

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*

Development of Petri Net Simulation for Evacuation Scenario in Building on Its Background Image*

木俣 昇**, 曾根 岳志***

By Noboru KIMATA**, Takeshi Sone***

1. まえがき

避難計画の目的は、安全・確実な避難の達成にある。そのためには、避難計画を作成し、訓練を行い、施設整備と計画の点検と見直しが欠かせない¹⁾。避難計画に関する研究は、数多くなされている^{2)~8)}。大別すると、①既往災害の調査研究、②避難行動の実験研究、③コンピュータシミュレーション研究となる。いずれもが上述の目的への寄与を目指しているとはいえ、その直接的な支援性の意図は強くない。例えば、バーチャルリアリティの応用を介しての②から③への移行^{2),4),5)}では、訓練の支援性という意図が見られるが、③の研究^{3),6),7),8)}でも、多くは簡明な原理による避難行動の再現性という視点でのモデル化手法の開発に大きな関心が置かれている。

著者等は、支援性の意図・目的性をより鮮明にするために、「避難計画＝シナリオ」とする認識からの出発を提案する。シナリオとはある計画主体が作ったものであり、従ってそれには災害時にしばしば聞かれる“想定外の出来事”に類するものが不可避であり、この認識から出発すれば、誰の目にも、発災時に安全・確実な避難を達成するには、計画の常なる批判的・建設的検討が不可欠なことは明らかとなる。本論文では、この観点から著者等が開発してきたペトリネットシミュレータ^{9)~11)}に基礎を置く避難計画の支援システム研究について報告する。

まず、2.では、「シナリオとは事象連鎖の指示書である」として、ペトリネットによる事象連鎖記述の基本原理と特徴を述べ、避難シナリオの構成のための基本部分のネット構築を行う。また、コンピュータ上での実行性との関連で、著者等の開発シミュレータの基本機能を概説し、本支援システムによるシナリオ構成とその批判的・建設的検討の支援方式を論じる。次に、3.では、以上の準備の下で、具体的に、対象建物内の避難空間図を背景画像とし、その上で初期避難シナリオを構成し、このシナリオ記述のペトリネット構築とその即時視覚型

シミュレーションの実行性を示す。そして、背景画像が内蔵するわれわれの直観的・経験的な認識への作用性を活用して、この初期シナリオの批判的・建設的検討を行い、さらにペトリネットの特徴である結合性と即時視覚型シミュレーション実行性を活用して、その結果をシナリオに組み入れ、検討支援を続行することが可能となることを示すとともに、今後の課題整理を行う。

2. ペトリネットによる避難シナリオの基本表現法

(1) ペトリネットによる事象連鎖の記述法

ペトリネットは、図-1に示すように、トランジション・プレース・アークによって構成される一種のグラフ形式による対象系の視覚的な表現手法である^{12)~14)}。このネット例は、**t1** というトランジションで表現された事象の生起構造を記述したもので、まず、この事象の生起には、**p1**, **p2**, **p3** というプレースで表現された状態が関係し、それらの関係はアークで表現され、トランジション**t1**と“→”で関係づけられた**p1**と**p2**は、この事象生起の必要条件を意味し、**t1**の入力プレースと呼ばれる。一方、“.....”で関係づけられた**p3**は抑止プレースと呼ばれ、事象生起の阻害条件を意味する。次に、プレースの**p4**と**p5**は、この事象の生起後に出現する状態を意味し、出力プレースと呼ばれ、この関係も図に示すように“→”のアークで表現される。

ペトリネットの特徴の1つは、この静的な記述表現がそのまま動的記述表現に直結する点にある。図-2の(1)に示すように、まず、現時点での系の状態は、プレースへのトークン(●)のマーキングによって表現される。動的記述は、このトークンのマーキング状態の事象生起による遷移として表現される。この遷移を規定する規則が以下に示すトランジションの発火則：

- R1) 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、
- R2) 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、
- R3) 全ての入力プレースからトークンを一個ずつ消去し、
- R4) 全ての出力プレースにトークンを一個ずつ配置するのである。

図-2の(1)では、トランジション**t1**は、上記ルールの

*キーワード：防災計画、システム分析、計画情報

**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

(〒920-0942 金沢市小立野 2-40-20,
Tel.076-234-4914 Fax.076-234-4915)

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

***学生員、工学士、金沢大学大学院自然科学研究科
環境基盤工学専攻

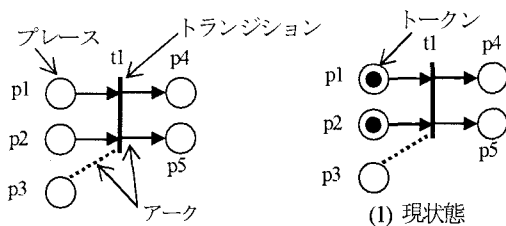


図-1 ペトリネットの基本形

R1)と R2)を満たしており、発火し、ルール R3)と R4)の適用によって、図-2 の(2)に推移することになる。この推移は、極めて単純・明かな発火則によるもので、誰にでも手動で容易に確認できる。しかも、トランジションが意味する具体的な事象内容に関係なく、全てに等しく適用されるものである。換言すれば、ペトリネット形式に準拠した記述化が出来れば、その動的視覚的シミュレーションが、直ちに実行可能となる汎用性と即時シミュレーション実行性を備えているといえよう。

さて、図-2 の(3)では、上記ルールの R1)は満たすが R2)を満たさず、従ってこの状態になれば事象の生起は起きない。1. では、シナリオとは事象連鎖の指示書であると述べた。そこで、この図-2 の(3)の状況の解消を含む事象連鎖の形成シナリオと、その動的記述性について次に説明することにする。

図-3 の(1)は、トランジション t_1 , t_2 , t_3 で記述される事象の連鎖によって、プレース p_7 によって記述されている状態達成を目的とするシナリオのペトリネット例である。まず、このネット図の実線で囲んだ部分は、前出の図-2 に示したネットである。その出力プレースを、点線で囲んだ部分ネットのトランジション t_2 と t_3 の入力プレースとすることで、2つの部分ネットが結合化され、3つの事象連鎖が形成されるとしている。この結合性は、それぞれの部分ネットが同じ形式・構造をもち、しかも全てのトランジションに同一の発火則が適用されるというペトリネット記述法の大きな特徴であり、支援システムとしての魅力点である。

この図にはもう1つ点鎖線で囲んだ部分ネットが結合されている。この部分ネットのトランジション t_4 は、図-2 の(3)に示した状態、即ち、シナリオの最初的事象 t_1 の生起を阻害する状態を解除する事象の導入を意味する。図-3 の(2)は、プレース p_8 へトークンを予め配置して置けば、 t_4 の発火条件が成立し、図-3 の(3)への推移がまず起き、 $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3$ という事象連鎖の推進が可能となるといったシナリオといえる。

図-2 の(3)状態への対処代替案としては、図-4 に示すものも考えられる。こちらは、問題のプレース p_3 へのトークンのマーキングの原因事象 t_4 を探り出し、その事前抑止策 t_5 を準備することによって、 t_4 の発火(生起)を阻止し、目的達成事象の連鎖を確保する策といえよう。

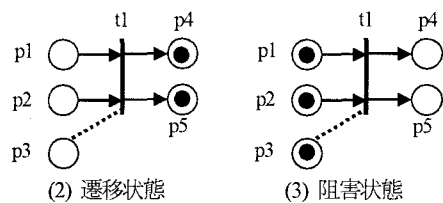


図-2 ペトリネットの駆動原理

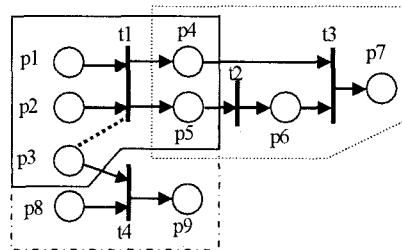


図-3(1) 事象連鎖のペトリネット

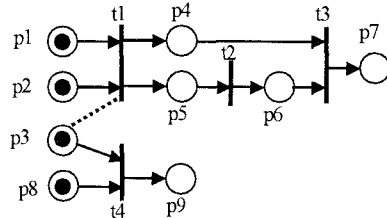


図-3(2) 同初期状態

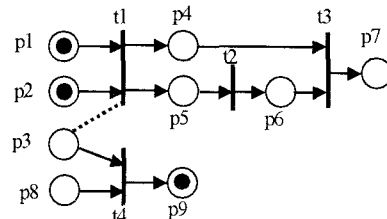


図-3(3) 同遷移状態

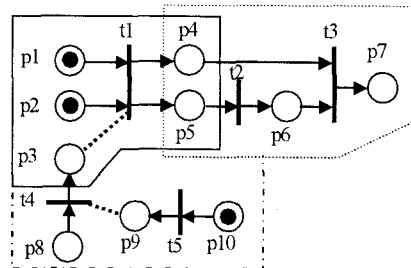


図-4 事象連鎖の代替案ネット

図-3 のネットでも、図-4 のネットでも、上述したような事象連鎖が可能となることは、トランジションの発火則、R1) ~ R4)を適用することで、誰にでも容易に確認することができるだろう。この容易性も批判的・建設的検討を支える重要な要件である。また、避難計画には、点検

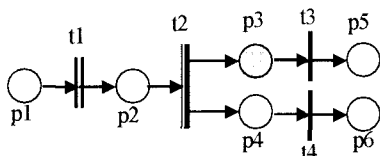


図-5 特殊トランジションの機能

による事前阻害対策の推進と発災時における阻害の解除という課題があり、上の議論は、この両面のシナリオにも対応できることを示すもので、この点でも有効といえるだろう。

最後に、ペトリネットによる事象連鎖の記述力を増大させるための特殊トランジションとその発火則について簡単に述べておく。図-5 に示すネット図は、特殊な生成トランジション t_1 と選択トランジション t_2 を含むもので、確率事象ないしは事象連鎖の分岐記述に使用される。即ち、生成トランジション t_1 の生起によって、その出力プレース p_2 にマーキングされるトークンにはカラー属性がランダムに付与される。選択トランジション t_2 は、その入力プレース p_2 上のトークンに付与されたカラー属性に従って出力プレースの p_3 または p_4 のいずれかにトークンを選択的にマーキングする働きをする。前出の発火則との関連でいえば、R4)にこの点が付加されることになる。

この生成トランジション t_1 と選択トランジション t_2 の組み合わせによって、 p_3 または p_4 状態が確率的に生起する事象や、あるいは、事象連鎖が $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_3$ と $t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_4$ に分岐する状況の記述も可能となる。この生成トランジションでの生成カラー属性数と、その生成確率は任意に指定できる。もちろん、選択トランジションの出力プレース数は指定した属性数に応じて設定する必要がある。また、トークンには、このカラー属性の他に時間属性(タイマ)を付与することもできる。これらの使用によって、ペトリネットは、理解の容易さと同時に多様な表現性にも応えられるものとなっている。

(2) 避難シナリオの基本部分ネットの作成

本研究では、建物内避難計画シナリオを事例としている。その基本枠組は、既存研究を参照すれば、図-6 に示すように、4つの基本要素、空間(S)、人(H)、設備(E)、リスク(R)との関連で想定されるだろう。ここでは、まず、これら基本要素との関連で避難シナリオの基本部分ネットの構成について述べる。

図-7の(1)は、最も単純な(S-H)型のネットとして、通路の歩行移動の基本部分ネットを示したものである。即ち、人は空間を占有する存在^{6),8)}であり、前方空間が空いているときのみに移動可能としたネットである。このネットではトークンが人に対応しており、その歩行速度に応じてタイマを設定することができる。このタイマ

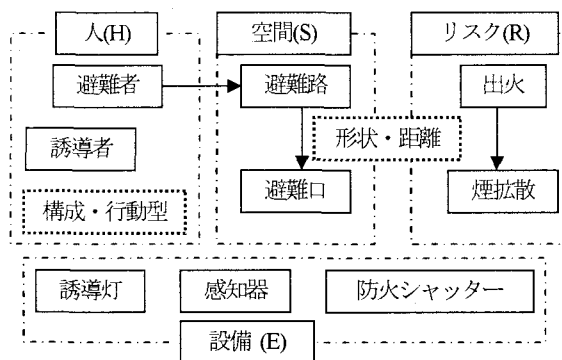


図-6 避難シナリオの基本枠組み

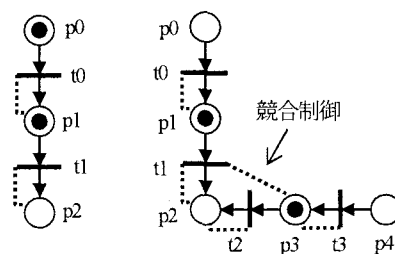


図-7(1) 歩行移動の基本部分ネット

図-7(2) 空間競合化の基本部分ネット

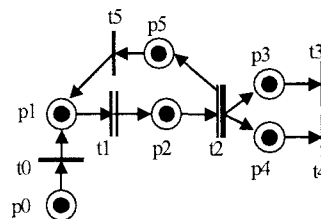
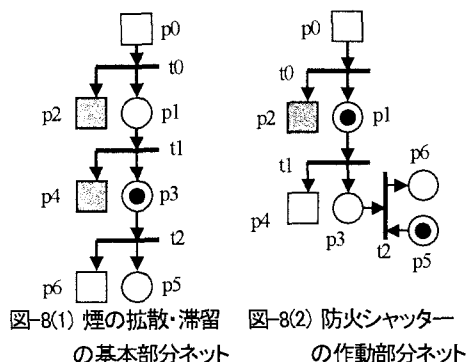


図-7(3) 判断の基本部分ネット

時間の経過後に各トランジションが発火し、トークンのマーキングが変化する形で人々の通路歩行移動が記述・表現されている。このネットでの動的状態推移も、前述のトランジションの発火則、R1)~R4)の適用で容易に確認できるだろう。図-7の(2)は、Sを少し拡張化し、同一空間へ別方向から移動してきた二人が、その占有を競合するケースのネットを示している。ここでは右方向の優先権を、抑止アークを用いて想定したものとなっている。この状況は、いわば整然とした避難ケースに当たるが、何らかの混乱の想定も、競合抑止を、図-5 で示した生成と選択トランジションを用いてランダム化したり、主体判断による相互作用化したりすることで可能となる。図-7の(3)は、この判断ネットの構成例を示したもので、 p_1 で判断するとし、生成トランジション t_1 で3つの状態、即ち、 p_3 =第一選択、 p_4 =第二選択、 p_5 =躊躇への出力カラーを生成し、前二者であれば t_3 あるいは t_4 で記述される行動をとり、躊躇状態になるともう一度 p_1 に戻り、判断を繰り返すとしている。競合は、相手側にも同様の判断ネットがあり、その結果との関連で記述さ



れることになる。

次に、(S-R)型の最も単純なネットに移る。建物内での避難は、主に煙のリスクからの避難であるとされる¹⁾。図-8の(1)は、通路での煙の拡散と滞留の基本部分ネットである。即ち、各トランジションの発火によって煙が前方空間へと拡散し、その空間を占める。煙の拡散速度は、○型プレース上のトークンに、水平拡散速度をタイマとして設定し、その結果としてのトランジションの発火連鎖で記述し、一方、煙の滞留は、□型プレースへの塗りつぶしマーキングで表現するネットとなっている。図-8の(2)は、煙の拡散と防火シャッターの作動の基本部分ネットで、(S-E-R)型のネットへの拡張化といえよう。即ち、t2を防火シャッターの作動事象として図-8の(1)の煙の拡散・滞留ネットに加え、その入力プレースを“開の状態(p5)”と“煙感知の状態(p3)”とし、出力プレースを“閉の状態(p6)”としたものである。このネットによって、煙の拡散によって防火シャッターがやがて作動し、閉の状態に推移することも容易に確認できるだろう。

最後に、これらの部分ネットを結合化することで、もう一段進んだ部分システムネットが構成される例を示す。図-9は、文献2)や4)でも使用されているT字路を持つ避難路のネット記述例である。このネットは、(1)でペトリネットの大きな特徴で魅力点とした結合性を利用して、図-7の歩行移動部の基本部分ネット(1)と、判断部の基本部分ネット(3)を基に、T字路を持つ避難路の部分システムネットとして構成したものである。即ち、人はp0→p1→p2と歩行してきて、T字部で、p3→p4と右の経路に進むか、p3→p6と右の経路に進むかの選択をする。ここに判断部ネットを結合化しているが、ここでは図-7(3)の躊躇部を省略し、p10ならば右に、p11ならば左にし、それぞれの方向に移動するt3とt6の入力プレースに加えることで、選択的移動を実現するネットとなっている。また、煙があれば(p12:煙無し、p13:煙有り)それと逆方向(このネットでは左)に進むという拡張化を行っており、その意味では(S-H-R)型の事例ともなっている。

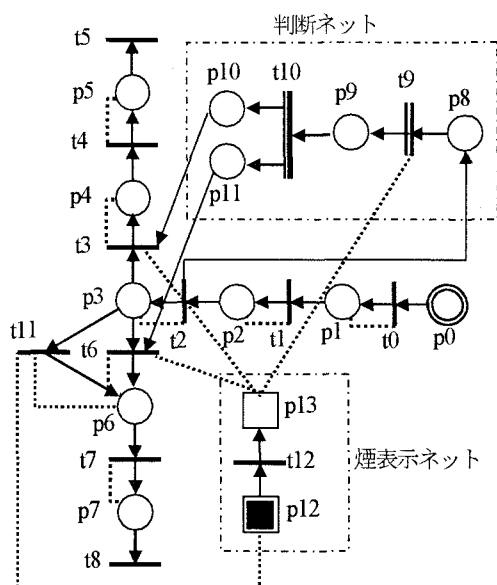
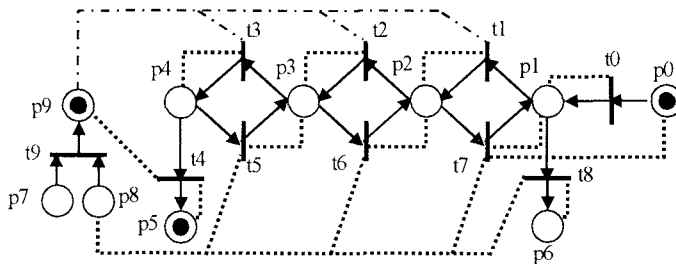


図-9 T字路を含む避難部分システムネット

避難行動実験²⁾では、右選択の方が多いという結果が報告されているが、その反映化は、判断部ネットの中の生成トランジションでの右左折カラーの生成比率の設定で行うことのできる。この点については、次節の(3)のSdataファイルの説明箇所でも再述する。

図-10は、防火シャッターの作動との関連で非常口に迂回する必要があるとし、歩行方向の反転も考慮した部分システムネット例で、図-7の(1)の歩行移動部ネットと(2)の競合部ネット、および図-8の(2)の防火シャッターの作動部ネットが結合化されたもので、図-6の基本要素を全て含む(S-H-E-R)型のネットとなっている。

避難者は、防火シャッターが開いていれば(p8)、p0→p1→p2→p3→p4と進み、p5を通過して避難する。しかし、閉じれば(p9)、非常口であるp6を通過して避難しなければならない。p4→p3→p2→p1という反転移動が必要となる。そのために、移動トランジションを2種類配置し、防火シャッターの状態(p8かp9)による抑止アーク(p8からは点線でp9からは一点破線で表示)を設定することで上述の反転が実現されるようにしている。また、空間p1では、この反転に伴い、p0からの移動者とp2からの反転者の間で占有競合が生じる。ここでも抑止アークを用い、p0からの移動に単純な優先性の想定をしたものとなっているが、この部分の工夫については既に述べている。図-9と図-10は、部分という文字が付いているがシステムネットであり、少し複雑化しているが、それでもこれらのネットの動作も、上述の発火則を適用することによる手動での動的確認が十分に可能だろう。



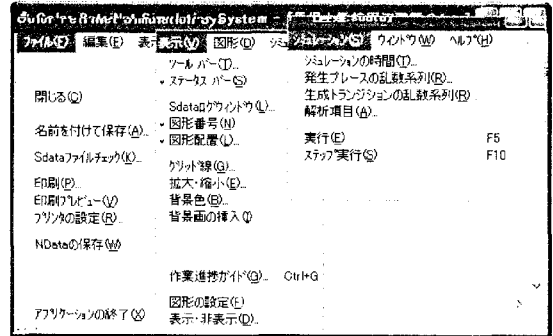
(3) ペトリネットシミュレータの実行環境

上では、ペトリネット表現の基本特徴を述べ、事象連鎖としてのシナリオ記述への適用性を示すとともに、避難シナリオの 4 つの基本要素との関連で、建物内避難の幾つかの基本部分ネットと、それらから構成される部分システムネットについて述べてきた。そこで示したネットは、いずれもトランジションの発火則を適用することで、手動でその動的挙動を視覚的に確認できることを示した。そして、この理解の容易さは、避難計画＝シナリオとして、そこでの想定を批判的・建設的に検討する支援システムとして重要な要件であるとした。

一方、現実規模の建物内避難シナリオの批判的・建設的に検討支援では、より大規模化し、複雑化するシステムネットの構築と駆動処理のためのコンピュータシステムが不可欠となる。著者らは、現時点で一般に広く利用可能な Windows 環境での実行ソフトウェアとしてペトリネットシミュレータを開発してきている¹¹⁾。この節では、このシミュレータに装備している諸メニューとの関連で、図9に示したT字路を持つ避難路の部分システムネットを具体例として、その実行手順について述べ、提案支援システムの諸特徴を実行面から考察する。

まず、図-11に本シミュレーションの基本メニュー画面を示す。コンピュータシミュレーションへの移行手順は、対象とするネットモデルを、このメニューに見られるく **Sdata ファイル**>で記述することから始まる。Sdata ファイルとは、表-1 に示すようなもので、対象ネットの全ての構成要素について、一定の形式でそれらの特定化を、整数値を用い、1行単位で記述したものである。詳細は参考文献 11)に譲るが、図-9 のネットと対応させて、表-1 でその基本事項を以下で述べる。

Sdata ファイルは、表-1 に示すように、PLACE・TRAN・TOKEN・GENE・gcreatranZ の記述部位からなり、各々は、これらの表記の後に総数を記した行から始まる。図-9 からこのネットには、p0～p13 のプレース群がふくまれており、その総数は 14 であり、表-1 は PLACE 14 という記載行から始まることになる。TOKEN を除く TRAN・GENE・gcreatranZ の部位の記載も、図-9 のネットとの関連で了解されるだろう。なお、プレースもトランジションもともに 0 から始まる連続番号が割り



振られる。

次に、表-1 に示す代表例を用いて、各部位での要素の特定化の書式を説明する。具体的には、各行の最後に /* 付きで記載されているコメント文を参照し、図-9 のネットと関連付けて説明する。プレースの特定化書式は、| 抑止トランジションリスト | - 1 | プレースタイマ | カラー | 表示・非表示 | からなる。第 1 例は、コメント文より T 字路の手前にあるプレース **p2** の特定化で、図-9 のネットより、このプレースが抑止しているトランジションは **t1** のみであるので、まず、その番号 1 が記載される。プレースタイマが 10124 となっているのは、前述した整数値のみ使用という制約から、小数点を持つタイマ使用時の表記形式によるもので、実際には、1.24 秒という設定で処理される。カラーの項の 0 は、継承を意味し、最後の 1 は、表示を意味する。ちなみに、非表示は 0 である。この機能の活用については、出力画面との関連で後述する。第 2 例は、判断ネットでの右方向カラーの出力プレース **p10** の特定化で、抑止トランジションはなく、タイマも無く (-1 で表記)、カラーは 1 (右方向カラー番号) で、0 の非表示の設定となっている。最後の例は、煙なしの表示の □ 型プレース **p12** の記載で、最後の表示・非表示項の表記形式が特殊な形となり、2 99 となる。また、この □ 型プレースは、常に表示扱いとなる。これも後で再述する。

トランジションの特定化書式は、 | 入力ブレースリスト | - 1 | 出力ブレースリスト | - 1 | トランジション種類 | 表示・非表示 | からなる。最初の例は、**t2** の記載で、その入力ブレースは **p2** の 1 個で、出力ブレースは

表-1 図-9 の Sdata

```

PLACE 14
-1 10124 0 1 /*0移動部分
0 -1 10124 0 1 /*1 〃
1 -1 10124 0 1 /*2 〃(手前手前)
2 -1 10124 0 1 /*3 〃
3 -1 10124 0 1 /*4 〃
4 -1 10124 0 1 /*5 〃
6 11 -1 10124 0 1 /*6 〃
7 -1 10124 0 1 /*7 〃
-1 -1 0 0 /*8片断ネット
-1 -1 0 0 /*9 〃
-1 -1 0 0 /*10 〃(右方向D)
-1 -1 0 0 /*11 〃(左方向D)
11 -1 10 0 0 /*12煙なし
3 6 9 -1 -1 0 2 99 /*13煙あり(右方向から)
end
TRAN 13
0 -1 1 -1 0 0 /*0移動部分
1 -1 2 -1 0 0 /*1 〃
2 -1 3 8 -1 0 0 /*2 〃(手前手前)
3 10 -1 4 -1 0 0 /*3 〃
4 -1 5 -1 0 0 /*4 〃
5 -1 6 -1 0 0 /*5 〃
3 11 -1 7 -1 0 0 /*6 〃
8 -1 7 -1 0 0 /*7 〃
7 -1 8 -1 0 0 /*8 〃
3 -1 9 -1 0 0 /*9 生成片
9 -1 10 11 -1 0 0 /*10 固定片
3 -1 6 -1 2 0 0 /*11 煙回避用T
12 -1 13 -1 0 0 /*12 煙なし⇒あり切替
end
TOKEN 100
12 60
7
GENE 1
10 5
1
generator 1
9 1 60 2 40

```

p3 と p8 の 2 個で，トランジション種類は一般 (0) である．一方，第 2 例は，生成トランジション 19 の記載で，トランジション種類は 1 となる．ちなみに，選択トランジションの場合は 2 で表記される．

TOKEN の部分には、初期条件としてトークンを配置するブレース番号とそのタイマとが記載される。TOKEN 100 とあるのは、他の書式とは異なり、使用される最大トークン数を意味する。この Sdata ファイルで 12_60 とされているのは、図-9 のネットの **p12**、即ち、“煙無し”の状態を初期条件とし、そこに設定されたタイマの 60 秒後に“煙有り”と想定したことになる。

GENE は、本論文では触れなかったが、トークンを指定された平均値を持つポアソン分布に従ってランダムに生成する特殊プレースの特定化の部位で、|プレース番号|タイム|からなる、図-9 のネットでは、 p_0 に 1 分間に平均 5 人の割合でランダムに到着した人が経路を歩行移動するとしており、0 5 という記載となっている。

geretransZ は、カラー属性付きのトークンを生成する生成トランジションの特定化の部位である。図-9 のネットでは、19 のみが該当する。この書式は、| トランジション番号 | カラー番号と生成比率リスト | で、ここでは、9 1 60 2 40 としている。カラー番号1はT字路での右方向選択カラーであり、2が左方向選択カラーとなっており、前述した実験的研究の結果の反映化は、この部分への記載で可能となるといえよう。

Sdata ファイルの作成は、ネット図が出来ていれば、初期条件やパラメータ設定を除き、このような書式による記載に必要な基本情報が揃い、比較的容易な作業といえよう。このような **Sdata** ファイルの作成ができれば、

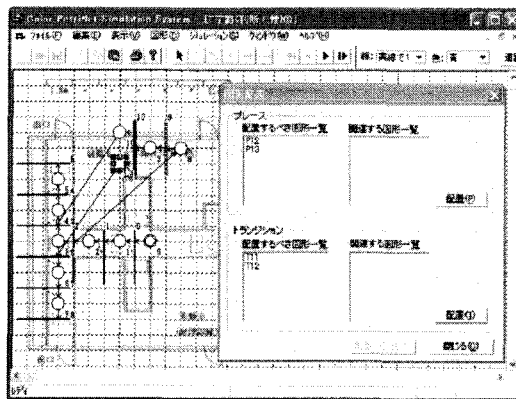


図-12(1) 要素配置の支援画面

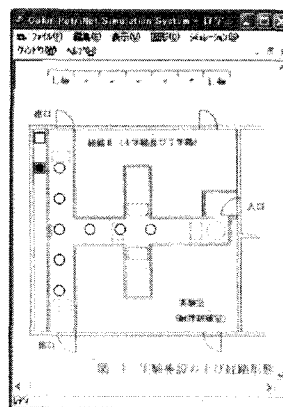


図-12(2) 空間対応化の T 字路ネット

それを実行ソフトウェアで開き、図-11 の諸メニューを活用し、視覚型シミュレーションシステムを構築して行くことになる。

われわれのソフトウェアの特徴は、親メニューの“図形”の中に用意されているサブメニューにある。即ち、
 <図形配置><グリッド線><背景画の挿入><表示・非表示>を活用することで、実空間対応の視覚型シミュレーション出力画面が容易に構築できる点にある。以下ではこれらのサブメニュー機能を中心に、出力画面の構築とその即時シミュレーション実行性について述べる。

図-12 の(1)は、＜背景画の挿入＞によってT字路を持つ避難路の実験空間図面²⁾を背景画像として挿入し、＜グリッド線＞を引き、＜図形配置＞のサブウィンドウに表示されてくる「要素リスト」からブレースとトランジションを順次選択し、出力ウィンドウ上に配置することで、図-9 のネット図が、そのままシミュレーションの出力画面として構築される様子を示している。この作業では、最も煩雑な要素間の関係を示す諸アークは、Sdataファイルの自動参照によって描画されるために、利用者が配置する必要はない。

図-12 の(2)は、この構築作業の完成後に<表示・非表示>を活用し、避難者の占める空間を意味するプレース

のみを表示とした出力画面である。この画面では、前述したように、□型プレースも表示されてくる。これらの表示位置が、図-9 のネットとは異っているが、それらが“右方向通路の煙の有無”に対応しており、構築画面上でネットの要素ないしは部分ネットをドラッグし、移動させることができることを利用し、そのことを視覚的にも分かり易くする工夫を行ったことによる。ネットの視覚的な煩雑性を処理するこのような機能によって、人の動きに焦点を当てた出力となり、直観的・経験的検討の容易さという特徴も実支援レベルで保持しているといえるだろう。また、疑問点が指摘されれば、逆の操作で、その細部表示に戻すことも、その部分をドラッグで移動させ、拡大することも可能で、モデル化レベルでの検討や、修正ないしは精緻化案の発想支援にも有効となるだろう。これらの操作については、シナリオとの関連で3.の(2)で具体的に論じる。

さらに、構築した視覚出力ネット図については、各要素の座標データが自動生成され、Ndata ファイルとして自動保存される。Sdata ファイル上での数値的変更による繰り返しシミュレーションは、Sdata ファイル名からNdata ファイルが参照されるために、視覚出力ネット図はそのまま引き継がれることになる。前述した Sdata ファイル作成時の初期条件やパラメータの設定課題も、この形式で検討することで解消されるだろう。

3. 背景画像上での避難シナリオのペトリネットシミュレーション実行

(1) 背景画像上での初期避難シナリオのシミュレーション実行

ここでは、2.の(3)で述べた実行ソフトウェアの緒機能を用い、実レベルでの建物内避難シナリオを対象に、シミュレーション構築とその即時実行支援に取り組む。まず、図-13 に、背景画像という形式で、ここで対象とする建物内避難シナリオ空間を示す。そして、この上で、図-6 に示した基本枠組み(S-H-E-E-R)に従い、要素を具体化することで、初期シナリオの設定を進めることにする。

図-13 の背景画像より、まず、避難口は、右端・中央・左下の3箇所となる。避難は、各室で開始され、扉前の通路を通り、いずれかの避難口に到達し、屋外へと避難する。この避難経路は、出火場所、煙の拡散方向、避難者の属性等と関係する。初期シナリオとしては、①避難者は各室の常時利用者のみとし、②出火場所を認知すれば、迷わずに予め決められている経路を使用し、避難口に向かうものと想定する。そこで、③出火場所として、図-13 で●で示した右端の教官室と想定し、④煙はそこから通路に水平拡散するとし、⑤図-13 の右端の避

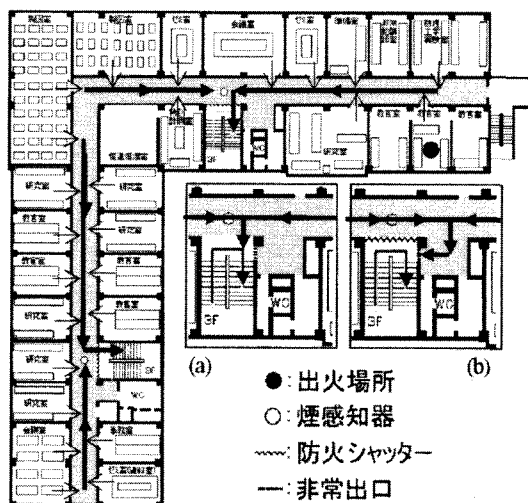


図-13 避難シナリオ空間の背景画像

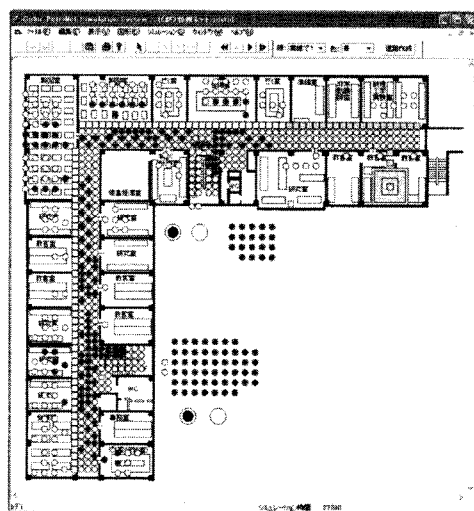


図-14(1) 初期シナリオのシミュレーション実行画面

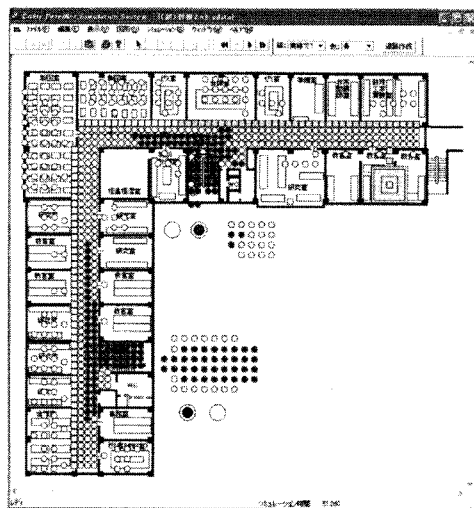


図-14(2) 初期シナリオのシミュレーション実行画面

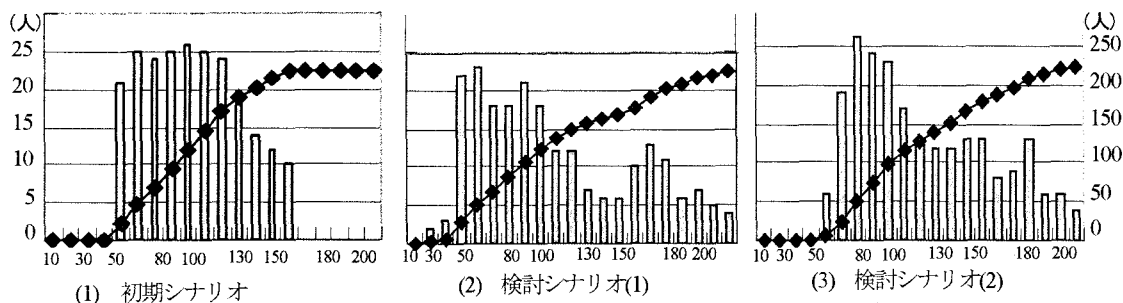


図-15 避難完了者数の推移グラフ

難口は使用できないとし、各部屋からの避難経路を、図中の矢線のように想定する。

図-13 の中の拡大図は、避難口の1つである階段部分のもので、ここには煙感知器により作動する防火シャッターが設置されており、この状態によって、拡大図(a)の経路での避難と、同(b)に示す横の非常口を使用した避難という想定が必要となることが分かる。また、3階からの避難者もこの階段を使用して避難することになり、その想定も必要となるといえる。

以上のような想定下での避難シナリオのペトリネットは、2. の (2) で述べた基本部分ネットや部分システムネットを基に構築することができる。ここでは、図-13 の実空間に対応させるための拡張化等について補足説明をしておく。

まず、2. の (2) では、通路を人1人の歩行空間としたネットであったが、図-13 の実空間はそれより広く、ここでは3人が並んで歩けるとし、当該空間が非占有状態であれば、斜前方や横空間へも進める形に拡張化し、使用する。また、図-13 の拡大図(b) に示した非常口は、人1人の通行が可能な広さで、そこに向かって手前広場では3方向からの占有競合があるとし、整然とした避難というシナリオの下で優先権を想定した歩行ネットを使用する。また、出火場所については、□型プレースを重ね合わせ、出火から炎上を経て、煙の拡散に至るという部分ネットを作成している。

図-14 の(1)は、このようにして構成したシステムネットを、2. の (3) で述べた手順で出力ネット画面として構築し、〈表示・非表示〉メニューで処理し、シミュレーション実行中の画面例である。具体的には、画面右下の数字より開始より27秒経過の時点のものであることが判る。画面の中の通路部に配置されている○型プレースが、それぞれ人1人が占める空間を示し、上述したように3列配置となっている。それらの上の●(トークン)が避難者の位置を示すものである。各部屋内では、在室者を示し、背景画像上で建物外となっている部分のものは、3階部分に居る避難者を示している。

煙の滞留は、通路部の上縁に沿って配置された□型プレースで模式的に示してある。また、建物外の部分に2

つ並んで配置されている2組の少し大きめの○型プレースは、防火シャッターの状態表示用のもので、いずれの組でも左プレースが“開”、右プレースが“閉”を示す。図-14 の(1)は、従って両方とも“開”の状態のもので、非常口を使用しない避難となっていることが、視覚的にも確認できるだろう。

一方、図-14 の(2)の方は、51秒後の画面で、出火場所に近い方の階段では既に“閉”となっており、非常口へ迂回しての避難が行われていること、それが煙の滞留の中でなされることになることが、視覚的に確認できるものとなっている。また、この時点で3階部分に避難者が3人いることもわかる。

図-15 の(1)は、このシナリオでの避難完了者数の時間的推移を、図-6 にある〈解析項目〉のメニューを使って求めたものである。50秒で21人が避難完了し、その後も25人程度の避難完了が続くが、120秒間からは減少する。これは、歩行速度は一定としており、防火シャッターの作動が、その原因となっているといえる。以上が初期シナリオとそのシミュレーションの実行結果である。次節では、初期シナリオの想定について、批判的・建設的な検討と、その結果のシミュレーションへの組み込み支援性について考察する。

(2) 避難シナリオの批判的・建設的検討支援シミュレーションの実行

上では、実規模レベルでの建物内避難シナリオの作成と、その視覚型シミュレーションの実行例を示した。この節では、そこで使用した初期シナリオを、図-6 に示した基本要素との関連でまず批判的に検討し、次にその結果としての提案を受け入れ、本シミュレータの特徴を活用し、提案を組み入れたシステムネットへの展開とその即時シミュレーション実行を試みることで、建設的な検討支援となりうることを示す。

まず、図-16 に、図-6 に示した基本要素との関連で、上述の初期シナリオの批判的検討視点を示す。概略すれば、①避難空間と設備の健全性を前提に、②人とリスクの想定を行い、避難シナリオを描いたもので、①の前提に対しては、点検による保証で一応は了解することがで

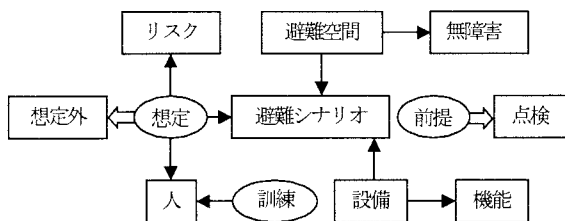


図-16 初期シナリオの検討視点

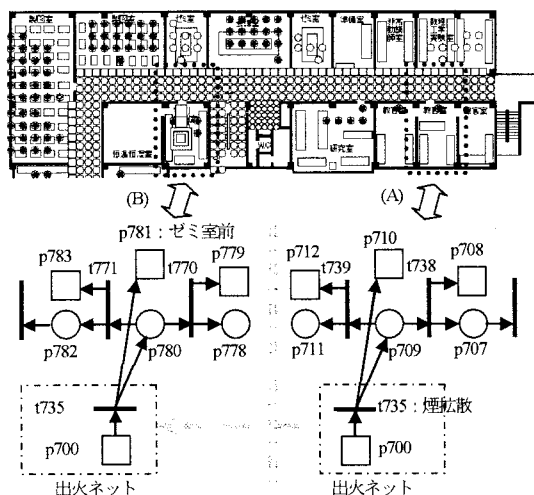


図-17 出火場所の想定変更操作

きるが、②の想定については、想定外の検討が必要となるだろう。

具体的には、図-13の背景画像から、初期シナリオで想定した出火場所は、右端の避難口が塞がれるというリスクはあるが、建物内避難全般にとってはリスクが小さい位置と思われる。従って、出火場所を変更したシナリオの検討が必要だろう。このとき、右端の避難口の使用性についても考慮する必要がある。人については、常時利用者のみとし、避難口、避難路を熟知しており、シナリオで設定した経路を整然と避難するとしている。常時利用者に対しては、訓練との関係で妥当といえるかも知れないが、公共建物であれば、一時的な利用者という避難計画にとってリスクが高い存在の想定も欠かすことはできない。また、図-14の出力画面より、非常口の手前空間では、通路部より密集化すると考えるべきだろう。

これらの検討結果を受け入れ、そのシナリオシミュレーションを構成し、即時に検討に移れることが、本論文でいう批判的・建設的支援システムの基本要件となる。そこで、以下では、初期シナリオのペトリネットシミュレーションを基盤とすることで、システムテックな手順で、この要件が実現化されることを示す。

まず、出火場所の想定変更は、視覚的には、図-12の(2)の説明で述べた部分ネットのドラッグによる移動手法によって、図-17の上部に示すように、出火場所の部分

ネットを、背景画像上で想定位置に移動させるだけでよい。即ち、この出力画面図の座標データは、前述したように Ndata ファイルに自動反映されており、視覚的にはこの操作だけで済む。しかし、内実は、図-17の右下に示すネットのままである。即ち、出火場所の変更には、当然、煙の拡散方向の変化が伴い、その変化が反映されて始めて内実を伴ったものとなる。

この変更操作のキーは、図-17の右下ネットに示すように、出火・炎上を受けて、煙拡散を開始するトランジション t735 である。このトランジションの探索は、Sdata ファイルの書式説明で述べたコメント文を用いた検索¹¹⁾によって容易に行うことができるだろう。このトランジションの出力プレースリストを調べ、現行の709,710を削除し、左下ネット図に示す780,781に書換えればよい。この移動先のプレース番号は、コメント文の中に記載されている部屋番号をキーワードとする検索で容易に見つかる。さらに、図-17の左下ネット図に示すように、煙の拡散に関わるトランジションの入出力プレースのリストを逆に直すことで、出火場所を変更したシナリオネットの Sdata ファイルへの再構成が完了する。

これらの作業は、出力ネット図と Sdata ファイルを、マルチウインドウ形式で同時に開くことで、容易に実行できるレベルのものである。そして、この操作は、アークの変更のみであり、Ndata ファイルは前述したものが対応しているために、視覚型シミュレーションが即時に実行可能となる。

避難者の多様化は、室の利用形態との関係で、ここでは、図-13に示す背景画像の左端の大部屋に想定する。多様性は、避難開始時の判断ネットの組み入れによって考慮する。具体的には、図-7(3)の判断ネットを使用し、一時的利用者には、避難開始時に、右あるいは左の経路を選ぶ人もいる。また、躊躇し、避難開始が遅れる人もいるとするものである。それらの人の構成は、Sdata ファイルの書式で説明したように、判断ネットを構成する生成トランジションの特定化部位、generatranZでのカラー比率をパラメータとすることでシナリオに組み込むことができる。また、図-9のT字路のネットと同様に、避難開始時に煙があれば、全ての人が煙と反対に向かうとする。

出火場所の変更とは違い、この組み入れでは、サブネットを結合化することとなり、Sdata ファイルの要素数の変更を伴う操作となる。具体的には、図-7(3)と図-9のネットから、追加は、プレースが8個、トランジションが7個となる。即ち、初期シナリオの Sdata ファイルで、まず、それぞれの記載部位の総数を+8、+7に変更すると同時に、組み入れ判断ネットの構成要素の特定化のために、各部位の最後に、それぞれ8行、7行を挿入し、図-7(3)と図-9を参照して、それぞれの特定化の追記を行

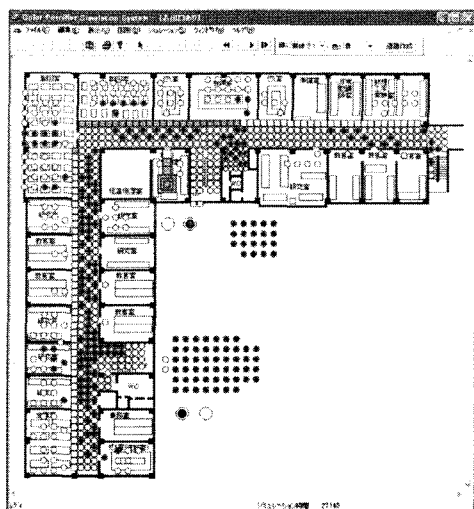


図-18(1) 提案シナリオ(1)の実行画面

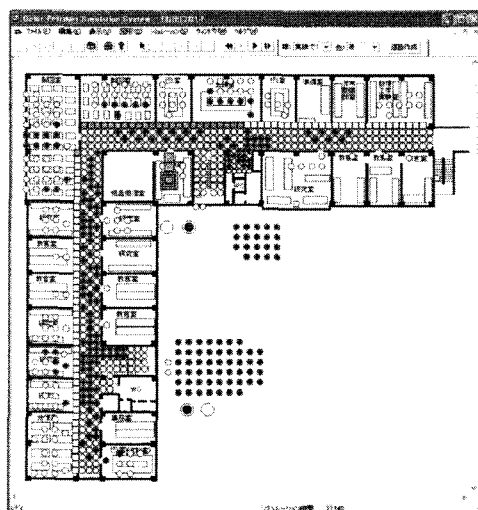


図-18(2) 提案シナリオ(2)の実行画面

う。この拡張 Sdata ファイルをシミュレータで開くと、「配置されていない要素があります」というメッセージがだされる。そこで、＜図形配置＞メニューを用いて、図-12(1)に示した手続きで判断部ネットの要素配置を行えばよい。

この段階では、判断部ネットは、避難シナリオネットの本体とは結合化されていない。結合化は、図-9 を基に、左右の選択結果に対応するプレースを、それぞれの方向への移動トランジションを検索し、それらの入力プレースリストに加え、そして、煙有りのプレースが抑止するトランジションを検索し、その番号を抑止トランジションリストに記入することで完了する。

非常口手前の空間での密度問題は、プレースのサイズ、具体的には Ndata ファイルでプレースの半径 (radius) を小さくし、また、上と同様に、プレースとトランジション数を増やし、再配置することで組み入れられる。こ

表-2 シナリオシミュレーションのパラメータ

速度パラメータ(m/sec)		避難者数(人)		多様性パラメータ(%)	
通路歩行	1.3	総数	224	左選択	25
階段歩行	0.8	2階部	155	右選択	25
煙拡散	0.5	3階部	69	躊躇	50

れらの手続きを行い、上述の検討結果を提案として組み入れたシナリオシミュレーションの実行画面例を、図-18(1)と図-18(2)に示す。

図の(1)の方が、右端の避難口の使用を想定したもので、図の(2)の方は、使用できないとしたままのものである。いずれの画面も初期シナリオの実行画面例の図-14(2)と同様に、一方の防火シャッターが閉となった時のものである。

画面右下の時刻表示より、出火場所の変更後の図-18では、いずれも 27 秒過ぎとなっている。初期シナリオの場合には 51 秒過ぎであったから、出火場所の変更によって、避難リスクが高くなる想定となっていると見てことができよう。また、図-18 の(1)では、想定通りに右端の避難口を使用して避難がなされていることが、視覚的にも確認できるだろう。通路にいる避難者も、煙の拡散・滞留に背を向ける形で、この右端の避難口に向かうことになる。逆に、図-18 の(2)では、通路にいる避難者は、煙が滞留し、拡散してくる方向に向って避難していることになる。

これらの状況は、図-11 に示した「シミュレーション」のメニュー中の＜ステップ実行＞によって、より詳しく示すことができるが、ここでは紙面制約のために割愛する。また、階段横の非常口前の密集化は、通路部でのプレースの配置密度、さらには図-14 の非常口前の配置密度と比較することで、その組み入れも視認してもらえらう。

表-2 は、3 つのシナリオシミュレーションでの諸パラメータを示したもので、速度パラメータについては「火災便覧」¹⁾を参考に定めた。速度と避難者関連については、表-2 の数値を共通に使用し、避難者の多様性パラメータも、それを想定する 2 つのシナリオで共通としている。図-15 の(2) と(3)に、検討シナリオでの避難完了者数の推移図を示す。

まず、初期シナリオと検討シナリオ(1) とを比較をすると、右端避難口の使用により、30 秒での完了者が発生し、累積人数でも 90 秒までは上回るが、それ以後はかなり下回り、初期シナリオでは 150 秒で 224 人全員の避難が完了するが、検討シナリオ(1)では全員の避難完了は 210 秒後と遅くなる。

これには、両シナリオでの避難者の想定の違いとともに、出火場所の想定の違いが大きく影響している。即ち、前述したように、検討シナリオ(1)では防火シャッターが

閉になるまでの時間が約半分になっており、その後は 1 人ずつの避難となることが大きいといえよう。即ち、避難シナリオの検討ではリスク想定の一貫性が重要なポイントとなることが示せたといえよう。

次に、図-15 の(2) と(3) を比較すると、ともに全員の避難完了は 210 秒後と同じになり、この数値だけでは右端の避難口の使用性は影響がないように見える。この完了時間は、3 階部分を含め、建物の左側に避難者が多く存在するという想定であり、しかも、これらの人々の避難には、今回想定した出火場所が大きな影響を与えないとことによると考えるべきだろう。短時間での避難完了者数には大きな差があるし、何よりも、この支援システムの大きな特徴である動的視覚型のシミュレーション画面には、その差が明確に示されている。即ち、右端の避難口の使用性は、避難者が煙に曝されるリスクに注目すれば、図-18(1)と図-18(2)の画面から誰の目にも明らかにできているといえよう。

右端の避難口は、実は防犯上の理由で施錠されており、鍵は扉横の壁のボックスに収納されている。図-6 ないしは図-11 の視点からは、避難口は空間 (S) に属する要素であるが、点検との関係でのシナリオ想定も重要となることを示唆しているともいえよう。

4. あとがき

本論文では、避難計画＝シナリオとすることで、想定外を批判的・建設的に検討することが不可欠となることを明確にした上で、その支援システムの展開可能性と方法論を、ベトリネットシミュレータを基盤として論じた。まず、2. の (1) では、シナリオとは、事象連鎖による目的達成の指示書であるとし、ベトリネットによる事象連鎖の記述手法とその駆動原理を示し、その特徴が、共通構造と汎用原理によるネット間の結合性、静的記述の動的記述への直結性、および即時視覚型シミュレーションの実行性にあるとし、これらが避難シナリオの批判的・建設的検討支援の基礎力となるとした。

2. の (2) では、これらの特徴を活用し、避難シナリオの基本要素である空間 (S)、人 (H)、設備 (E)、リスク (R) との関連で、空間の歩行移動と避難者の判断、煙の拡散と滞留、煙感知と防火シャッターの作動等の基本部分ネットを説明するとともに、T 字路を持つ避難空間の部分システムネットと防火シャッターの作動に伴う迂回避難の部分システムネットの構成法を示した。そして、これらのネットが全て共通で簡明なルール、即ち、トランジションの発火則で駆動され、モデルで記述される内容が、誰にでも手動かつ視覚的に容易に確認できることを示し、この理解の容易さも、本支援システムが批判的・建設的検討に有効となる源泉の 1 つ

とした。

2. の (3) では、実レベルでの支援の基盤として、著者らが開発してきたベトリネットシミュレータの基本メニューを示し、それとの関連で実践手続きを述べた。まず、この実践には、構築したシステムネットを Sdata ファイルと呼ばれる書式で記述する必要がある。2. の (2) で構築した T 字路ネットを事例にその書式を概説し、ネットモデルが構築されていれば比較的容易な作業であるとした。次に、この Sdata ファイルをシミュレータで開き、基本メニューを使用することで、視覚型出力画面が容易に構築できることを示すとともに、このシミュレータの特徴が、装備されている<背景画の挿入><グリッド線><表示・非表示>のメニューの活用によって、実空間対応性を持つ点にあることを述べ、これも批判的・建設的検討支援に有効に働くとした。

3. の (1) では、このシミュレータを用い、実レベルでの建物内避難シナリオのシミュレーション実行について報告した。ここでの初期シナリオは、常時利用者のみによる整然とした避難で、出火場所は建物の右端とするという想定のもので、そのシステムネットの構築が、2. の (2) で説明した基本部分ネットを拡張化する形で行えることを示すとともに、その即時視覚型シミュレーションの実行性を示した。3. の (2) では、この初期シナリオは比較的低リスクの低い想定であるとし、出火場所想定の変更、避難者の多様性の考慮、非常口前での密度変化、および建物右端の避難口の利用率を組み入れたシナリオでの検討が必要であるとした。まず、これらの提案が、本シミュレータの操作性やマルチウインドウでの使用性を活用することで、組み入れ可能となることを示すとともに、新規シナリオも即時視覚型シミュレーション実行が可能となることを示した。そして、3 つのシナリオシミュレーション結果を比較することによって、リスクの高い想定での検討の重要性を示すとともに、避難完了時間の比較だけでは引き出せない右端の避難口の意義が、背景画像上での実空間対応型の視覚的な動画によって、煙に曝されるリスクとの関連で明確になること、その避難口は、防犯上の理由で施錠されており、点検シナリオの検討支援の必要性にも言及することができた。

今後の課題としては、1 つは、非常口前の空間での避難行動の記述性の向上化である。即ち、人々が密になるという批判に対して、ここでは視覚的な組み入れはできているが、密になることによる避難行動の動態そのものの記述までには至っていない。この点の工夫が課題と考えている。このこととの関連でいえば、広場空間での行動記述も未解決である。もちろん、パラメータの検証や、今回の対象例では、3 階部分の避難者が合流する階段部の精緻化も課題である。

点検シナリオとの関連では、避難路での障害物の出現

も重要な検討課題となる。このことは、新宿雑居ビル火災の例を引くまでもなく、身近で経験するところのものである。本論文では具体的展開までには至らなかったが、2.の(1)で事象連鎖の阻害とその解除の記述ネット例を示したが、障害物の問題はペトリネットシミュレーションではある意味で得意分野といえるもので、今後早急に取り組みたい課題と思っている。

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ることを付記しておく。

参考文献

- 1) 日本火災学会編:「火災便覧」第3版, 共立出版, 1997.5
- 2) 北後明彦: 煙の中における人間の避難行動実験, 日本建築学会計画系論文報告集, 353, 32-37, 1985.7
- 3) 横山秀史, 目黒公郎, 片山恒雄: 避難行動解析へのポテンシャルモデルの応用, 土木学会論文集 No.513/I-31, 225-232, 1995.4.
- 4) 林広明, 室崎益輝, 西垣太郎: 建物内T字路における避難経路選択に通路幅員が与える影響, 日本建築学会計画系論文報告集, 487, 9-14, 1996.9
- 5) 目黒公郎, 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.
- 6) 清野純史, 三浦房紀, 八木宏晃: 個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション, 土木学会論文集 No.591/I-43, 365-378, 1998.4.
- 7) 山崎文雄編:「社会基盤システムの実時間制御技術」第9章 災害時の避難行動空間モデルの構築, 123-134, 文部省科学研究費特定領域研究成果報告書, 2000.3
- 8) 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
- 9) 木俣昇, 高木秀彰, 黒川浩嗣: ペトリネットによる交通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
- 10) 木俣昇, 鷺見育男: 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, 土木計画学研究・論文集, No.14, 393-400, 1997.9
- 11) 木俣昇, 中村彰彦: 交通流ペトリネットシミュレータにおける背景画像上でのデータベース化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, no.1, 51-62, 2004.9
- 12) W. Reisig : A Primer in Petri Net Design, Springer-Verlag, 1992.
- 13) K. Jensen : Colored Petri Nets, Springer, 1997. No.22(1), pp.695-701, 1999.
- 14) 村田忠夫: ペトリネットの解析と応用, 近代科学社, 1992.12

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シミュレーション研究*

木俣 昇**, 曾根岳志***

本論文では、避難計画＝シナリオとし、その想定外の批判的・建設的検討の支援システムを、著者らのペトリネットシミュレータを基礎に論じている。まず、シナリオとは、事象連鎖による目的達成の指示書であり、ペトリネット記述法の原理と諸特徴よりシナリオ記述に優れていることを示し、避難シナリオの基本部分ネットを提示し、それらの理解の容易さも、批判的・建設的検討システムの要件となるとしている。次に、実レベルでの支援性を、建物内避難空間図を背景画像とし、シミュレータを用いて、シナリオシミュレーションの構築支援性と、即時実行性をデモンストレーションし、初期想定よりリスクの高い想定での検討支援にもシステムテックに移行できることを示している。

Development of Petri Nets Simulation for Evacuation Scenario in Building on Its Background Images*

By Noboru KIMATA**・Takashi SONE***

In this paper, we recognize any plan of evacuation as a scenario and try to develop a supporting system based on Petri net simulator developed by the authors in order to examine alternative hypotheses from various points of view. Firstly, we point out Petri net has fundamental power to describe various scenarios as chain of relevant events and show basic Petri net models for evacuation planning. Next, we demonstrate construction of evacuation net in a building and execution of its simulation as practical supporting level. Also, we show practical procedure to deploy alternative scenario simulation proposed by critical and constructive discussion.