

ペトリネットシミュレーションによる地震時火災避難計画シナリオの検討支援*

Study on Evacuation Planning Scenario under Fire Spreading at Earthquake by Petri-net Simulation*

寺西伸太郎**・作田夕香**・木俣昇***・二神透****

By shintaro TERANISHI**・yuka SAKUTA**・noboru KIMATA***・toru FUTAGAMI****

1. はじめに

防災計画書の策定に際して行われる地震時被害想定において、わが国では、どの地域においても火災被害が大きく取り挙げられる。実際、阪神淡路大震災でも火災発生が見られ、気象条件次第では、更なる被害拡大化リスクも想像される事態であった。避難計画には、この火災被害の減災対策という役割が期待されるが、現状は、校区単位での指定避難場所の設定と、そこへの避難訓練に留まっており、地震時火災リスクの自覚と、それに向けての取り組みが課題といえよう。

著者らは、ペトリネットと火災延焼シミュレーションとの連携化によるこの課題への取り組みを行ってきている¹⁾。本研究では、避難計画が自主防災組織による自主的取組みに委ねられていることを踏まえて、避難シミュレーションネットの構成法の改良と、沿道建物倒壊による避難阻害ネットの改良を行い、建物倒壊被害下での避難訓練シナリオシミュレーションの実施による路上滞留避難者数と火災接触リスクの推移図を示し、避難計画の地震時火災対応化への取り組みについて考察する。

2. 市街地避難計画シナリオのペトリネットシミュレーションのシステム整備

(1) 避難計画シナリオのペトリネット表現法概説

まず、図-1に地震時避難計画シナリオの基本構成を示す。図-2は、この構成図の避難開始部の基本ペトリネット図を示したもので、プレース(○)とトランジション(|)とアーク(→ または ...)よりなるグラフ状の表現形式で、プレース上のトークン(●)によって現状態が示される。ペトリネットでは、このトークンをトランジションの発火則によって駆動させることに

*キーワード：防災計画、計画手法論、システム分析、

**学生員、金沢大学大学院自然科学研究科

***正員、工博、金沢大学大学院自然科学研究科

(石川県金沢市角間町、

TEL076-234-4914、FAX076-234-4915)

***正員、学博 愛媛大学 総合情報メディアセンター

(松山市文京町3 TEL089-927-49837)

よって状態推移のシミュレートがなされる。即ち、 p_0 のトークンとして表示されている避難者ないしは世帯は、 p_1 (避難指示)にトークンが配置されれば、 t_0 の発火によって、避難路上の p_3 に出て(●の移動)、さらに、 t_2 の発火によって p_4 へと移動することになる。

著者らは、図-1の構成区分に沿って、このような避難計画シナリオの基本サブネットを開発してきている。それらの一覧を、表-1に示す^{1),2)}

図-3は、経路の交差部での合流と分岐を表現したネット図である。このネットは、表-1の経路移動部のサブネット2つと、分岐部ネットの結合化によって構成されている。ペトリネットの最大の特徴は、ネットの共通構造性とトランジションの発火則の共有性にあり、ネットの結合化により、対象空間に対応した拡張化や、シナリオに沿った精緻化が容易に行うことが出来き、しかも、プログラムの変更なしに、即時に実行可能であるというユーザーフレンドリー性にある。次項では、このネットを例に、E x c e l形式でのサブネットの管理とその編集によるシミュレーションネットの、よりユーザーフレンドリーな構成手順を示す。

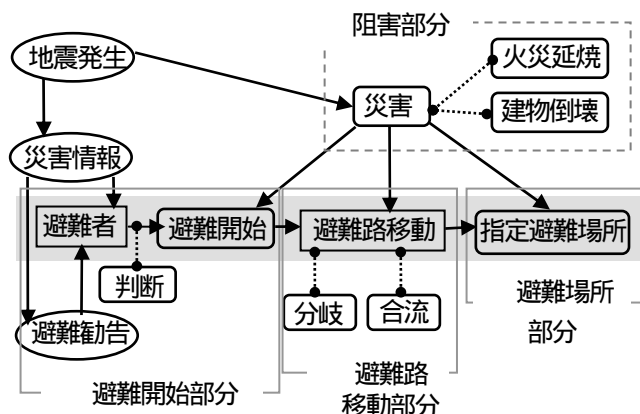


図1 地震時避難計画シナリオの基本構成

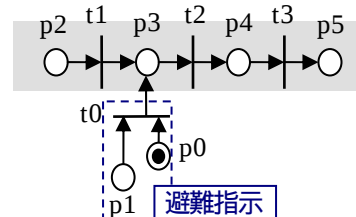


図2 避難開始部分ネット(基本)

(2) 整備サブネットのExcel管理と活用方式

図-2や図-3に示したペトリネットは、それらの全ての構成要素とそれらの関係の記述化、即ち、そのシステム構造データであるSdataによって、完全に表記することができる。図-4に、図-3のSdataを示す。

視覚型シミュレーションは、これを基に実行される。本研究では、ユーザーフレンドリー性をさらに高めるために、このSdataを、図-5に示すExcel形式(一部省略)で管理し、実行時には、コピー・ペーストで図-4に示したテキスト形式にする方式を提案する。

この方式は、ペトリネットの特長である結合化による拡張性、精緻化性を、Excelの諸機能を活用する形で、より実践的なものにするアイデアともなる。前出の図-3の構成法を事例に、その概要を説明する。

まず、図-3において、で示した主経路の移動部のSdataを作成する。図-5のPLACEとTRANのコメント欄に“メイン”とされた部分でそれぞれであるが、これらの作成は、最初の数行を用意し、コピーし、必要な避難路長分まで貼り付ける形で行える。次に、図-3の副経路部の追加を行う。図-5でサブと書かれた部分がそれで、同様の手順で追加することが出来る。その時、TRANのコメント欄に、合流・分岐への係わりを記入しておく。最後に、表-1の分岐部の判断ネットを組み込む。

これは、まず、サブネットのSdataとして整備されているものをコピーし、挿入し(図-5のの枠部)、次に、コメント欄を参照して、プレースの“カラー種類”、トランジションの“入出力”関係の設定をし(図中の網掛け・手動入力部)、さらに、トランジションのコメント欄の“生成”を手懸りに(この例ではトランジション7が生成で、カラー3と4を生成)、図-5のgeneratranZの設定を行い、完了することになる。

シミュレーション実行には、図-3のテキスト形式のSdataが必要となる。Excel形式のSdataは、上述のような拡張・編集作業の便と、コピー・ペーストによるテキスト形式への移行の便のために、まず、図-3の各項目を横に並べ、さらに、各項目間の区切り記号(end, -2, -1)を、次の項目の先頭に置くという工夫をしている。

表-1 避難シナリオのサブネット一覧

大分類	サブネット	説明
開始部	開始基本形	避難指示
	情報判断部	認知・判断
	情報伝達部	自主組織単位
移動部	経路基本形	経路移動
	経路合流形	合流
	分岐部	分岐判断
	引き返し部	経路引き返し
障害部	容量制約形	狭隘経路
	建物倒壊形	切断・引き返し
	火災延焼形	切断・引き返し
	容量削減形	建物倒壊
避難場所	入場口部	移動・容量制約
	滞留部	容量制約

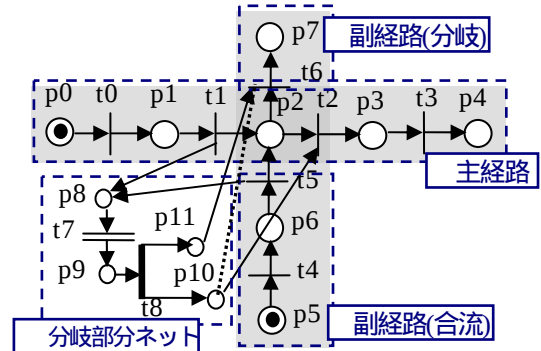


図3 経路移動部分ネット(分岐・合流)

```

ファイル(E) 編集(E) 書式(O) 表示(V) ヘルプ(H)
PLACE 12
-1 20 -1 1 //P0 メイン
-1 20 -1 1 //P1 メイン
-1 20 -1 1 //P2 メイン
-1 20 -1 1 //P3 メイン
-1 20 -1 1 //P4 メイン
-1 20 -1 1 //P5 メイン
-1 20 -1 1 //P6 サブ
-1 20 -1 1 //P7 サブ
-1 -1 -1 1 //P8 分岐
-1 -1 0 1 //P9
6 -1 -1 3 1 //P10 分岐先
-1 -1 4 1 //P11 分岐先
end
TRAN 9
0 -1 1 -1 0 1 //T0 メイン
1 -1 2 8 -1 0 1 //T1 交差入
2 10 -1 3 -1 0 1 //T2 交差出
3 1 4 1 0 1 //T3 合流
end
generatranZ 1
7 3 50 4 50

```

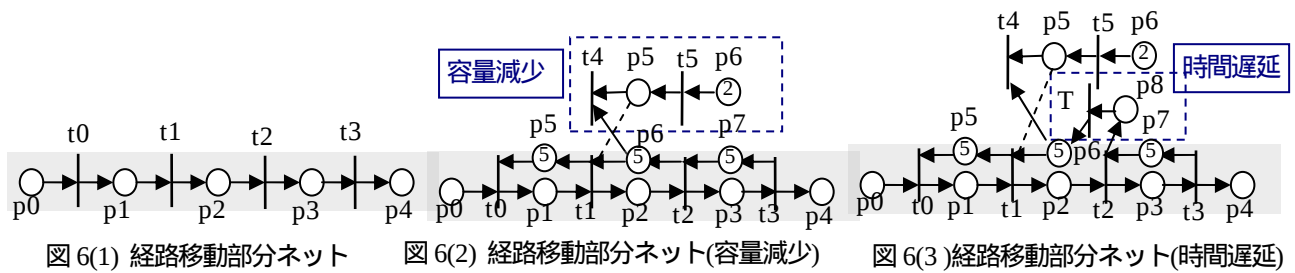
図4 経路移動部分ネットSdata

図4 経路多重化部分ネット-Suda

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
1	PLACE	経数										TRAN	経数									TOKEN	経数											
2	禁止T番号	-1	タイマ	カラー	種類	表示	表示色	//	P番号	コメント		入力P番号	-1	出力P番号	-1	種類	表示	//	T番号	コメント			P番号	タイマ	発生P番号	平均発生	初期発生時刻	発生T番号	発生カラー番号	発生確率				
3																																		
4												end										end	TOKEN	100	GENE									
5	PLACE	12										TRAN	9																					
6		-1	20	-1	1			//P	0	メイン		0	-1	1	-1	0	1	//T	0	メイン														
7		-1	20	-1	1			//P	1	メイン		1	-1	2	8	-1	0	1	//T	1	横													
8		-1	20	-1	1			//P	2	メイン		2	10	-1	3	-1	0	1	//T	2	横													
9		-1	20	-1	1			//P	3	メイン		3	-1	4	-1	0	1	//T	3	横														
10		-1	20	-1	1			//P	4	メイン		4	-1	5	-1	0	1	//T	4	横														
11		-1	20	-1	1			//P	5	サブ		5	-1	6	-1	0	1	//T	5	合流														
12		-1	20	-1	1			//P	6	サブ		6	-1	7	-1	0	1	//T	6	分岐														
13		-1	20	-1	1			//P	7	サブ		7	-1	8	-1	0	1	//T	7	分岐														
14		-1	-1	-1	1			//P	8	分岐		8	-1	9	-1	1	1	//T	8	分岐														
15		-1	-1	0	1			//P	9	分岐		9	-1	10	11	-1	2	1	//T	9	分岐													
16		6	-1	-1	3	1		//P	10	分岐先																								
17		-1	-1	4	1			//P	11	分岐先																								

主経路
副経路(合流)
副経路(分岐)
分岐部分ネット
手動入力

図5 経路移動部分ネットSdata(Excel形式)



この方式の採用によって、避難場所への避難経路移動部ネットの構成は、対象地域の地図を背景画像として、避難場所の特定化と、経路の抽出により、比較的容易にかつシステムテックに行うことができる。その上で、避難者の住居部、避難情報の伝達部のネットを結合化することで、対象地域の避難シナリオの基本シミュレーションネットが出来上がることになる。

図 - 1 は、さらに、これに種々の地震時災害による阻害の組み入れが望ましいとしている。表 - 1 には、沿道建物倒壊に伴う阻害、火災延焼に伴う阻害部ネットの開発を示してある。後者については、前論文¹⁾で、火災延焼シミュレータとの連携下でのペトリネット表現を提案し、引き返しネットについても述べた。次章では、まず、前者について再検討を行なった上で、種々の避難シナリオ想定の下でのシミュレーションを試みる。

3. 地震時市街地火災避難計画シナリオの検討支援

(1) 地震時火災避難シナリオのシミュレーションネットの構成

地震時には、多くの建物倒壊が当然予想される。耐震補強が進んでいない状況では、避難時の阻害要因として、この反映化が不可欠となる。著者らは、表 - 1 に示したように、阻害要因に関しては、建物倒壊と火災延焼による避難路の切断や、避難路の狭隘性と建物倒壊によるさらなる狭隘化のサブネットを開発してきている。

図- 6 (1) は、避難路移動部の基本ネットである。図- 6 (2) は、これに容量想定を付加し、その容量が、建物倒壊により削減化するネットへの拡張化を示したものである。即ち、基本ネットの上段にブレース群を置き、そこにトークンを初期配置することで、その経路区間の同時移動人数ないしは世帯数を定め、さらに、沿道建物倒壊による削減化ネットを上部に追加し、ブレース 6 への配置トークン分、容量低下が起きるネットとなっている。

それに対して、図- 6 (3) は、容量低下による狭隘化には、その区間の移動速度の低下が伴うとするネットとなっている。当該経路への避難者の集中度にもよるが、このことでより厳しい滞留状況が起きることとなる。

比較シナリオシミュレーションネットの構成は、対象地域は前論文と同じく、図- 7 の背景画像（部分）に示



図 7 シナリオシミュレーションの構成図

す金沢市東山地区とし、図中に示す指定避難場所（馬場小学校）周辺道路での避難者の滞留性と、その火災延焼接触リスクの検討を行う。

まず、阻害なしの想定下での各自の居住地より指定避難場所への移動という従来の訓練型を、避難シナリオ A とし、そのシミュレーションネットを構成する。このネットの構成作業は、2. (2) で述べた方式の活用で、相当軽減される。

次に、図- 7 に示すように、複数の地点での建物倒壊による阻害の想定下での移動を、避難シナリオ B とし、先の容量を付加したネットに、容量低下のサブネットを結合化する形で、そのシミュレーションネットを構成する。そして、両シミュレーションを実施し、図- 7 に示すような計測ポイントにおける避難者の滞留数の推移グラフの作成を行うこととする。

(2) シナリオシミュレーションの実行と考察

まず、地震時火災の想定を行い、前論文と同じ火災延焼シミュレーションシステムを使用し、計測ポイントへの接近性を調べる。

地震時火災の特徴は、同時多発性にある。また、火災の発生時期の多様性にもある。即ち、地震発生と同時のケースもあれば、数時間後のケースもありうる。阪神淡路大震災では、電気系統の復旧作業時のショートによる火災が報告されている。

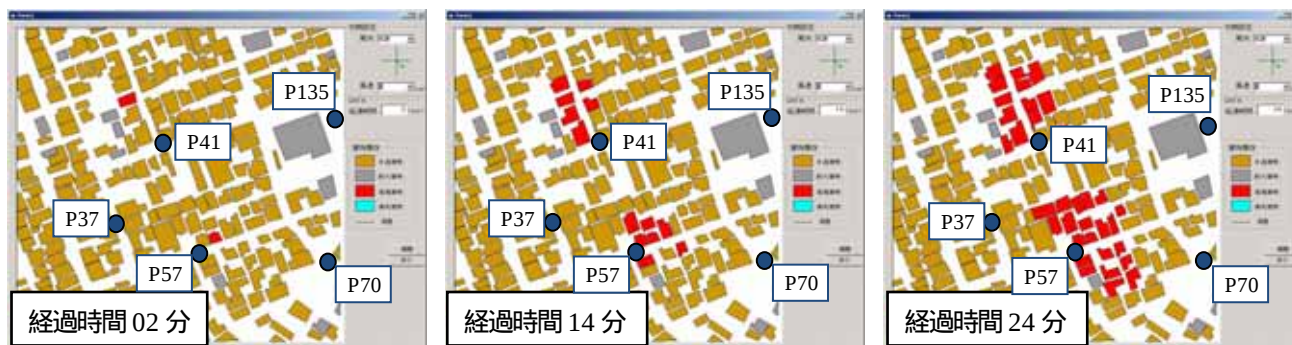


図8 火災延焼のシミュレーション結果

もう一点は、気象条件で、延焼速度も延焼方向も大きく異なることである。本研究で使用するシミュレーションシステムは、風速と市街地条件をパラメータとする延焼速度式をベースとするメッシュ型のシステム³⁾をベースとして、その出力を建物単位で表示する形式⁴⁾のである。図-8に、図-7に示した2箇所での同時出火のケースの延焼動態図を示す。

風向は北西で、風速が6 (m/s) の想定ケース事例である。これらは、金沢市における冬季(昼間)の卓越風による想定となっている。延焼シミュレーションは、2分間隔で進行する。火災発生は地震直後とし、120秒後に同時炎上状態となるとし、ここには3つの時点での延焼状態を示してある。

一方、図-9は、前述した2つの避難シナリオのシミュレーションシによる経路滞留避難者数の推移計測結果の一部を示したものである。避難開始は、地震発生から120秒後で、避難者は情報なしでの避難である。図中の左方に、計測ポイント区間での滞留避難者数座標を取り、図中の右方に、上述の2箇所からの火災延焼地点との距離と、計測区間の火災接触距離座標を配している。

避難シミュレーションケースA、即ち、避難者が居住地から指定避難場所へ全く障害を受けずに避難・移動とするとすれば、計測ポイント区間41では、地震発生後300~400秒後に通行避難者数がピークとなり、700秒後には0となるが、沿道建物倒壊による避難路の狭隘化が発生し、避難障害を受けるシミュレーションケースBでは、地震発生後200秒後から計測ポイント区間47で避難者の滞留が始まり、300~1100秒の間で渋滞が生じるといった結果となっている。

これに対して、計測ポイント区間の風上地区で発生した火災からの延焼が拡大し、接近し、900秒後にこの区間に接触し、この区間との接触距離が増大していく。このケースでは、接触時の滞留避難者は23世帯で、この区間との接触距離が30mのときにも10世帯となっている。これらのことは、地震時火災に対する避難計画の重要性を十分に示唆するものであるだろう。

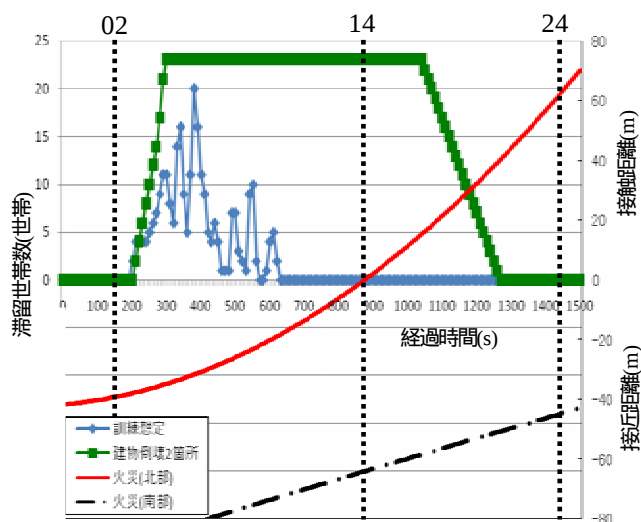


図9 経路P41の滞留世帯数推移と火災接近距離

4. あとがき

本研究では、地震時火災に対する取り組みの遅れに対して、その必要性を明確にし、自覚的取り組みを促す第一歩であり、課題も多いが、今後もシステム改善に取り組みたいと考えている。

参考文献

- 1) 木俣昇, 他: 地震時市街地避難計画シナリオシミュレーション技術に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, NO. 24 (登載決定), 2007.11
- 2) 木俣昇, 他: 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時防災計画の動的支援研究, 平成16・17年度科学研究費・基盤研究C成果報告書, 2006.3
- 3) 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の開発, JORSJ, Vol.30. No.1, 59~86. 1987.
- 4) 二神透, 木俣昇, 他: 火災延焼シミュレータを用いた防災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