

消防防災システムの阻害要因のペトリネットシミュレーション に関する基礎的研究

Study on Petri-net Simulation System of Hazard Factors against Fire Prevention Systems

木俣 昇*, 鷺見 育男**

By Noboru KIMATA, Ikuo SUMI

1. はじめに

今般の阪神大地震では、消防防災システムが全くの機能不全に陥った。このことを受けて、消防防災システムの検討が、地震時防災システムの見直しの重要な柱となってきている。

地震時の消防防災システムも通常時の消防防災システムが基礎となる。それは、常に維持され、訓練され、問題点の改善がなされて初めて機能するのが防災システムであるからである。

地震時には通常時とは異なる阻害要因が多数発生する。見直しのポイントは、それらの阻害要因を意識化し、評価するとともに、阻害要因への対策を発想し、評価するという探索を繰り返すことにある。それには、阻害要因をいかにして陽表的に、かつ動的に表現するかが課題となる。

本論文では、著者らが交通流のミクロシミュレーションに導入したペトリネット手法を、この課題にも適用することを試みる。

具体的には、まず、阻害要因を制約型と切断型に分け、そのペトリネット表現法を提示する。次に、それらを組み入れた消防防災システムのマクロな見直しネットを提示し、基本的な分析シミュレーションを行う。また、このマクロネットのパラメーターを規定するミクロな阻害要因評価の例として、緊急車両の一般車交通による走行阻害のネットモデルとそのシミュレーション例について述べる。

2. 消防防災システムの見直しの基本フレーム

(1) 通常時消防防災システムの計画と阻害要因

図-1に消防防災システムの見直しの基本フレーム

キーワード：防災計画、計画手法論、システム分析

*正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科

(〒920 金沢市小立野 2-40-20 TEL 0762-34-4914 FAX 0762-34-4915)

**学生会員 金沢大学大学院 工学研究科 土木建設工学専攻(同上)

ムを示す。まず、通常時システムでは、火災の発生の認知に始まり、その通報を受け、出動指令が発せられることになる。この指令を受けて緊急車両が現場へと出動し、消火活動を行うという手順となる。

これらの処理及び活動のために、消防基地の配置、諸施設の整備、人員の確保が計画的に行われることになる。この計画では、出動中の緊急車の走行阻害が大きな問題となる。道路の狭索性、一般車交通が阻害要因例である。自動車社会の今日、特に後者については、明確に阻害要因として意識化し、分析しておくことが肝要となる。

(2) 地震時消防防災システムの計画と阻害要因

地震時には、図-1の(a)の対象災害系を拡大化して考えることになる。まず、地震による1次災害が発生する。これが消防防災システムの全てのサブシステムに種々の阻害を与えることになる。図-1では、この部分を(c)の阻害要因系としてブラックボックス化している。ここの具体的な表現化が見直しのポイントとなるという意図による。

次に、火災について言えば、地震時の場合には同時多発火災となる。このことが、認知・通報系の混乱の中で指令系の活動の阻害要因となるということも十分に意識化しておく必要があるといえよう。

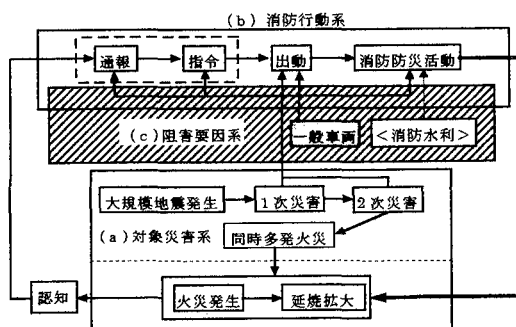


図-1 消防防災システムの見直しの基本フレーム

3. ペトリネットによる阻害要因の動的表現法

(1) ペトリネットによる動的表現法の基本形

ペトリネットは離散系の手法で、現象を事象と状態によって捉える。事象はトランジションと呼ばれる“|”で表され、状態はプレースと呼ばれ“○”で表され、状態の成立しているプレースにはトークンと呼ばれる“●”がマーキングされる。トランジションとプレースとの関係はアークと呼ばれる“→”，あるいは抑止アークと呼ばれる“—○”により結合され、ネット図として表示される。トークンがこのネット図内を動くことで動的表現がなされる。このネット図の基本型を、図-2に示す。

この単純な構造的な部分が部分ネットの結合を可能とし、ペトリネットによる方法に拡張性、発想性を与えることになる。もう1つの特徴は、動的表現のための規則の単純性、共通性である。即ち、トークンの移動はトランジションの発火によってのみ起きる。そして、その発火のルールは、当該トランジションにおいて、

- ①全ての入力プレースにトークンがマーキングされ、かつ
- ②全ての抑止プレースにトークンがマーキングされていないとき

このときにのみ発火するというものである。

図-2でいえば、p0, p1にトークンがマーキングされていて、p2にはトークンがマーキングされていないとき、トランジションt0は発火し、トークンはp3に移動することになる。逆にいえば、p2にトークンがあれば、t0の発火は抑止されることになる。この抑止アークを利用して、阻害要因の表現を行うというのが著者らのアイディアである。

もう1つの基本表現法を図-3に示す。これは、条件によって生起する状態が異なる事象の表現法である。t0は生成トランジションと呼ばれ、指定された確率でカラートークンを生成する。そうして生成されたp1のカラートークンの色によってt1は出力

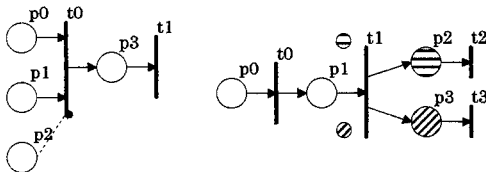


図-2 基本ネットモデル

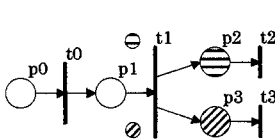


図-3 条件分岐のネットモデル

プレースを選択する。即ち、p1のトークンの色によって、p2あるいはp3にトークンを出力する。これによって確率的事象の表現が可能となる。以下、この2つのネットを利用する。

(2) 阻害要因の基本ペトリネットモデル

阻害要因には、ある一定時間活動を制約するタイプと、長期的に活動が阻害され、阻害要因を解除しないかぎり阻害が継続するタイプの2つが存在する。ここでは、前者を“制約型阻害”，後者を“切断型阻害”と呼ぶことにする。

まず、図-4は制約型阻害のペトリネット表現法を示している。例として通信網の混線、交通混雑、路上散乱物等が挙げられる。この図では、p0にトークンがマーキングされると、t0が発火し、その結果、p1, p3にトークンがマーキングされる。p1を活動中を表すプレースとすれば、それと同時にp3の阻害要因からの抑止が働き、次の活動の開始を意味するt1の生起が遅延される。遅延される時間は、阻害の程度により異なる値を、p3のトークンにプレースタイムとして与えることになる。

次に図-5に切断型阻害のペトリネットモデルを示す。例として通信網の破壊、消防署の通報を受けるシステムの破損、通行路破損、沿道構造物の倒壊、水利施設の破壊が挙げられる。制約型阻害とは異なり、1次災害による阻害要因の発生と同時に抑止がかかる。即ち、t0, t1という活動系列とは別に、t2の発火によって阻害状態(p4)となる。p4のトークンには、今度はタイマを与えないことにすれば、いつまでも抑止が働き、活動が阻害されることになる。

(3) 結合性による基本モデルの拡張化

図-6は、図-3で説明した条件分岐のネットモデルを制約型阻害要因の発生に適用し、図-4のネットモデルを複雑化したものである。即ち、阻害状態を表すp8へのトークンのマーキングは、t0の生

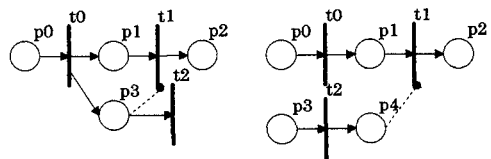


図-4 制約型阻害のネットモデル

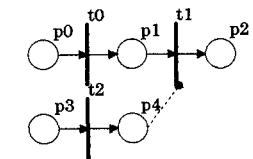


図-5 切断型阻害のネットモデル

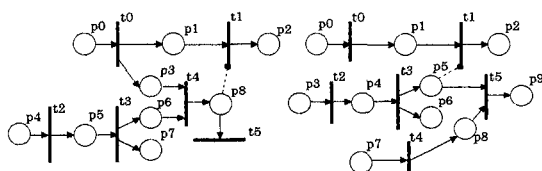


図-6 制約型阻害ネットの拡張モデル

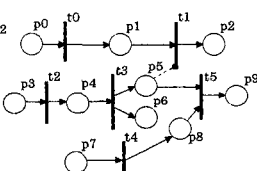


図-7 切断型阻害ネットの拡張モデル

起による p3 へのマーキングと、災害規模に応じて選択される p6 へのマーキングとが必要となるモデルになっている。

同様に、図-7では、切断型阻害の基本ネット図を拡張化したものである。ここでは、阻害状態 (p5) のマーキングに選択性を導入するとともに、その阻害状態の解除 (t5 の発火) のために p7, t4, p8 からなる復旧プロセスを組み入れている。復旧作業は、阻害の程度に応じて p8 のトークンにプレースタイマを設定することで表現できる。ここでも、p5 のトークンにはタイマを与えていない。従って、p8 のトークンのタイマが切れると t5 が発火し、p5 のトークンは p9 に移動し、抑止が解除されることになる。

このように、結合性を活用することによって、発見された阻害要因やその対策をネットに組み入れるという拡張性、操作性にこの方法論の特徴がある。

4. 消防防災システムのペトリネット・シミュレーション事例と考察

(1) 消防防災システムの基本ペトリネットとシミュレーション事例

図-8は、図-1の基本フレームを上述の基本モデルを基にペトリネット化した1例である。このネット図は、(a)の対象災害系の火災延焼ネット(発生、延焼)と、(b)の消防行動系(通報、指令、出動、消防防災活動)、および(c)の阻害要因系(一般車阻害、通報阻害、橋梁破損、路上散乱物、路上倒壊物)をマクロに捉えた概念モデルである。火災延焼のネットでは、出火当該家屋の風下・風上・風横の3方向への延焼の可能性を、トランジション t1, t2, t3 で表している。それらの入力プレースには、風速を考慮した出火当該家屋 (20×20 m) からの延焼時間を、プレースタイマとして設定する。表-1に、風速 2~3 m/s の場合と風速 10~12m/s の場合のこのプレースタイマ値を示す。

火災の通報をうけて緊急車両が出動するのに通常

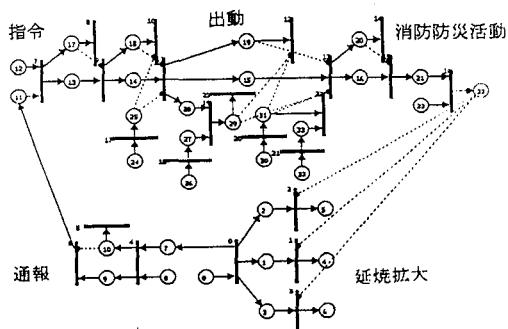


図-8 消防防災システムのマクロペトリネットモデル

時は 30 秒かかるとされる。p11 には、この 30 秒を想定する。p13, p14, p15, p16 は、緊急車両の区間走行を表し、区間距離に応じたプレースタイマを設定する。いま、消防署から火災現場への走行距離を 3 km とし、それぞれの区間長を 0.7, 0.3, 1.5, 0.5km とする。また、p14 の区間には橋梁があり、p16 は木造家屋密集地帯とし、それぞれ切断型、制約型阻害のネットを結合している。さらに、各区間には一般車による制約型阻害要因が働くとし、抑止プレース p17~p20 を設けている。これらのプレースタイマは交通量によって想定することになる。

p21 は、緊急車両が現場に到着し、消火準備をしている状態を表している。この準備に要する時間はヒアリングにより 60 秒としている。p22 は、水利施設の存在を表し、水利施設が存在していればトークンがマーキングされることになる。ここにも阻害要因が考えられるが、ここでは省略している。p23 は、消防防災活動の状態を表し、火災延焼までに緊急車両が到着し、消防防災活動が開始されれば火災延焼が阻止されるとして、火災ネットに抑止アークを伸ばしている。

シミュレーションは、通常時の早朝・深夜、即ち一般車両がほとんど存在していないケース、1 区間のみ一般車両が混雑しているケース、一般車両のピーク時のケースについて行った。その結果を表-2 に示す。早朝・深夜時には、緊急車両は一般車両の影響をあまり受けず、現場に到着することができ、風速 10~20m のケースも延焼は阻止される。風速が大きくなり、一般車両数も多くなると、延焼を阻止できなくなる。通常時でも一般車両が緊急車両の走行に影響を与えていることが考察できる。

地震時のシミュレーション事例としては、一般車

交通による障害の他に、通報障害と路上散乱物という制約型障害及び路上倒壊物という切断型障害の発生を想定したものを実施した。具体的には、p10, p29, および p33 にマーキングされるトークンに与えるプレースタイマを想定することになる。いま、それらが 30 秒, 540 秒, 600 秒と想定されたとすれば、この 1 火災現場に限れば、早朝・深夜の風速 2 ～ 3 m の時に風上の 1 方向への延焼のみが阻止でき、他のケースでは 3 方向共に延焼は拡大するという結果となった。

(2) 一般車両による緊急車両走行障害のマイクロペトリネットとシミュレーション事例

見直し作業は、図-8 のマクロシミュレーションをより精緻化し、各サブシステムでの障害要因を発見し、評価し、その対策を加えてさらに拡張化し、精緻化するという手順となる。その時、上述のシミュレーション例でも述べたように障害の程度に応じたプレースタイマの設定が重要となる。この項では、一般車による障害に関するプレースタイマ設定もまたマイクロなペトリネットモデルで行えることを示す。

図-9 は、図-8 の 1 区間をマイクロに見たモデルである。上部が一般車の走行を示すネット、下部が緊急車両の進行を示すネットである。この間に、一般車が緊急車両のサイレンを聞いて路肩へ退避するネットと、退避が完了するまで緊急車両の走行が抑止されるネットを組み込んでいる。

このモデルを片側 1 車線で距離は約 45m の区間

表-1 風速とプレースタイマ

	風速 (2 ～ 3 m)	風速 (10 ～ 12 m)
風下 (p1)	8 4 0 (sec)	4 6 0 (sec)
風上 (p 2)	1 1 4 0 (sec)	6 4 0 (sec)
風横 (p 3)	9 6 0 (sec)	5 1 0 (sec)

表-2 通常時シミュレーション結果

	風速 (2 ～ 3 m)	風速 (10 ～ 12 m)
早朝時	延焼阻止	延焼阻止
1 区間のみ混雑	延焼阻止	風下・横側へ延焼
ピーク時	延焼阻止	3 方向への延焼

表-3 緊急車両のマイクロシミュレーション結果

	一般車が存在しない場合	シミュレーション結果 (平均値)	シミュレーション結果 (最大値)
交通量 (10 台/hr)	4.20 (秒)	10.45 (秒)	14.71 (秒)
交通量 (20 台/hr)	4.20 (秒)	13.75 (秒)	25.36 (秒)

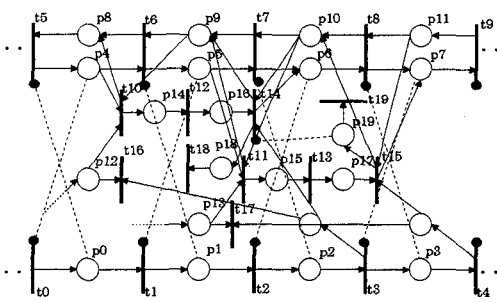


図-9 一般車両による緊急車両走行障害のマイクロペトリネットモデル

に適用し、緊急車両速度は 40km/hr とし、一般車交通量が 10 台/hr のときと、20 台/hr のときのシミュレーションを行い、阻害時間を求めてみた。

シミュレーションは、乱数初期値を変えて 5 回行った。表-3 にその結果を示す。交通量が 10 台/hr のときには、平均で 10.45 秒、最大で 14.71 秒、20 台/hr のときには、13.75 秒、25.36 秒となった。全長を 3 km とすれば、10 台/hr でも 10 分以上遅れるということになる。

緊急車両がある区間で 2 台走行するケースについてもシミュレーションを実施した。この間隔と一般車の退避・復帰行動時間によって、2 台目の走行に大きな差が出ることが分かった。

5. あとがき

本研究では、消防防災システムが被む種々の障害要因を、制約型と切断型に分類し、それらを抑止アークを利用して、ペトリネット表現化するとともに、システム全体のネット作成を試みた。かなり観念論的で実証性には欠けているが、その表現性、定量的、定性的分析性は、防災システムを見直す道具としては面白い点を多く持っていると感じている。研究は始まったばかりであり課題は多々ある。何よりも防災研究の専門家の人々、および現場の人々との協働による具体化が重要であると考えている。

参考文献

- 1) 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, pp, 691～699, 1995, 8
- 2) 日本火災学会: 火災便覧, p.523, 1984, 3