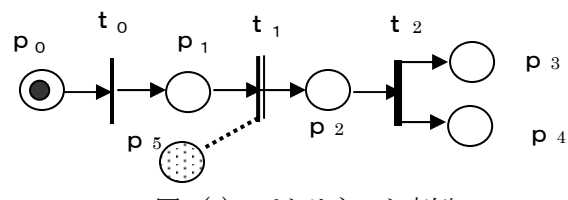
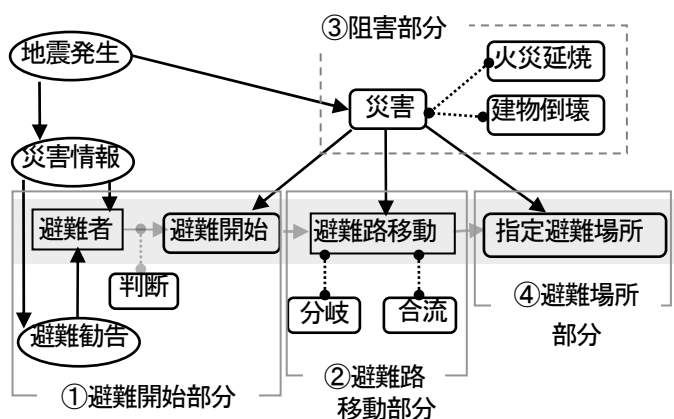
***学生員，金沢大学大学院自然科学研究科
社会基盤工学専攻

****正員，学博，愛媛大学講師

(〒920-1192 金沢市角間町，

Tel.076-234-4914 Fax.076-234-4915)

E-mail : kimata@t.kanazawa-u.ac.jp



行動を取るまでの部分である。即ち、避難開始は、避難者による災害情報や避難勧告による判断の結果としてなされる。避難路移動部②は、路上に出た避難者が避難場所に向かって移動する際の諸事象を示すもので、③は、その移動に際して地震災害が阻害要因として作用するとして、沿道建造物の倒壊と火災の延焼による想定を明示している。④は、避難場所部で、その中心場所は上述した指定避難場所であり、これについても例えばその入口の位置と形状、駐車場や広場といった他の場所の想定、さらには避難場所への災害の波及といったシナリオが検討されるべきことを示している。

本論文で提案するペトリネットによるシナリオシミュレーション法は、この概念図の基本部分ないしは基本事象の部分ペトリネットを構成し、それらの結合化によって、避難計画シナリオ案の視覚的シミュレーション実行を可能とするものであり、種々の検討を通して、避難訓練の目的・何を確かめ、何の習得を目指すのかを明確する機会を提供するものとなる。

(2) ペトリネットによる対象系の基本表現技術

図-2に、ペトリネットの1例を示す。この項では、この例を基に、表現形式としてのペトリネットの基本的な特徴・魅力点を概説する。

まず、図中に○で示されているものがブレース群、|がトランジション群で、それらの間の→と…がアークで、前者は入出力関係を、後者は抑止関係を示す。次に、ブレース上に●で示されているのがトークンで、対象系の現状態を指示する。このトークンの駆動原理を担うのが、以下に示すトランジションの発火則である。即ち、

Table 1.sdata - 大塚

ファイル(E) 編集(E) 書式(O) ヘルプ(H)

PLACE	9						
	-1	-1	0	2	1		//P0
	-1	20	0	2	1		//P1
	-1	20	0	2	1		//P2
	-1	20	1	2	1		//P3
	-1	20	2	2	1		//P4
1	-1	-1	0	2	1		//P5
	-1	-1	0	2	1		//P6
	-1	-1	0	2	1		//P7
	-1	-1	0	2	1		//P8
end							
TRAN	5						
0		-1	1		0	1	//T0
1		-1	2		-1	1	//T1
2			3	4	2	1	//T2
3		-1	5		-1	1	//T3
4	7	-1	8		-1	0	//T4
end							
TOKEN	100						
0	-1	6	-1	7	30		
-2							
GENE	0						
-1							
generatranZ	1						
1	1	50	1	20			

追加

表-1 Sdata 図-2 と図-3 のネット

- 1) 全ての入力プレースにトークンがマーキングされていて、かつ全ての抑止プレースにトークンが存在しないとき、当該トランジションは発火し、
- 2) その入力プレース群からトークンが1個ずつ消され、出力プレース群にトークンが1個ずつ配置されるというものである。

図-2のネットは、カラー・ペトリネットと呼ばれる拡張型のもので、トークンに属性(カラー)を付与する生成トランジション(t_1)と、トークン属性に応じて出力先プレースを決定する選択トランジション(t_2)という特殊トランジションをもつ。このカラー・ペトリネットでの発火則は、上述の2)の出力ルールを t_2 のときだけに選択的と変更するだけでよい。

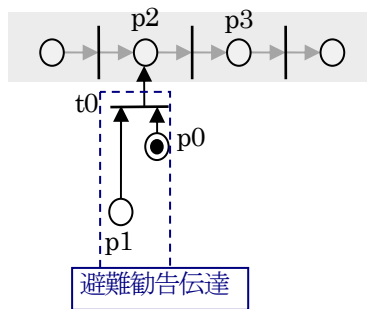


図-4(1) 避難開始部分ネット

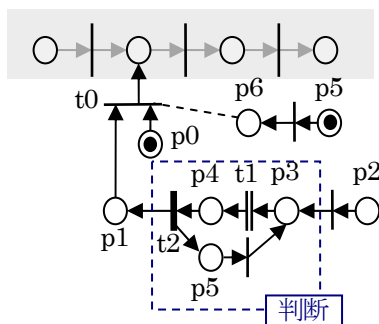


図-4(2) 避難開始部分ネット

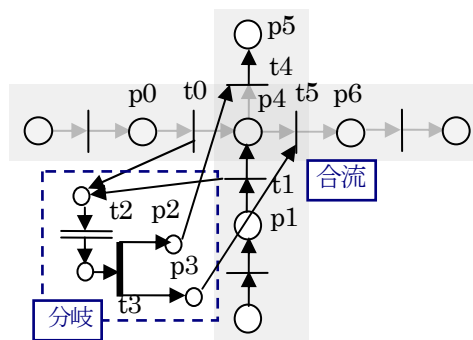


図-5 経路移動部分ネット(分岐・合流)

図-2 (2) は、図-2 (1) のトークン配置状態で、この発火則を適用し、駆動を行った結果の1例である。この例では t_1 で生成されたトークン属性が p_3 に選択出力されるものであったことが分かる。生成可能なトークン属性の総数とそれぞれの生成確率は、対象系のペトリネットを記述する S data ファイル、後出の表-1 によって設定可能である。詳細は参考文献 10) ,11) に譲る。

ペトリネットの特徴・魅力点は、その視覚出力性にあるが、上述したように要素と形式の共通性と駆動原理の汎用性から生まれるネットの拡張化、結合化の容易性にもある。さらに言えば、視覚的な表示形式と手動での確認も可能な単純・明解な駆動原理から生まれる幅広い了解可能性にこそあると考えている。ここでは、図-2 と図-3 に示したネット図を用いて、これらの特徴・魅力点を提示する。

図-2 は、状態 p_0 から出発し、事象列 t_0 , t_1 , t_2 の連鎖により、 p_3 または p_4 へと状態分岐する系が、状態 p_5 による阻害性を内在させている記述ネットといえる。図-3 は、図-2 のネットへの結合化という技法で、状態 p_5 の生起とその解除シナリオの組み込み事例である。即ち、表-1 に示すように、図-2 の S data ファイルに2つのトランジションと3つのプレースを追加して、トランジション t_3 の出力プレースに p_5 を、その p_5 を t_4 の入力プレースに設定することで組み込んである。

表-1 の S data ファイルでは、さらに各プレースにタイマを設けることで、事象生起に要する時間の作用の検討も可能とするものとなっている。前出の発火則の1) にある“トークンがマーキング”とは、このタイマ時間の経過後となる。図-3 の(2)の状況は、 p_5 からの抑止によって、 t_1 の生起が阻害されていることを示す。この阻害は p_7 のトークンに設定されるタイマ時間の経過後に t_4 が発火し、 p_5 上のトークンが消滅することで解除されることになる。このシナリオ推移は、前述の発火則と表-1 のタイマを基に、手動で確認することができる。

(3) 地震時避難シナリオの基本部分ネット構成

この項では、上で概説したペトリネットによる表現技

法を適用し、図-1 に示した地震時市街地避難シナリオを構成する①～③の基本部の表現化を行う。

まず、図-4 (1) に、①の避難開始部の基本ネット構成を示す。プレース p_0 上のトークンは、避難者の存在を示す。避難勧告の伝達を示す p_1 にトークンがマーキングされれば、トランジション t_0 に対して、上述の発火則の1) が成立し、 t_0 は発火し、2) により p_2 にトークンが配置される。即ち、避難者が避難路に出ることになる。

図-4 (2) は、避難勧告の伝達が直ちに避難開始に結び付くのではないという異議には、上述した拡張化ないしは精緻化の技法によって、判断を経て結果的には確率的な開始となるネット構成も可能なことを示唆するものである。即ち、このネットでは、 t_1 にカラー生成トランジションを、 t_2 に選択トランジションを用いることにより、生成されたカラートークンに応じて、出力プレースとして p_1 か p_5 が選択される。その結果、 p_1 であれば避難が開始されるが、 p_5 であれば一時保留状態となるというシナリオといえよう。

図-5 は、②の経路移動部のペトリネット例である。図-1 に示したように、避難経路には避難場所に向かっての合流・分岐部がある。図-5 は、避難場所が右上方にあり、左方と下方からの交差路での避難者の合流と分岐状況を想定している。具体的には、分岐判断ネットを用いて、いずれからの避難者も合流地点 p_4 に入ると同時に、右方ないしは上方かの経路選択をするネットとなっている。ここでも生成・選択トランジションによる確率化がなされているが、訓練による経路情報の有無や、経路情報の提供というシナリオも、このネットを基に構成することが可能となる。

図-6 は、③の障害部のペトリネット例である。ここでは、経路移動部で地震災害による避難障害が発生すれば、避難者の引き返しも想定されるとし、この事態への対応ネットを示している。即ち、分岐部の先での障害発生の有無による避難者の移動行動の記述ネットであり、障害の発生がない状態ないしは初期状態では、トークンは p_5 のみにあり、引き返しトランジション $t_4 \sim t_6$

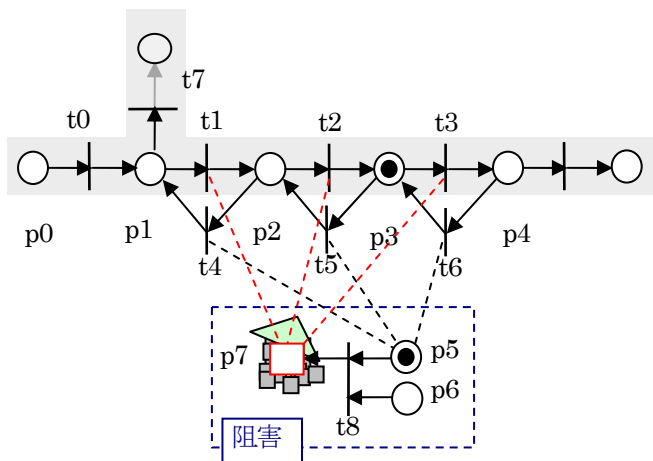


図-6 経路移動部分ネット(障害・引き返し)

は、 $\cdots$ アークにより抑止され、 p_3 の避難者(●)は、トランジション t_3 を発火させて、そのまま避難場所へと向かう。一方、地震発生による建物倒壊や火災による避難路閉塞は、 p_6 にもトークンを配置し、 t_8 を発火させることによって、 p_5 のトークンの消滅と、 p_7 へのマーキングへと推移させることで組み込める。即ち、この推移により、 $t_4 \sim t_6$ への抑止は外されて、逆に $t_1 \sim t_3$ が抑止され、 p_3 の避難者は、 t_3 ではなく、引き返しトランジションの t_5 の方を発火させて分岐部まで戻るといったネットである。また、 p_0 の避難者は、 t_1 の抑止により t_7 を発火させることとなり、この経路に侵入することなく、分岐点で上方の経路を進むこととなる。

本研究では、障害シナリオを組み込んだ避難訓練方式の推進と、そのシナリオの広範化支援を目的としている。3. では、この観点から、さらに建物倒壊による避

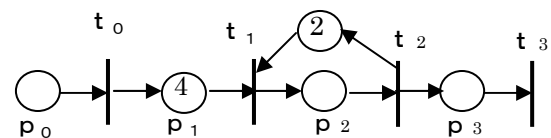


図-7(1) 容量付ネット

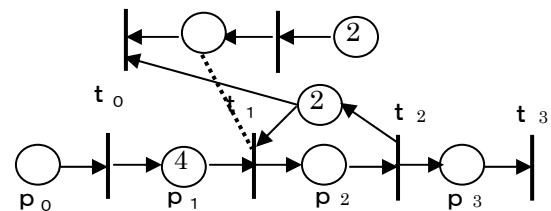


図-7(2) 容量削減ネット

難路の閉塞障害と、火災延焼による避難路の切断障害の相違点に踏み込んだ組み込み技術について検討する。

3. 地震時避難障害シナリオの組み込み技法

(1) 建物倒壊による経路閉塞障害のネット構成

市街地の避難経路には比較的狭隘な道路が含まれる。即ち、同時に通過できる人数が制約されるという容量の問題がある。この問題は、建物内避難シミュレーションではより切実的なもので、実空間との対応性を考慮したペトリネット表現法を示した¹¹⁾。市街地避難シミュレーションでは、より広範囲な空間とより多数の避難者を対象とするために、避難者を世帯単位で、その存在プレースを道路区間とするといった記述のマクロ化を行う。経路容量を導入した経路移動部のネット化は、図-7(1)に示すような構成となる。

このネット図で、プレース $p_0 \sim p_3$ 、およびトランジション $t_0 \sim t_3$ が、上で用いてきた経路移動部の基

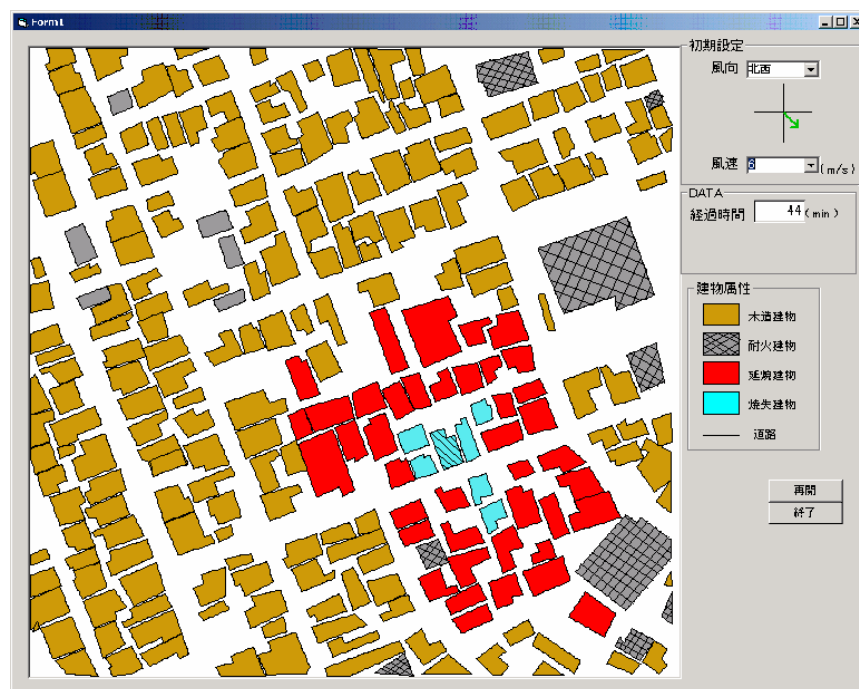


図-8 ポリゴン型火災延焼シミュレータ

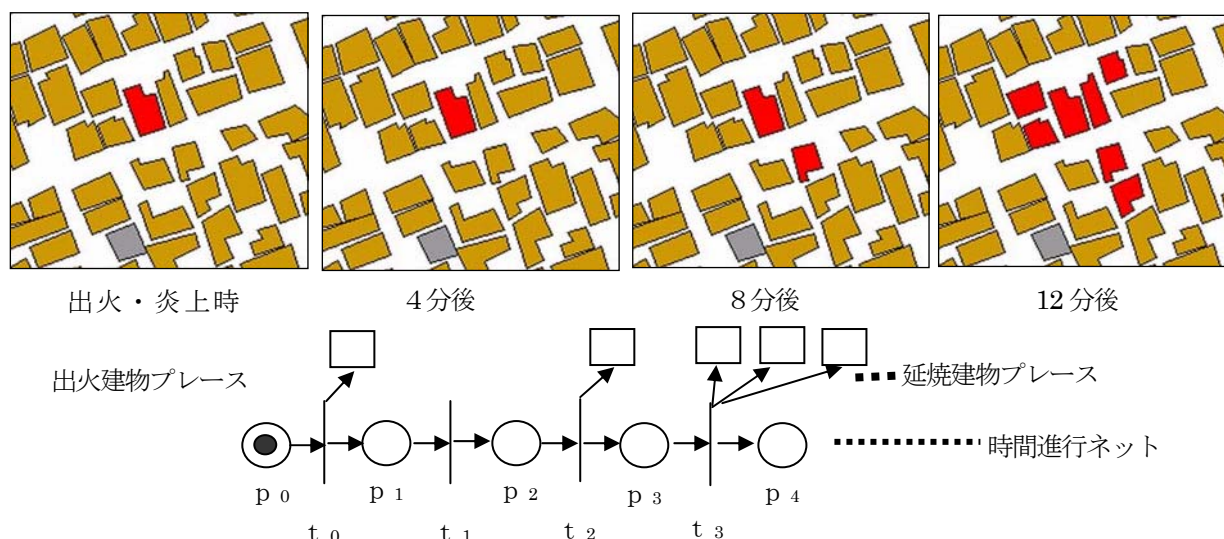


図-9 火災延焼シナリオの組み込みネット

本ペトリネット部である。そこに容量制約を表現するためのプレース p_4 を結合したネットとなっている。この例では、 p_0 と p_1 と p_3 には容量制約はなく、プレース p_2 の区間のみ容量制約3が作用するペトリネットとなっている。

このネットの挙動は、前出のトランジションの発火則1)と2)を適用することで容易に確認されるだろう。まず、 t_0 や t_2 や t_3 の発火の条件は、 p_0 や p_2 や p_3 にトークンがあるかどうかのみであり、発火毎に出力プレースのトークン数が無条件に1増える。例えば、 t_0 はこの条件の下で発火し、その結果 p_1 のトークン数は5に増大する。一方、 t_1 の発火条件は、 p_1 に加えて p_4 にもトークンがあることを求めるネット構成となっている。

図-7(1)の状況下での t_1 の発火は、最大で2回であり、それで p_4 のトークン数は0に、 p_2 のトークン数は3となる。そして、 t_2 が発火し、 p_4 へトークンが戻るままでは、これ以上の発火は起きないことも分かるだろう。つまり、この状態では、これ以上の避難者のこの区間への侵入は出来ない。換言すれば、 p_2 のトークン数がこの経路区間にいる避難者の実数で、 p_4 のトークン数がこの経路区間の余裕容量を表し、 p_2 のトークン数と p_4 のトークン数の和が、この経路区間の制約容量を表していることとなる。

この容量制約ネットは、図-1に示した④の避難場所部の記述においても重要となる。即ち、避難場所入口の開口部の取り扱いと、避難者が集中する周辺経路で顕現化する容量制約の組み入れに必要となる技法でもある。

さて、このような容量制約が働く比較的狭隘な経路沿道での建物倒壊では、閉塞までには至らないとしても、さらなる容量低減による避難阻害¹²⁾が発生する。図-6では、閉塞阻害による引き返しシナリオのペトリネット化を示したが、図-7(2)では、容量低減による避難阻

害シナリオの組み入れへの展開法を示す。

このネットは、図-7(1)の容量制約ネットに、建物倒壊による容量低減部を追加する形で構成されている。即ち、プレース p_5 への配置トークン数が低減量を示すもので、 t_4 の発火により、 t_1 を一時的に抑止し、 p_4 に設定されている容量トークンを、 t_3 の発火によって消滅させることで、実効容量に変更するというネットである。当然、低減量は、建物の倒壊レベルによって異なる。また、その結果の混雑による移動速度の低下は、 p_4 に戻るトークンへのタイマの設定で可能となる。それらの想定は、2.(2)で述べたように、S data ファイル上で容易に行うことができるものである。

(2) 火災延焼による避難阻害のネット構成

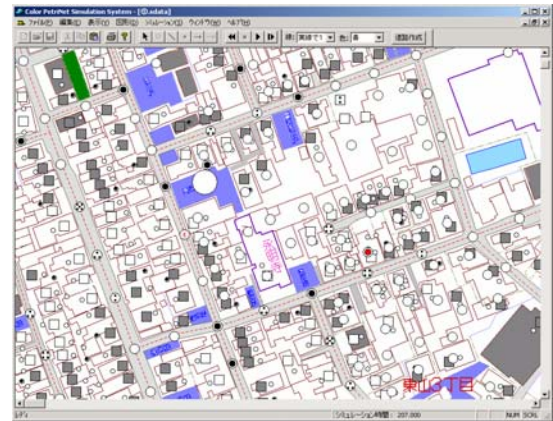
火災延焼による避難阻害では、上述の建物倒壊に伴う避難阻害が地点固定的であるのに対して、阻害地点が延焼の拡大に伴って変化し、しかも、その変化が発生時の気象条件、特に、風向・風速により大きく異なる点に特徴がある。そのために、本研究では、著者らが開発してきた火災延焼シミュレーション^{13)~15)}との連携化の下で、これらの特徴点の反映化が可能となる組み入れ法を提案する。

著者らの火災延焼シミュレーションは、大火事例で検証されている延焼速度式と、風速をパラメータとする延焼限界距離式に基礎を置くもので、風方向に対して8方向の延焼速度式を定義し、風下の道路等の空地メッシュを挟む可燃メッシュへの延焼も考慮するメッシュ型のものである。この出力系を、建物等の形状に対応させるポリゴン型化したもの¹⁵⁾を使用する。

それは、4.で示すように、著者らのペトリネットシミュレータは、対象地域の建物等の形状が表示されている地図画像上で避難シナリオネットを構築し、視覚的なシミュレーション実行を可能とするものであり、この方式との整合性が火災延焼に伴う避難阻害シナリオの組



(1) 対象地域の背景画像上でのシナリオ想定例



(2) 背景画像上でのシナリオ・ネット構成例

図-10 対象地域の背景画像上でのシナリオ・ネット構成

み込みにも求められるためである。図-8に、このポリゴン型火災延焼シミュレーション・システムの画面例を示す。

図に示すように、出火点の設定(複数設定可)、風向・風速の設定(8方向)、および経過時間と建物属性区分(木造・耐火造：延焼・焼失)の表示機能を持つ。この事例では、北西の風、風速6 m/s、出火炎上後44分経過時の延焼動態を示すものである。中央の網掛け建物が出火場所で、その周辺の建物は焼失状態にある。そして、避難障害地点は、風下・風横側へも拡大していることが分かる。

火災延焼シミュレーション結果の避難ペトリネットへの組み込みは、図-9に示すように、時間進行のペトリネットを用意し、時間進行トランジションの出力ブレース(図中に□で示している)を、ポリゴン型シミュレーション画面との対応で設定するという手続きで行うことが可能となる。

まず、時間進行ネットの p_0 に初期トークンの配置を行い、そのタイマを出火時刻とする。このことは、建物倒壊が地震発生とほぼ同時であるのに対して、地震時出火が種々の原因で発生するため、出火時刻の早遅というシナリオへの対応のためである。即ち、出火・炎上時刻が経過すれば、 t_0 が発火し、出火建物ブレースにトークンが出力される。そのブレース番号が t_0 の出力ブレースとして設定される。

p_1 以降のブレースへのタイマ設定は、シミュレーションの進行時間間隔となる。図-9の上位に示す各時刻での炎上図をより、4分経過時では延焼拡大は起きていない。即ち、 t_1 の出力ブレースは時間進行の p_2 のみで設定は不要となる。8分経過時には風下への延焼が起きており、 t_2 の出力ブレースにそのブレース番号が設定される。このような設定が以後も続けられる。

この例のように、4分間隔の進行とすれば、1時間のシナリオでは15個のトランジションについてこのよ

うな作業を行うことで、その組み込みが可能となる。これらの作業は、全て、前述したように、S data ファイル上で可能であり、プログラム変更は全く必要でないことも付記して置きたい。

4. 避難シナリオシミュレーションの実行と考察

(1) 市街地避難計画のシナリオネットの構成

本研究では、避難計画による減災の達成には、避難障害要因を考慮した訓練が必要であり、その推進のために、地域住民による使用性、地域住民意見の反映性を目標に、避難シナリオシミュレーション技術の開発を試みている。この章では、避難シナリオシミュレーションの実行結果の提示を通して、障害要因の組み入れの有無が、どのような相違をもたらすのかを検討する機会提供面の考察を行う。

前述したように、著者らのペトリネットシミュレータでは、対象市街地地図を背景画像とし、その上でシミュレーションネットを構築し、実行する。まず、図-10(1)に、この章で対象地域とする金沢市東山区の背景画像を示す。

避難計画主体(自治体や自主防災組織等)は、この画像情報と、地域での体験情報を基に、図1に示した避難計画シナリオの各基本構成要素を検討し、想定案の提示を行う。

ここでは、まず、2箇所の指定避難場所(A：馬場小学校、B：子来町緑地)の位置と避難経路の想定、避難世帯の位置(■で表示)と基本避難方向(⇒で表示)の想定が読み取れる。次に、地震時障害シナリオの検討として、①障害なしを検討基礎とし、②火災の発生(図中のF1とF2の位置)と、③建物倒壊による容量逡減(図中のCの位置)の想定を取り上げる。

これらの想定ネットは、上述のように、2.(2)を基礎知識として、2.(3)や3.(1)、(2)の基本部のネット化技術を基に、諸部分のネットを構成し、それらを結

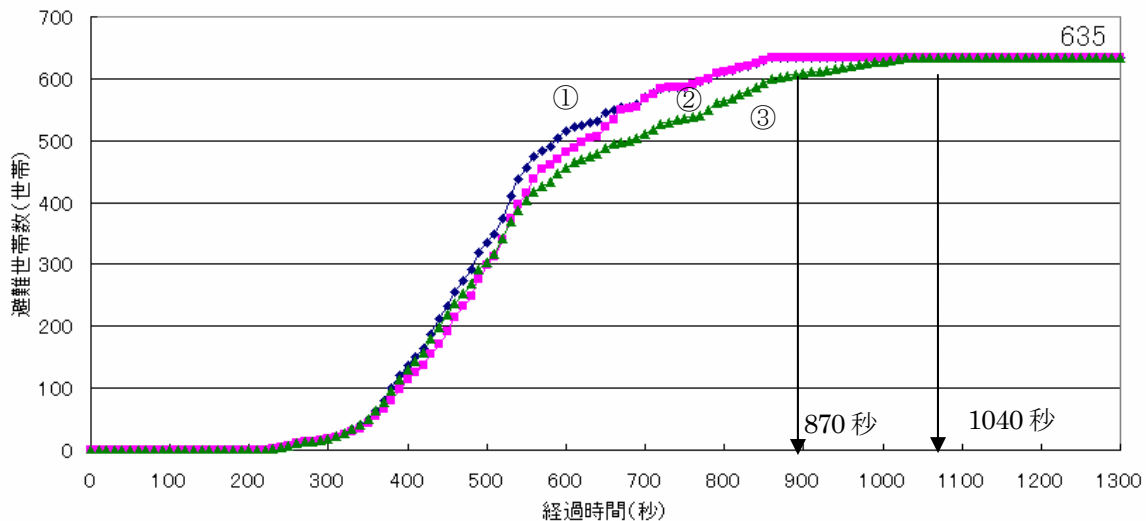


図-11 避難場所 A（馬場小学校）の避難世帯数の推移

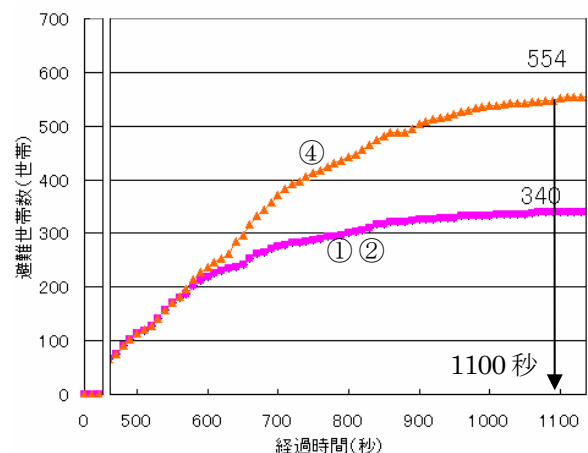
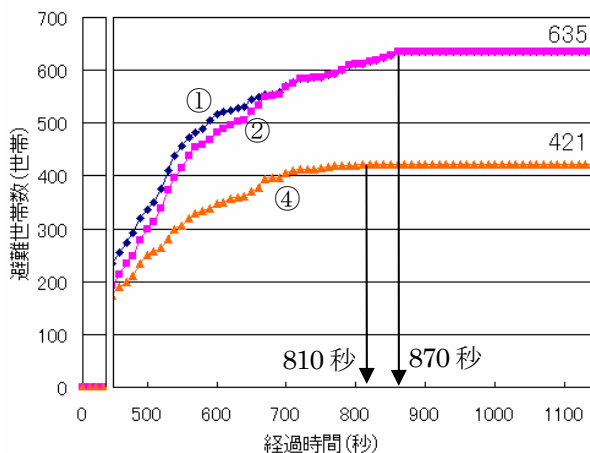


図-12(1) 避難場所 A（馬場小学校）の避難世帯数の推移 図-12(2) 避難場所 B（子来町緑地）の避難世帯数の推移

合化させる形で構築されて行くことになる。

図 - 10 (2) に構築シミュレーションネットの一部のクローズアップ図を示す。これは、視覚シミュレーション出力のために、避難者の存在に係わるプレースのみを表示し、他のプレースとトランジションの全てを非表示とするモードによるネット図である。このモード機能には、他のプレースやトランジションを含む細部表示のモードもあり、非表示モードでの視覚的確認・理解・異見提示への対応を、この細部モードでの確認・修正・拡張化への対応を可能とするものとなっている。

(2) シナリオ・シミュレーションの実行結果と考察

ここでは、紙面の制約上、各シナリオでの避難完了世帯数（対象総世帯数 975）の推移結果による考察を行う。図-11 に、避難場所：A（馬場小学校）への避難完了世帯数の推移図を示す。ここでの各避難シナリオは、以下のようなものである。

まず、グラフ①は、阻害の想定なしの時の避難完了者数の推移図である。Aへの計画避難世帯総数は 635 で、地震発生 180 秒後に一斉に避難を開始するとしている。全世帯の避難完了時間は 840 秒となった。

次に、グラフ②では、火災発生を図 - 10 中の F 1 の 1 箇所とし、北西の風、風速 6 m/s とし、地震発生と同時に火災・炎上したとしている。避難完了時間は、阻害なしと同じ 840 秒となった。これは、一つには、火災発生位置は避難場所：A に向かう沿道ではあるが、風向が北西のために、背景画像から分かるように、避難路への影響が少ない方向への延焼拡大となること、いま一つには、引き返しの迂回経路があったという幸運によるといえよう。グラフ②で、450～650 秒時点でグラフ①の完了世帯数を下回っているのは、この引き返しの迂回世帯の遅延によるものである。

最後のグラフ③では、図 - 10 中の C 地点での建物倒壊による容量通減阻害のみを想定している。ここでは、避難完了時間は 1020 秒となり、火災阻害による 840 秒よりも 180 秒遅いという一見以外な結果となった。この阻害想定では、容量 23 という経路区間で、その容量が建物倒壊に伴って 4 に激減するとするものである。この阻害型の記述ネットについては、3. (1) の図-7(2)に示したが、そこでは、容量減少による混雑の影響の組み入れはなされていない。例えば、このネットで p

4 への容量トークンの戻りに際して、何らかのタイマを設定するといった工夫で組み込めば、より大きな阻害となるだろう。しかも、地震規模によっては、この型の阻害は多くの地点で発生すると考えなければならない。この型の阻害シナリオによる避難訓練の必要性は、これらのことから十分に理解されるだろう。

上での議論では、火災延焼による避難阻害は大きくは出ていないが、風向や出火点が変われば、様相は一変するだろう。ここでは、出火件数を2件とし、前出のF1に加えて、F2地点でも同時出火・炎上火災が発生したという想定での結果を示す。

図-12(1)に避難場所：A(馬場小学校)への避難完了世帯数の推移を、図-12(2)に避難場所：B(子来町緑地)への避難完了世帯数の推移を示す。いずれの図にも前出のグラフ①(阻害の想定なし)と、グラフ②(F1での出火)を合せて示してある。

注目点は、避難完了世帯の総数で、避難場所：Aでは、出火件数が2のケースでは595となり、出火件数が1の635より40世帯減少し、避難場所：Bでは、逆に、340より40世帯の増加となることである。

この結果は、追加した火災の出火地点、F2は、図-10(1)の背景画像で確認できるように、避難場所：AとBの中間地帯居住世帯の避難時集中経路を扼する位置にあり、40世帯がこの火災延焼による避難阻害を受けて、避難場所の変更を行ったことを示している。避難完了時間は、避難場所：Aでは、先のシナリオよりも少し短くなり、避難場所：Bでは、少し長くなるといった程度に留まっているが、地震時の火災が、同時・多発型であることを考えれば、火災阻害と複数の避難場所の想定シナリオでの避難訓練の必要性の理解を促す結果だろう。

ここで加えた避難場所：B(子来町緑地)は、その地名が示すように、公園課の所轄地域であり、防災計画書での指定避難場所ではない。従って、道路沿道に指示標識は出されていない。また、少し高地にあり、入口部は、かなりの傾斜道路となっており、380世帯の収容性や、高齢者の避難性等、検討課題の明確化の議論機会の提供にも寄与しようと考えている。

5. あとがき

本研究では、地震時災害の減災化のための予防計画として、避難訓練の充実化と主体的取り組みの推進支援を目的に、ペトリネットシミュレータによる地震時市街地避難シナリオのシミュレーション技術の開発を試みた。具体的には、地震時市街地避難シナリオの基本構成図を基に、まず、それらの基本部分ネットの構成法を示し、ペトリネットの特徴である要素と形式の共通性、駆動原理の汎用性から生まれるネットの拡張性、ネット間の結

合性を活用することで、修正・精緻化・拡張化に容易に対応できる方式であることを示した。そして、各ネットの記述内容は、簡単・明瞭なトランジションの発火則の適用で、トークンの動きとして、手動でかつ視覚的に確認・検討することができるとし、住民等に意見や提案を促し、主体的な取り組みを推進する支援ツールとしての基盤具備性を述べた。

次に、阻害要因として、建物倒壊と火災延焼を取り上げ、それぞれの阻害シナリオの組み入れ技術を示した。まず、前者では、経路容量の導入と、建物倒壊によるその低減化ネットでの対応を提案した。一方、後者では、建物倒壊による阻害が地点固定的であるのに対して、延焼の進行と共に阻害地点が拡大化し、それが出火時の気象条件に左右されること等を考慮する必要があるとして、火災延焼シミュレーション・システムとの連携化による対応を提案した。

最後に、対象地域の地図画像上で、地震時避難シナリオのシミュレーションネット構築を行ない、避難訓練への阻害要因組み入れの必要性を示すデモンストレーションを行った。具体的には、①従前の阻害なし想定を基盤に、②火災1箇所、③建物倒壊1箇所、④火災2箇所の想定シナリオのシミュレーションによる避難完了世帯数の推移グラフを示し、まず、①と②と③での避難完了時間の比較で、直観ないしは常識的な予想とは異なり、①=②<③という意外な結果となったことを示した。そして、このケースでは、想定風向は対象地域の冬期夕刻の卓越風の北西風であり、背景画像上で阻害の想定地点、対象地域の構成条件を検討すれば、単に幸運なケースに過ぎないことが容易に学べるだろうし、より厳しい阻害シナリオの検討の必要性も納得させられるだろうとした。④の考察では、火災延焼阻害によって、避難世帯による避難先の変更が起きたことを具体的に示し、地震時火災の同時多発性を考えるとき、複数の避難場所想定的重要性の理解に繋がるだろうとした。そして、ここでも、地域の背景画像上での構成と実行性が、指定避難場所以外の避難場所想定と、その吟味に重要な役割を果たすとした。

残された課題はいくつもあるが、当面の課題としては、まず、建物倒壊による阻害ネットの実事例レベルへの改良・精緻化と、阻害発生地点の分布化シミュレーションの実行を挙げたい。論文中でも述べたように、容量低減による混雑化は、市街地道路においても速度低下等を引き起こす。この組み込み工夫を検討したいと思っている。次に、本研究では、避難単位を世帯とした。これは、暗々裏に自助シナリオを想定したものであり、高齢・独居世帯に対しては互助・公助のシナリオが不可欠である。この面でのペトリネット表現化に取り組みたいと思っている。

また、本研究では、理解性・体感性・即時対応性等を本支援システムの特徴としてきたが、市民レベルや自主防災組織レベルでの実証はまだ為されていない。この面での実験的研究も大きな課題と考えている。

最後に、本研究は、科学研究費補助金・基盤研究（C）を受けて、一部実施されたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 中央防災会議：災害被害を軽減する国民運動の推進に関する基本方針，2006.4.21
- 2) 中央防災会議：平成 18 年度総合防災訓練大綱，2006.4
- 3) 目黒公則，芳賀保則，山崎文雄，片山恒雄：バーチャルリアリティの避難行動シミュレータへの応用，土木学会論文集，No.556/I-38，197 - 207，1997.4.
- 4) 山崎文雄編：「社会基盤システムの実時間制御技術」9 章 災害時の避難行動空間モデルの構築，科学研究費特定領域研究成果報告書，2000.3
- 5) 近田康夫，廣瀬智士，城戸隆良：CAを用いた歩行シミュレーションモデルの構築，土木情報システム論文集，Vol.9，19-30，2000.10.
- 6) 中西英之，小泉智史，石黒浩，石田亨：市民参加による避難シミュレーションに向けて，人口知能学会論文集，18 巻 6 号 a，643-648，2003.
- 7) 木俣昇，高木秀彰，黒川浩嗣：ペトリネットによる交通流シミュレーションシステムの開発，土木計画学研究・論文集，No.12，691-699，1995.9
- 8) 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.9，31-40，2000.10.
- 9) 木俣昇，中村彰彦：交通流ペトリネットシミュレータによる背景画像上でのデータベース化に関する基礎的研究，土木計画学研究・論文集，No.21，51-62，2004.9
- 10) 木俣昇，曾根岳志：ペトリネットによる背景画像上での建物内避難シナリオのシミュレーション研究，土木計画学研究・論文集，No.22，53-64，2005.10
- 11) 木俣昇編：背景画像上でのペトリネットシミュレーション構築法による地震防災計画の動的支援研究，科学研究費・基盤研究（C）成果報告書，2006.3
- 12) 家田仁，宇治田和，望月拓郎，小川逸作：街路閉塞の予測および危険度評価手法の東京市街地への適用，第 3 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，501 - 504，1998.10
- 13) 木俣昇：大震時避難計画のためのメッシュ型火災延焼シミュレーション・システムに関する検証，J O R S J，Vol.30，No.1，59-86，1987.
- 14) 木俣昇，二神透：防災緑地網整備計画のための火災延焼シミュレーション・システムの開発，土木学会論文集，No.449/IV-17，193-202，1992.
- 15) 二神透，木俣昇，末廣文一：火災延焼シミュレータを用いた防火樹木整備支援システムの開発，土木計画学研究・論文集，No.23，no.2，325-334，2006.9

地震時市街地避難計画のシナリオシミュレーション技術に関する基礎的研究*

木俣 昇**・寺西伸太郎・***二神 透****

本研究では、地震時災害の減災化には、避難訓練の充実化、自主的推進が重要になるとし、そのための支援システムとして、背景画像上でのペトリネットシミュレーション技法の開発を試みている。具体的には、市街地避難シナリオの基本構成部のペトリネットの構築と、地震時に避難阻害要因となる建物倒壊と火災延焼のシナリオ化のペトリネットの開発を行い、対象地域でのシミュレーション結果の比較を通して、この支援システムによる諸シナリオの組み込み性、および自主組織による諸提案の促進とその組み入れ性を明らかにしている。

Study on Scenario Simulator for Evacuation Planning in Urban Area at Earthquake*

By Noboru KIMATA **・Shintaro TERANISHI ***Toru FUTAGAMI****

In this paper, we proposed a scenario simulation system for evacuation planning in urban areas at earthquake based on Petri-net simulator. Firstly, we construct fundamental Petri-net models to describe four parts of evacuation scenario at earthquake and show they are easily refined, expanded by connecting Petri-net components, based on both commonness of them and driving rules of nets. Secondly, we construct obstruction nets brought by fall down of buildings and by fire spreading. Finally, we demonstrate several scenario simulations, and discuss necessity of evacuation drills imbedded obstructions coursed by quake.