

ペトリネットによる知識情報伝達モデルとその応用

椎塚久雄

石塚裕隆

工学院大学電子工学科

日本アイビーエム株式会社

人間の行動に関する研究は、心理学をはじめ、建築学、社会学、システム工学、情報工学など多岐にわたっている。そのような中で注目されつつある分野に、人間を捉える一分野としての認知科学や、コンピュータに知能を持たせようとする人工知能の分野などがある。

本論文は、そのような一分野として緊急時における人間の行動をモデル化する一試みを述べたものである。そして、人間の行動が並列的かつ非同期的に行われていることに着目し、ペトリネットによりモデル化したものである。よく知られているようにペトリネットは、特に非同期かつ並列的なシステムをモデル化するとき、そのモデルの記述性が高いという優れた特長を持っている。

その結果として、ペトリネットによって人間の行動モデルを記述することは可能であるとともに、ペトリネットで人間の行動をモデル化することにより、避難行動を含め人間行動のような動的挙動をリアルに表現できることが示される。またペトリネットが人間行動をモデル化するための一つの有力なツールであることも示される。

INFORMATION TRNSFER MODEL BY PETRI NETS

Hisao Shiizuka and Hiroataka Ishizuka

Department of Electronic Engineering, Kogakuin University

Nishishinjuku 1-24-2, Shinjuku-ku, Tokyo 160, Japan

This paper is attempting at modeling and simulation of human behaviors, which is an application of the production rule. It is well known that a production system has the important concept in Artificial Intelligence. We show that the production system is modelled by Petri nets. It is an important problem to model refuge-behavior that is applicable to emergency in fire, breaking out especially in skyscrapers. First, we present the basic model I. The basic model I is refined by some factors in refuge case. As an application of our model, we construct a refuge-behavior model by a colored Petri net, taking into account a department store. It is shown that our model by Peri net is applicable to simulate real behaviors in emergency case.

1. まえがき

緊急時における人間の行動・情報処理に関する研究としては、認知科学的な観点^[2, 14]からのものと、具体的なシミュレーションを伴った知識工学・人工知能的な観点^[4, 5]からの二つのアプローチがある。避難行動モデルを構築し、それをコンピュータ・シミュレーションによって避難の状況を把握しようとする試みは幾つか発表されているが^[11, 12, 13]、まだ初歩的段階であり、今後実用的なものとするには、さらに基礎的研究の積み重ねにより現実的なモデルに近づけることが必要とされる。

本論文は、緊急時における人から人への情報伝達の様子をベトリネットによりモデル化する手法とシミュレーションについて述べたものである。ベトリネットによるこの種の問題に対するアプローチは既にいくつかの論文^[7, 8, 9, 10]が報告されている。これは、人間の行動が並列的かつ非同期的に行われていることに着目し、ベトリネットによりモデル化したものである。よく知られているようにベトリネットは、特に非同期かつ並列的なシステムをモデル化するとき、そのモデルの記述性が高いという優れた特長を持っている。

本論文では、三つの避難基礎モデルを提案し、種々の観点から考察を加え、これら基礎モデルの改良を通して、より円滑な情報伝達を行えるベトリネットモデルを提案し、そのいくつかの特徴について示す。また、デパートのある階を想定し構築したモデルのシミュレーション結果も示す。

2. ベトリネット

ベトリネットはシステムの“状態”に対応するプレースの集合、システムの状態遷移を表す“事象”に対応するトランジションの集合、およびそれらの状態と事象の関係を表すアークの集合により構成され、プレースに置かれるトークンによりマーク付けすることにより、システム全体のある状態を表すことができる。すなわち、ベトリネットを集合表現すると

$$PN = \langle P, T, A, M_0 \rangle \quad (1)$$

となる。ただし、

$$P = \{p_i \mid 1 \leq i \leq |P|\} \quad (2)$$

$$T = \{t_j \mid 1 \leq j \leq |T|\} \quad (3)$$

A; 有限個の有向線分の集合

M_0 ; 初期マーキング

($|P|$ 次元ベクトルで表され、その第 i 成分値は、プレース p_i に与えられるトークンの個数を示す)

また、プレースを“○”，トランジションを“|”，有向線分を“→”で表し、トークンを“●”で表すと、ベトリネットは図形表現され、システムの状態、および状態の遷移を視覚的に把握することができる。

ベトリネットを構成するプレース、トランジション、それらを結ぶアーク、初期マーキングが与えられたとき、その“計算(発火)”は次のように行われる。トランジション t_n は、各プレースがトランジション t_n へのアークの本数以上のトークンを持つとき、発火可能である。トランジションが発火すると、プレースの中のトークンはアークに従ってプレースからプレースへ移動する。すなわちトランジションへのアークを持つプレースのトークンは、そのアークの本数分だけ減り、トランジションからのアークを持つプレースのトークンはそのアークの本数分だけ増える。

カラーベトリネットはベトリネットの拡張であり、ベトリネットにカラーの集合を定義したものである。このカラーの集合により、各々のプレースのマーキングは、カラートークンの集合として定義される。カラーベトリ

ネットにおいて、発火はカラーの組み合わせである発火規則により行われる。つまり、入力プレース内のカラートークンが発火規則の入力カラーと一致したならば、トランジションは発火され、入力プレースからトークンを取り、発火規則の出力カラーに従って、出力プレースにトークンが加えられる。発火規則にない入力カラーの組み合わせのときは、トランジションは発火可能でない。

3. 基礎モデル I

3-1. 基礎モデル I の構築

ここでは、ベトリネットによる避難行動の基礎モデルを提案する。そして次章以下その改良について順を追って議論し、本論文で構築するモデルの妥当性を示す。

まず、他のシミュレーション例と同様に建築物の空間をある大きさ(2メートル四方)に分ける。そしてその空間相互間の関係をベトリネットを用いてモデル化する。図1に示すように、このモデルでは、火災が起こったという条件のもとで、火災を認知した人と火災の情報を持たない人がどのように情報を伝達し避難するかという基本的なモデルである。図1では、人間をトークンと見なし、行動空間をプレース、人間行動をトランジションと関係づけている。

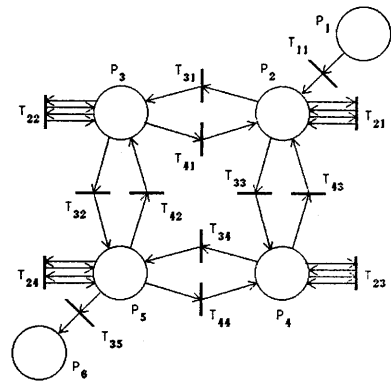


図1 基礎モデル I

表1 図1の基礎モデルの発火規則

トランジション番号	入力トークン	出力トークン
T_{1x}	●	●
T_{2x}	○ ●	● ●
T_{3x}	○	○
T_{4x}	●	●
T_{5x}	○	○

○: 火災情報無し ●: 火災情報有り

このモデルでは、初期条件として全員が出口を知らないものとした。そしてある部分で火災が発生し、1人の火災を認知した人(従業員など)が「火災発生」という“情報”を伝達していくことによって、人々が避難行動に移るといった状況を想定している。この時、火災を認知している人は出口を知っているものとし、火災発生、及び出口の方向の情報が伝達されるものとした。

火災の認知の有無を表現するためにカラーベトリネットを用いた。火災の発生を認知している場合には“●”のトークン、認知していない場合には“○”のトークンを割り当てた。火災を認知していない人は、自由にモデル内を行動し、火災を認知した人は避難のために出口に

向かって行動する。また、火災を認知した人と認知していない人とが会うとそこで火災の情報と出口の情報の伝達が行われる。そのことによって、新たに火災を認知した人が、出口に向かっての行動を起こすのである。

3-2. 基礎モデル I の改良

図2に示すようにこの基礎モデルでは、スレ違った時に情報の伝達されないという問題が生ずる。この点の

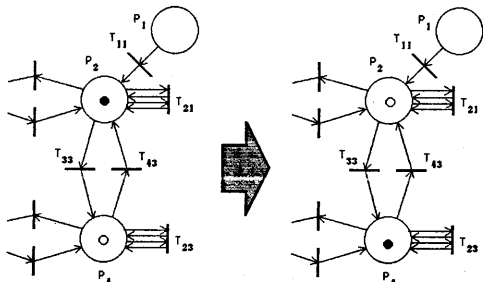


図2 基礎モデル I の問題点

改善については、ごく一部を除いて、火災の発生と出口の情報の両方を知らないことを前提としている。しかし、火災発生後、時間が経過すれば、ほぼ全員が火災の発生を知ることになる。ところが、実際にシミュレーションしてみると、一部の人、情報を持っている人が全員避難した後建物内部に取り残されてしまった。これ自体は別に不自然ではないのだが、問題なのは、出口のそばにいながら、火災の発生を知らずに、出口の回りをいつまでもうろついていることである。これについては、複数の事象の認知の有無を区別できるようにモデルを構築すればよい。しかし、カラーペトリネットでは、認知すべき事象の数について、指数オーダーでカラーの数が増加してしまうという問題が残されているが、以後は、このモデルを基本にして、個人の情報処理的な内容を付け加えていく。

3-3. スレ違ったときの情報伝達

スレ違った時に情報伝達が行われないのは、図2において T_{33} と T_{43} がまったく同時に発火しているからである。そこで、この2つのトランジションが同時に発火できないようにするため、図3のように P_{03} (P_{03}) を導入する。こうすれば、 T_{33} と T_{43} が同時に発火することはない。すなわち、 T_{33} と T_{43} は共に発火可能であるが、同時に発火すると、 P_{03} にはトークンが予め1つしかなかったから、発火後 P_{03} のトークンの数は-1になってしまう。これはペトリネットの定理に反する(プレースに存在するトークンの数は非負である)。従って、 T_{33} と T_{43} の発火は競合状態にあるといえる。

このように考えた場合、 P_2 と P_4 の間は同時にひとつを越える数のトークンが同時に推移することはなくなる。すなわち、ひとつの区画から他のあるひとつの区画へは常に1人の人間しか移動できないということである。このことは、基礎モデル I では区画間の一方の移動は1人

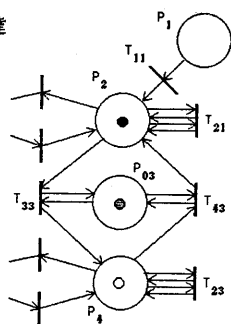


図3 スレ違いに関する改良。

に制限されているから(図2の例では P_2 から P_4 へは同時に1人以上の人間の移動を表現できない)、スレ違いの発生はむしろ不自然ともいえる。

3-4. ペトリネットの基本的性質に関する問題

ここで、ペトリネットの基本的性質に立ち戻って考察してみる。一般にペトリネットを用いてシステムをモデル化する上で1つの制約が導入される。トランジションの発火は要する時間がゼロで瞬時的であり、2つの事象が同時に生起することはあり得ないとするのである。このようにモデル化された事象を素事象という。素事象は瞬時的であり、非同期的である。時間は連続変数であるといわれている。よって、各事象に生起時刻を割り当てるとすれば2つの実変数が互いに一致する確率はゼロであり、事象は非同時的である。素でない事象とは、要する時間がゼロでない事象である。

素でない事象は非同時的ではなく、時間的に重なることが有り得る。実在の世界における事象のほとんどは時間を要するので、素でない事象であり、したがってペトリネットのトランジションとしてモデル化することには問題があるように思われる。しかし、このことは特に問題にするのではない。なぜならば、図4に示すように、素でない事象は、2つの素である事象“素でない事象の開始”と“素でない事象の終了”および、1つの条件“素でない事象が生起中”に分解できるからである。以上のことを考慮して図3を書き換えてみると図5のようになる。ここで、全てのトランジションの発火は瞬時的であり、また同時に発火することはない(微小時間 Δt の間に2つのトランジションが発火することはない)。このように考えてもペトリネットの並行性を妨げるものではない。図5においては、図2の T_{33} 、 T_{43} は、それぞれ P_{33} 、 P_{43} 及びその前後のトランジションで表現されている。それらは、区画から区画への移動中であることを意味する。

3-5. 発火の競合に関する問題
図1の基礎モデルは、情報伝達が行わなければならない状況で情報伝達が行われないことがある。このことは、同じ場所にいながら避難行動または自由に移動する行動が優先され、情報を得る前に他の区画に移動してしまうことを意味する。緊急事態であることを考えれば、情報を伝達している余裕のない場合も考えられ、状況次第では問題にする必要がないともいえる。しかし、この問題の発生はペトリネットの基本的性質から考えるとランダムなものである。これでは問題である。情報伝達の有無は避難者の情報処理過程から考えなければならない。ここでは、情報伝達はその可能性のあるときは必ず行わなければならない、と仮定してモデル化している。

この新しい問題は、図2では T_{21} と T_{33} が、また T_{23}

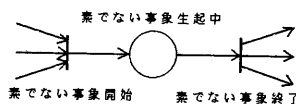


図4 素でない事象のモデル化

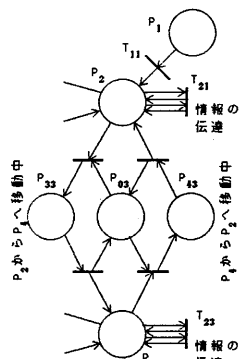


図5 素事象を表しているモデル。

と T_{43} (P_4 に○のトークンが存在するとき)が競合状態にあることに原因がある。あるいは、カラーベトリネット特有の、発火色対応の競合も原因する。従って、基本的なベトリネットでは問題を解決できない。ベトリネットを拡張して、競合状態にあるとき発火色対応に優先順位をつければ問題を解決できる。すなわち、表1において表のより上にある発火規則が優先されるようにすればよい。そうすれば、 P_2 に存在する“○”と“●”の2つのトークンは T_{33} よりも、 T_{21} の発火が先に行われて、 P_2 のマーキングは“●●”に推移し、確実に情報伝達が行われる。

4. 基礎モデルII

基礎モデルIでは避難者相互間の情報伝達のみ注目してモデル化をおこなった。そのため実際にシミュレーションしてみると、不自然な行動が目立つ。特に、通路の合流地点から出口にかけて、物理的に不可能と考えられる滞留が発生する。ここでは、群集流のシミュレーション^[11]を参考に、同じ事をベトリネットを用いてモデル化を試みる。

4-1. ベトリネットによる待ち行列システムのモデル化

図6は、待ち行列を表す最も簡単なベトリネットを表したものである^[6]。ここで、 P_i は、行列を作る場所と考え、そこにトークンが存在するとき、そのトークンの数と同じ数の人数の人が行列を作っていることを表す。 P_i は、あらかじめその場所に並ぶことができる最大の人

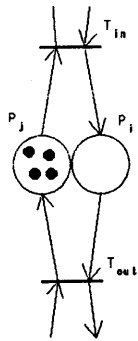


図6 待ちモデル

数と同じ数のトークンを初期マーキングとしておく。このモデルは、明かに強保存的である。 P_i と P_i のトークンの数の和は常に一定である。また、さらに発展させて、初期マーキングとして、 P_i または P_j のどちらか一方にトークンが一つだけある場合を考える。この場合、全てのプレースはその中のトークンの数は1を越えない。解析は容易になるが、プレース、トークンなどの数は膨大なものとなる。

基本的には、ベトリネットは時間についてまったく考えないのであるが、ここでは時間的なものを考えようとベトリネットを拡張した。具体的には、プレースタイマーを導入した事である。このプレースタイマーは、一定時間トランジションの発火を抑制させるものである。これは、時間ベトリネットの一種の変形であると考えられる。このモデルの特徴は、プレースの中にあるトークンの数に制限を加えることにある。

4-2. 通路の合流点のモデル化

実際に避難行動をモデル化するに当たり、群集流が発生しやすいと考えられる、通路の合流地点についてモデル化を行う。簡略化のため、T路形に合流する地点で、全ての人が出口に向かって同じ速さ、向きで行動するものとした(故意による追越し、割り込みはないものとする)。また、通路は狭く、一度に二人しか並んで動けないものとした。このモデルを図7に示す。

このモデルでは、通路を $P_1 \sim P_7$ まで七つの部分に分割した。 P_8 が合流点に当たる。避難者は、 P_{1in} 方向からと P_{2in} 方向からきて P_5 で合流し P_{out} 方向へ移動する。 $P_1 \sim P_7$ は図7の P_i に相当するものである。 P_{1in} と P_{2in} は、ここから避難者が来るところで部屋であると考えると差し支えない。 P_{out} は非常口と考えてよい

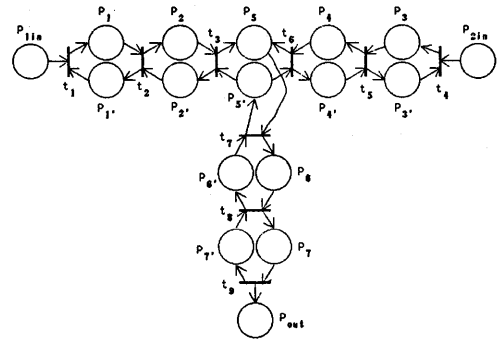


図7 通路の合流点付近のネットモデル。

このモデルを、初期マーキングが、 $P_1 \sim P_7$ にはトークンをそれぞれ2つ、 P_{1in} と P_{2in} にはトークンをそれぞれ20個とし、その他のプレースにはトークンを置かないものとしてシミュレーションした。実際には、2つの部屋にそれぞれ20人がいて、通路には誰もいないときに全員が避難するという場面を想定していることになる。

発火が競合した場合には、競合するトランジションのうち直前の発火から最も時間を経過したものの発火が優先されるものとした(最古規則優先発火)。このシミュレーション結果から次のこのが分かった。

- (1) 避難開始直後、合流点に避難者が殺到し、滞留が発生するが、すぐに解消する。
- (2) 避難開始後一定時間経過すると、比較的順調な状態で推移する。この時、合流点では、滞留が発生しないが、合流点の直前を頭にした行列が延びていく事がわかる。

このシミュレーションでは、パニックが発生せず、全員が整然とした行動をとることを前提としている。比較的順調に避難が完了したのはこの点によるところが大きいと考えられる。

4-3. 基礎モデルIIの改良

待ち行列の考え方を基礎モデルIに取り込んだベトリネットモデルを図8に示す。

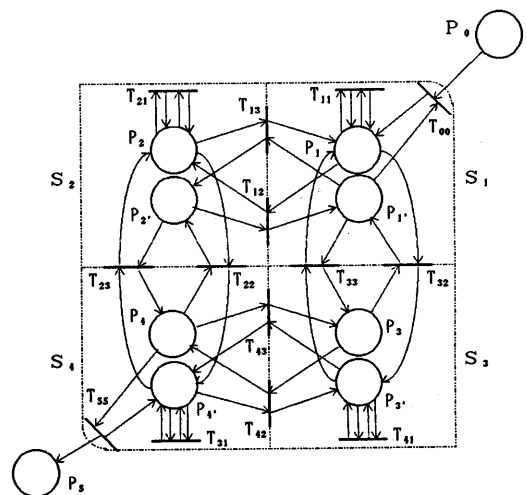


図8 基礎モデルII

表2 図8のモデルの発火規則

トランジション番号	入力トークン	出力トークン
T_{x1}	●	●
T_{x2}	○●	●●
T_{x3}	○◎	○◎
	●◎	●◎
T_{x4}	○	○

図8では、避難者相互間の情報伝達をモデル化すると共に、避難者群集流の様子も考慮した。すなわち、分割された各区画に入ることでできる人数に制限を加えた。これによって、基礎モデルIでしばしば見られる、一つの区画に物理的に不可能と思える人数が押し寄せ、その中で情報伝達が行われていくという問題点が解決され、一歩改良されたといえる。このモデルの発火規則を表2に示す。ここで、“◎”で表されるトークンは、初期マーキングの段階で各区画に入ることで可能な人数と同じ個数をそれぞれ P_x に配置する。これによって P_x で表現される各区画にいる人数に制限を加えることになる。そのほかの点は、基礎モデルIと同じである。したがって、発火色対応の競合が発生した場合には表2の発火規則のうち表のより上に書かれている発火規則の適用が優先される。

このモデルでは、情報の有無がまだ十分行動に影響を与えていないと考えられる。火災の情報を得た場合と無い場合とで出口に殺到する行動に違いが現れると考えなくてはならない。また、先に述べたように、群集流の歩行速度は群集密度に依存する。このためその区画に存在する人数によって発火を時間的に制御しなければならない。しかし、そこまで追求するには、時間ベトリネットの考えをさらに拡張しなければならないので、ここではこれ以上の追求は行わないことにする。それよりも、情報の伝達に重点をおいた改良を行っていくことにする。

5. 基礎モデルIII

基礎モデルIの問題点を改良して基礎モデルIIを提案したが、結果的に非常に複雑なものとなり、大規模なモデル化を行うには困難な伴う。

ここでは、非常に簡潔な表現でありながら、強力な表現能力を持つ避難行動基礎モデルIIIを提案する。

5-1. 基礎モデルIIIの概要

従来、各区画を表現するプレースとプレースの間関係は一つ一つそれぞれ別の役割を持ったトランジションを使って表現してきた。例えば、区画Aから区画Bへの移動と区画Bから区画Aへの移動はそれぞれ別々のトランジションの発火で表現した。また、情報の伝達を表すために別のトランジションを用い、これを発火させることにより表現した。スレ違ったときに問題が発生したので、これを改善するようにモデルを拡張した。

ここでは、それまで別々のトランジションによって表現していたものを一つにまとめた。すなわち、区画と区画の移動は、どちらの方向の移動も同じトランジションの発火によって表現できるようにした。また、各プレースにある情報伝達のためのトランジションをプレース間のトランジションの機能に含むようにする。このようにして作られた基礎モデルIIIを図9に示す。

5-2. 発火規則

このモデルの発火規則を表3に示す。図9の基礎モデルIIIをもとに構築された避難行動モデルは、表3の発火規則にしたがってシミュレーションされることになる。

なお、表の上部に記した番号は、トランジションに入

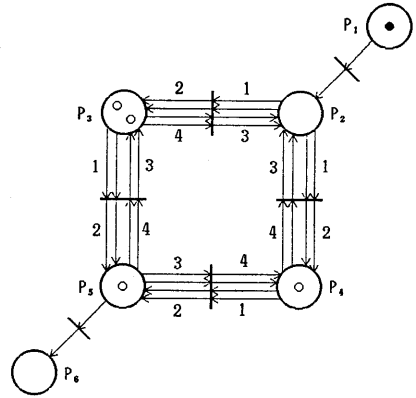


図9 基礎モデルIII

力されるアークの番号に対応している。この番号のついたアークを出力しているプレースにあるトークンの組合せが表と一致した場合、そのトランジションは発火可能になる。

表3 モデルIIIの発火規則

発火規則	入力トークン		出力トークン	
	1	4	2	3
1	XX	XO	XX	XO
2	XO	XX	XO	XX
3	XX	OO	XX	OO
4	OO	XX	OO	XX
5	XO	XO	XO	XO
6	X●	XX	X●	XX
7	●●	XX	●●	XX
8	X●	XO	●●	XX

○：情報無し ●：情報有り X：無色トークン

この発火規則については、①～⑤が情報無しの移動規則であり、自由に移動できるように“○”のトークンが、それが存在するプレースからアークがのびているトランジションの全てが発火可能になるように定めた。◎、⑦が情報有りの移動規則である。発火規則◎、⑦によって“●”のトークンは出口の方向にあるプレースに移動できる。◎が情報伝達規則である。情報を持たない人が出口とは逆の方向に向かっている時に、情報を持った人とスレ違い、情報を得ると共にもとのプレースに戻るといものである。

以上の発火規則を構成するにあたり、無色トークンを導入した。表3の“X”がこれにあたる。このトークンは、初期マーキングにおいて全てのプレースに避難者の数に比べて十分に多い数が配置される。そして、情報伝達及び避難者の移動を起こすために補助的に作用するものである。もし無色トークンを導入しなかったならば、プレースにトークンが一つしかない場合、ベトリネットの実行規則により、発火不可能になってしまうのである。

5-3. 基礎モデルIIIの問題点

基礎モデルIIIでも発火色対応の競合が問題になる。図10の場合について説明する。(i)で P_3 から P_2 へ情報を持たない人が移動しようとし、一方 P_2 から P_3 へ情報を持った人が移動しようとしている。この場面で、発火規則◎が適用されれば問題ない⁽ⁱ⁾。ところが発火規則①もまた適用できる。そうすると(ii)のようになりこの状態

で発火規則⑩が適用されると(iv)のようになる。結局，“スレ違い”が発生したのである。この解決には発火規則⑩が、他の発火規則に優先されて適用されるようにしなければならない。発火規則⑩を優先的に適用させる事によって、実際のシミュレーションでは流れ図の作成を簡単にしてくれる。

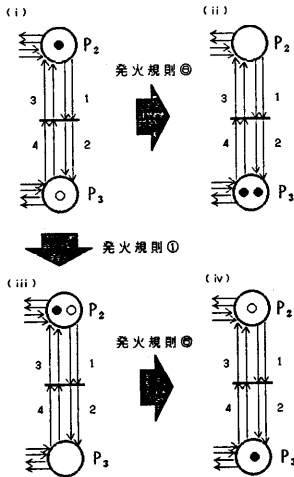


図10 基礎モデルⅢの問題点(1)

次に、図11は、同じプレスP₃に情報を持った人と持たない人が同時にいる場合である⁽¹⁾。この場合、基礎モデルⅠでは情報伝達が行われるのであるが、表3の発火規則②、③の順に適用されれば情報伝達が行われる⁽ⁱⁱ⁾。しかし、発火規則⑥、①と適用されると結局この二人は一緒に行動しながら情報伝達が行われないまま出口に達する。これは、前述の通り発火規則⑩が優先的に適用されることで解消される。

ところが、発火規則⑥、①と適用されると(iv)・(v)、情報を持たない人は、情報を得るチャンスがありながら情報を得られずにさまよい続けることになってしまう。

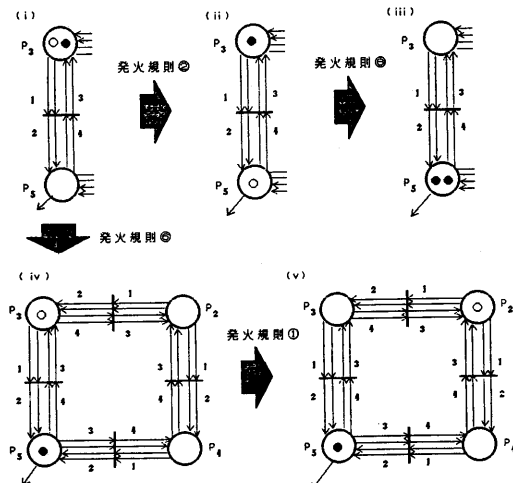


図11 基礎モデルⅢの問題点(2)

これを解消するように発火色対応の競合を解消するのは難しい。そこで次節で新しい発火規則及びその発火色対応の競合解消法について述べる。

5-4. 基礎モデルⅢの発火規則の改良

基礎モデルⅢの問題点は、表3の発火規則を改良することによってほとんど解決することができる。発火規則次第で、かなりの拡張をすることも可能である。ここで、さらに基礎モデルⅡの内容も取り込むことに成功した。改良した発火規則を4に示す。

表4 基礎モデルⅢの改良された発火規則

発火規則	入力トークン		出力トークン	
	1	4	2	3
1	××	×○	××	×○
2	×○	××	×○	××
3	××	○○	××	○○
4	○○	××	○○	××
5	×○	×○	×○	×○
6	×●	××	×●	××
7	●●	××	●●	××
8	×●	×○	●●	××
9	○●	××	●●	××
10	○●	××	××	●●
11	××	○●	●●	××
12	○×	××	××	○×
13	××	○×	○×	××

○：情報無し ●：情報有り ×：無色トークン

この表を見ればわかるように発火規則①～⑩は表6.4と全く同じである。これに発火規則⑩～⑬を付け加えた。このことで、図11にあるような問題点は解決される。発火規則⑩は、情報を持った人と情報を持たない人が同時に同じプレスにきたとき、情報の伝達を行いつつ出口の方向に向かうという事情を意味する。

一方発火規則⑩、⑪は、基礎モデルⅠの情報伝達に関する発火規則と同じ結果になるように作ってみた。どちらか一方さえあれば、まったく同じ結果が期待できる(厳密に論議すると問題点があるが、ここでは無視する)。プレス間の関係を表すトランジションを利用して、移動することなしに情報伝達のみをおこなう。

この発火規則⑩、⑪と発火規則⑩との関係を考えると、発火規則⑩、⑪は情報伝達の時、移動を行わないのに対して発火規則⑩は移動を行いながら情報伝達も行う。すなわち発火規則⑩または発火規則⑩はその他の発火の2ステップに相当する発火を行うものである。従って解析をするに当たって考慮する必要があるように思われる。人は情報を入手してから緊急事態であるとの状況の再定義をするには相当の条件が必要であることを第4章で述べた。従って日常の行動と考えられる発火規則①～⑩と同じ扱いをしてよいであろうか。

なお、発火規則⑩⑪は情報を持たない人が同じところで動かないでいることを表している。実際にシミュレーションする時よく用いられることであるが、常に発火することを強制されている場合(コンピュータでシミュレーションするときには、一般に、トランジションを一つ一つ調べて、発火可能であるときには、有無を言わさず発火させる)には有効なものである。

5-5. 基礎モデルⅡの考えを取り入れる。

基礎モデルⅢにもう一つのトークン“◎”を導入し、発火規則の一部を書き換えることで基礎モデルⅡの考えを取り入れることができる。この新しいトークンは各

ブレースにあと何人入ることができるか、その余裕の人数の数を表す。これは、基礎モデルⅡの考えと同じである。異なるのは、そのための特別なブレースを用いず、空間を表すブレースと共用していることである。そして、図9の基礎モデルⅢが両方向の移動を一つのブレースにまとめたことを利用して、いわば、◎のトークンと人を表すトークンを入れ換えるのである。発火規則を表5に示す。

表5 余裕トークンの概念を取り入れた発火規則

発火規則	入力トークン		出力トークン	
	1	4	2	3
1	◎×	×○	◎×	×○
2	×○	×○	×○	×○
3	◎◎	◎◎	◎◎	◎◎
4	○○	◎◎	○○	◎◎
5	◎○	◎○	◎○	◎○
6	×●	×○	×●	×○
7	●●	◎◎	●●	◎◎
8	◎●	◎○	●●	◎◎
9	○●	◎◎	●●	◎◎
10	○○	××	××	●●
11	××	○●	●●	××
12	○×	××	××	○×
13	××	○×	○×	××

○：情報無し ●：情報有り ×：無色トークン
◎：入ることのできる人数の余裕を示す。

この発火規則を見ればわかるように、発火を促進させる動きを持つ無色トークンの一部を置き換えたものになっている。“◎”トークンは、移動の起きない発火規則⑩～⑬には関係しない。そして移動する逆の方向に移動していることがわかる。すなわち、◎のトークンと人が入れ替わっているのである。このようにして、一つの区画に多くの人々が集中しないようにすることで、より実用的なシミュレーションが可能になるものと思われる。また、これで図8の基礎モデルⅡに比べて、かなり簡略化された表現になった。

5-6. 発火の優先順位に関する問題

モデルやその発火規則を改良だけでは図2にあるようなスレ違ったときの問題は、ベトリネットの基本的な定義だけからは解決できない。スレ違ったときという概念そのものを検討する必要がある。すなわち、スレ違ったとき情報伝達が行われるということは、情報伝達が可能な一つのブレースを形成することができる。これは、定員が2名の一つの区画と考えてもよい。

図12は図9のモデルをさらに簡単にし、そこでのスレ違いの様子を詳しく観察したものである。この図において、“移動中である”ことを意味するブレースは、よくみると、図8の基礎モデルⅡのブレース間の関係と同じであることがわかる。このように細分化して考えると、結局、各区画に定員を持たせた、図8の基礎モデルに帰着することができる。そして、ここでまた、スレ違いの問題が発生することから、最終的には無限のベトリネットになる。したがって、ベトリネットでは解決できない問題なのである。これを解決するためには、情報伝達が可能なときには必ず情報伝達が発生するという前提が必要になって来る。この前提がなければ、スレ違ってても、情報伝達が起きる必然性はなくなる。

それでは、情報伝達が可能なときには必ず情報伝達が起こるということを、ベトリネットでは表現できないのであ

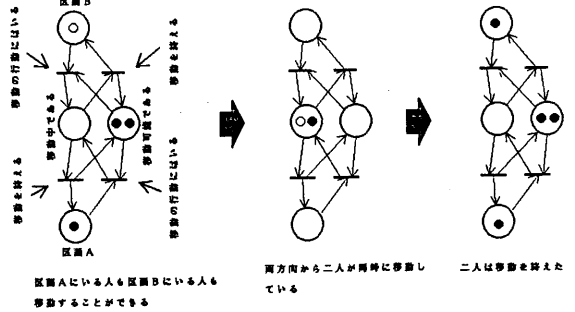
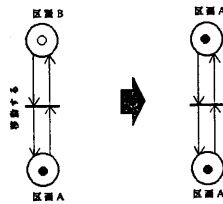


図12 移動の行動の詳細な分析

ろうか。ここでは、カラーベトリネットを用いているから、問題は複雑なものとなるが、表現できることが次のように証明できる：(1) カラーベトリネットとベトリネットは等価である。(2) このベトリネットは、ゼロテストが可能である。ゼロテストは、ある指定されたマーキングにあるかどうかをテストし、その結果に基づいて行動することである。これが可能となるためには、全てのブレースがk-有界でなければならない。k-有界であるブレースについては、対となるブレース P_i' を作り、 $\mu(p_i) + \mu(p_i')$ が全ての到達可能なマーキングにおいて一定値kであるようにすればよい。(3) k-有界というのは、ブレースの中のトークンの数が整数kを超えることがないことをいう。この場合、避難者の数はある有限の数である。従って、kは非常に大きな数字ではあるが、上限があり、整数kを超えることはない。(4) ゼロテストが可能であるならば、その結果に基づいて、強制発火させるブレースと、させないブレースを作り、そのどちらか一方にトークンを置く。これによって発火を制御することが可能である。(証明終)

従って、情報伝達が可能な状態になったとき、発火色対応の競合の中から、情報伝達を意味する発火規則を適用するように、ベトリネットでは表現することができる。しかし、到達可能なマーキングは、膨大な数であり、モデル化の限界を越えている。そこで、ここでは、発火色対応の競合を解消する上で、ある発火規則を優先的に適用することで解消することにした。これならば、シミュレーションする上で簡単にできる。

具体的には表5の発火規則のうち、発火規則◎～◎を優先的に適用することである。これらの規則が適用される際には発火色対応の競合が発生するのであるが、この時必ず情報伝達の発火規則◎～◎を優先しなければならない。これによって、スレ違いの問題は解決された。

なお、同じ手法で、今までに述べてきた全ての基礎モデルにおけるスレ違いの問題は解決できる。

以上で、基礎モデルの構築は終了する。次章ではこのモデルを用いて具体的なシミュレーションを行う。

6. 避難行動シミュレータとシミュレーション

5章で述べた避難行動基礎モデルⅢを基本にして、ここで実際にシミュレーションを行う。シミュレーションモデルの構築に当たり、対象とする実物をもとにどう基礎モデルを生かしていくかが重大な問題である。

6-1. 対象の選択とベトリネットモデルの構築

避難行動については、複雑な上まだ解明されていない点も多く、完全な避難行動モデルを構築することは不可能に近い^[11, 12, 13]。ここでは次に示す点に限って考慮することにした。

- ・情報を入手してから、状況を把握するまで一定の時間がかかる。
- ・状況を把握してはじめて行動に移る。
- ・避難行動は、明るい方向、解放空間の方向、非常サインの方向のいずれかに向かうものとする。

モデルを構築する上で、基本となる建築物については、人が多く集まりやすいデパートを例に取り上げ、そのうちのある一つの階層について選んだ^[18]。通常、高層建築の避難をシミュレーションする場合にも、一つの階層ごとにシミュレーションを行い、それらを階段で結合する場合も、平面的に考えることができるので、一つの階層についてのみシミュレーションすることが基本となる。

図13に示すように、平面図をもとにして、まず人間が通路として利用できる空間を取り出し、その空間について2メートル四方ぐらいのブロックに分けることを行う。ここで2メートル四方ぐらいの空間とは、人間が実際に認識できる空間とは、十数メートル先ぐらいまでといわれており、これがパニックの状態となると人間の視野は急激に狭くなり、数メートル先ぐらいしか認識できないといわれていることによる。

そのブロックごとにベトリネットのブレースに対応させて、そのブロックごとの関係をブレース間の関係としてトランジションに対応させる。図14には、このようにして構築したベトリネットモデルを示す。

また、先に述べた個人の選択志向については、各ブロックにおいてどのような行動をするか考え、ブロック間の関係として人間の移動の条件を加えた。

空間での人間は、出口を知っている従業員などと出口を知らない一般客を想定した。空間の移動では、出口を知っている人は、出口を知らない人にたいして情報を伝達しながら出口へ向かう。また、出口を知らない人は、自由に移動するようにした。これは、本来なら、解放空間や通路の方向に向かうのであるが、個人の経験や学習によって行動に相違がみられるため、今回は、簡略化のため省略した。

6-2. 発火規則の再検討

発火規則については、先に議論したが、ここではシミュレーションを行うにあたっていくつかの前提を導入したこともあり、発火規則について再検討を行う。これによって、シミュレーション実行時間などについて、有効に働くものと思われる。

発火規則については、3種類設定した。これは、避難経路が複数考えられる区画があることを考慮してのことである。具体的には、火災を認知していない人にとっては自由に動き回れるが、火災を認知している人は、一方についてのみ移動できる規則と、どちらへも移動できる規則である。この他、出口とそれに隣接する区画との間のトランジションについて、全ての人が一方に（出口に）移動できるような発火規則を考えた。これらの発火規則を表6(a),(b),(c)に示す。これらの表で、I~IVの数字

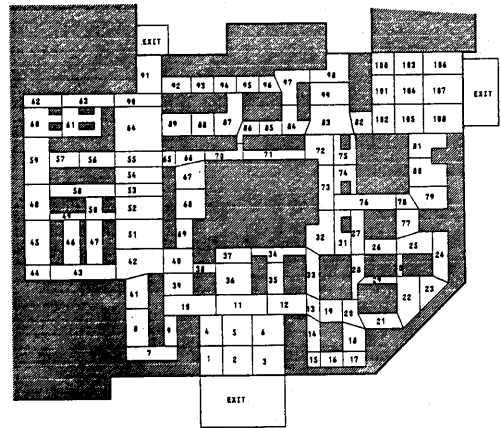


図13 平面図のブロック化

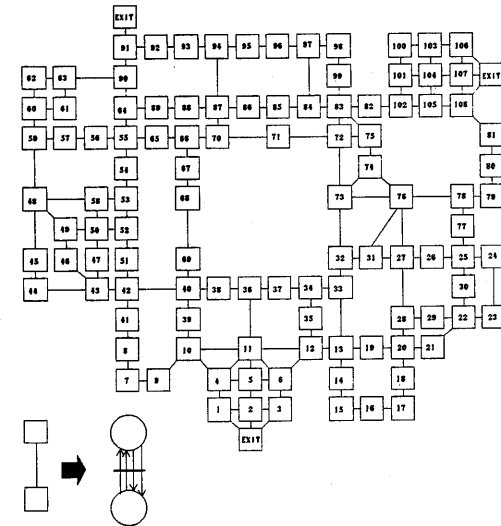


図14 デパートのベトリネットモデル

は、トランジションに入力または出力されるアークに対応する番号である。この番号に相当する番号のアークによって結び付けられるブレースのトークンがこの表に対応している時、そのトランジションは発火可能である。トランジションが発火すると、その発火させた発火規則の出力規則にしたがって、それぞれの番号に対応して、ブレースにトークンが加えられる。

ここでは、先に議論した結果から、1ステップに移動できるのは、1人に限った。これによって、発火規則は簡略化され、またすれ違いの問題はなくなる。なお、他の発火規則より優先される発火規則は、右に*印を記した。

表6 発火規則A, B, C

(a) 発火規則A (火災を認知している人は出口の方向についてのみ移動する)

発火規則	入力トークン		出力トークン	
	I	IV	II	III
1	○×	◎×	○×	◎×
2	◎×	○×	◎×	○×
3	○×	××	××	○×
4	××	○×	○×	××
5	●×	◎×	●×	◎×
6	○●	●●	××	××

(b) 発火規則B (どちらにも避難可能, 火災を認知している人も両方向に移動可能)

発火規則	入力トークン		出力トークン	
	I	IV	II	III
1	○×	◎×	○×	◎×
2	◎×	○×	◎×	○×
3	○×	××	××	○×
4	××	○×	○×	××
5	●×	◎×	●×	◎×
6	◎×	●×	◎×	●×
7	○●	●●	××	××

(c) 発火規則C (出口にかかわる発火規則, 常に出口に向かう)

発火規則	入力トークン		出力トークン	
	I	IV	II	III
1	○×	××	○×	××
2	●×	××	●×	××

○：情報無し ●：情報有り ×：無色トークン
◎：入ることのできる人数の余裕を示す

6-3. 避難行動モデルのシミュレーション

図14のベトリネットモデルを実行する場合, どのトランジションがどの発火規則に従うのかを決めなければならない。しかし, 紙数の関係でその詳細は省略する。基本的な規則の組み立ては次のように定めた。即ち, 情報を持っている人は非常口の方向に向かうものと仮定して, 非常口の方向が明らかなものについてはその方向にのみ向かうものとし, どちらに入っても非常口にいけるときは, 情報を持っていても, 自由に動けるようにした。これは, 滞留が発生したときに, 迂回できる機能をもたせるためである。この時, 情報を持った人がうろうろしないように, 規則Aと規則Bとを交互に配置した。

これらの発火規則をもとに, 初期条件として, 各区画の定員を9名とし各ブレースに9個ずつ“◎”のトークンを置く。また, “×”のトークンは, 十分にたくさん(9999個)を置く。各区画にいる人の数は, シミュレーションの開始時に情報を持たない人, 持っている人の人数を指定することにより, 乱数によって各区画に様に分散配置することにした。また, 情報のない人は, いつまでも火災に気が付かないおそれがあることから, 避難開始後一定時間経過すると情報を持った人に準ずる行動をとる方が自然であると考えた。

この例は, 情報を持っている人が20人, 情報を持っていない人が480人としている。ここでは紙数の関係で示すことができないが, 種々の場合についてシミュレーションを行ってみると, 情報を持っている人が多ければスムーズな情報伝達が行われることは必ずしも言えない。この例では滞留の発生はみられるものの, 情報伝達はス

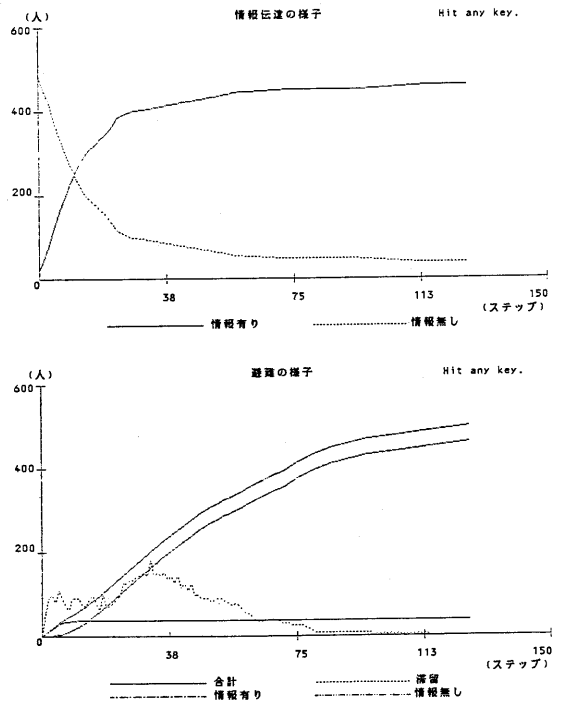


図15 シミュレーション例 (情報を持っていた人=20人, 持っていなかった人=480人)

ムーズに行われていることがわかる。これは, 密度が濃いいため, 情報を持っている人と持っていない人が同じ区画に居合わせる確率が高いことによるものと考えられる。

また, 同じ区画にいることのできる人数に制限を設けたのにもかかわらず, 情報伝達は制限の無いときとほぼ同等に行われている。このことから, 全体に分散している状態で, 一つの場所に集中しなくても, 情報伝達に大差が無いことが考察される。このことは非常に興味深いことといえよう。

これに対し, 少人数の時は, 情報伝達がスムーズに行われたとはいえない。このようなときには, 滞留の発生していないことを利用して, 十分な避難誘導が行われることに期待するものとする。

この他にも, 実行中の画面より, 滞留は, 合流点よりも, その近傍に発生しやすいことがより鮮明にわかった。

7. むすび

本論文では, ベトリネットを用いて緊急避難行動のモデル化を試みる基本的な点について論じた。人間の情報処理過程そのものの研究が進んでいないこともあって, まだモデル化の面で多くの問題点があるものと思われる。しかし, 基本的なアプローチとしての初期の目的は十分に達成した。今後さらに, この種のモデル化をより現実

な姿に近付けるには、その人のそれまでの経験にたちかえらなければならない。そしてその経験はプロダクションルールで表現することができる。プロダクションシステムとペトリネットとは等価であることが知られている。この研究で構築したペトリネットでは発火規則がプロダクションルールで表現されたものと同じ働きを持つ。そして、その発火規則に一部ではあるが乱数を用いて発火色対応の競合を解消している。これはある入力の結果起こりうる事象に一定の生起確率を与えたことになる。すなわち、一種のファジーシステムである。この方向からのアプローチは今後の検討課題としたい。

今後の課題としては以下の点が考えられる。

まず、先にも述べた時間ペトリネットについて基本的な特性について研究を進める必要があるといえる。

次に個人の情報処理について一部でもよいかからモデル化に挑戦してみたい。これには数々の難題が待ちかまえているがモデル化を試みる価値はあると思う。例えば、文献[4]程度の情報処理過程ならばペトリネットによるモデル化も比較的容易であると考ええる。コンピュータの能力に制約があるものの(文献[4]ではミニコンピュータ VAX-11/780を使用しているのに対し本研究ではパソコン PC-9801VM/VXを使用している)不可能ではないと考える。

今後、以上に述べた点について考慮すると共に、この研究成果を各方面に応用していきたい。

文 献

[1] J.L.Peterson: "Petri Net Theory and Modeling of Systems", Printice-Hall, Inc.(1981).
市川, 小林訳: "ペトリネット入門", 共立出版.
[2] 池田兼一: "緊急時の情報処理", 東京大学出版会(1986).

[3] 渡辺: "認知科学序論", 東京大学出版会(1986).
[4] 仲谷, 荒屋: "社会的相互作用を考慮した避難行動の情報処理的シミュレーションモデル" 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.4, pp.471-478(1986).
[5] 仲谷, 荒屋: "情報処理的アプローチを用いた避難行動シミュレーションモデル", 情報処理学会論文誌, Vol.26, No.4, pp.609-616(1985).
[6] 椎塚, 末永, 中田: "ペトリネットによる待ち行列システムのモデル化", 電子通信学会ネット理論研究会(第1回), 1986年5月.
[7] 椎塚, 飯島: "カーペトリネットによる行動モデル", 電子通信学会ネット理論研究会(第2回), 1986年12月.
[8] 椎塚, 飯島: "並行システムによる行動モデル", 日本シミュレーション学会第6回シミュレーション・テクノロジ・コンファレンス, 1987年6月.
[9] 椎塚, 飯島: "ペトリネットによる避難行動モデルへの基礎的アプローチ", 情報処理学会全国大会, 昭和62年9月.
[10] 椎塚, 飯島: "ペトリネットによる情報伝達モデル" 電子通信学会情報・システム部門全国大会, 昭和62年12月.
[11] 吉原, 他: "ビル避難群集流のシミュレーション", 日立評論, Vol.58, No.12 (1983)
[12] 山元, 他: "避難誘導システム", 日立評論, Vol.58, No.12 (1983)
[13] 小栗, 他: "ビル火災に対する避難誘導システム", 日立評論, Vol.62, No.2 (1987)
[14] 安倍北夫: "パニックの心理", 講談社(1974)
[15] 東京大学新聞研究所編: "災害と人間行動", 東京大学出版会(1982).
[16] 岡田, 他: "建築と都市の人間工学", 鹿島出版会(1980)
[17] 森喬: "商業施設設計資料集", オーム社(1976)
[18] 小林重信: "駆動事象形システムと知識工学", 電気学会雑誌, 103, 3, pp.199-203(1983).