

ペトリネットのシミュレーションへの応用 〔Ⅵ・完〕

——ビルにおける避難行動シミュレーション——

椎塚 久雄

今回は、カラーペトリネットの新しい応用として最近の話題の中から、ビルの火災等における避難行動モデルの構築法とそのシミュレーション事例について紹介する。また、最後にペトリネットツールに関する内外の最新情報についてもふれる。

13. ビルにおける避難行動モデル

近年、ビルの高層化が進行している中で、当然のことながらそのセキュリティの問題に関心が向けられている。特に、火災などの緊急時における避難行動については重要な課題とされている。筆者の勤務する工学院大学新宿キャンパスは、昨年8月に地上130メートル29階建ての超高層校舎に生まれ変わった。筆者の研究室は23階にあり、展望室のような見晴らしである。もちろん、セキュリティについては万全を期して設計されているが、周囲に建ち並ぶ新宿の超高層ビル群を眺めていると、ビルにおける“避難モデル”についてわれわれはより大きな関心を持たなければならないことを実感している。

ここでは、この種の問題に対する新しいアプローチとして、カラーペトリネットによる避難行動モデルの構築とシミュレーション事例について述べる。

13.1 避難モデル

緊急時における人間の行動・情報処理に関するこれまでの主な研究としては、まず群集流の理論にもとづくものがあげられる[30]。この方法によって、避難時における滞留や全体の避難時間を知ることができ、パニックの発生を予測することが可能となるが、現実を正しく再現できない欠点がある。群集流は、いわば「流れに乗って」すべての人が行動を起こすことを前提としている。

一方、認知科学の発展で、個人の情報処理システムの

解明が進んできた[29]。文献[31]では、緊急時における行動を個人の情報処理過程から Prolog を用いて避難行動をシミュレーションしている。しかし、これらの方法では規模の大きなモデルの構築に限界がある。また、最近の事例として、建築設計の観点から SLAM II によるシミュレーションモデルの研究[34]、最大流問題や最小費用流問題を適用した避難モデルの研究[35]なども興味ある結果が得られている。

13.2 カラーペトリネットによる避難行動の基礎モデル

ペトリネットを避難モデルへ適用した最初の報告は文献[32, 33]にみられる。ペトリネットによる避難モデルは、ペトリネットの持つ利点を有効に使うことで、より現実に近い状況をシミュレーションによって再現しようとする狙っている。すなわち、ペトリネットを用いて個人の情報処理過程について基本的なところから忠実にモデル化し、緊急時における人から人への情報伝達・避難行動の様子をシミュレーションによって明らかにすることである。そのためには、人間の行動が並列的にかつ非同期的に行なわれていることに着目し、行動を起こす人にある種の情報を持たせるために、カラーペトリネットによるモデル化が適している。

ペトリネットで人間の動きを表わすために、ある限られた空間をプレースに対応づけ、そこにいる人間をトークンに置き換えて考える。人間の持つ情報の違いはカラートークンを割り当てることで識別する。トランジションが人間の動きをコントロールする役目を果たすことになる。トランジションは、トークンの数だけでなくトークンに付加されたカラーの情報によって、発火規則を設定してトークンの流れをコントロールする。

普通、人間が出口などの情報を持っていれば、そちらに行こうとする。しかし、ペトリネットにおけるトークンに「出口の情報を持っている」というカラーをつけただけでは、トークンは出口に向かって動いてくれない。

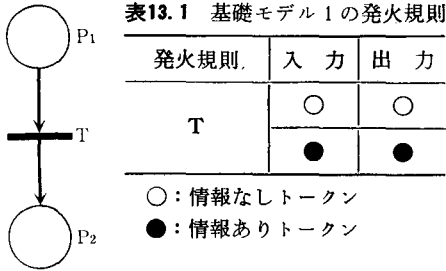


図13.1 基礎モデル1

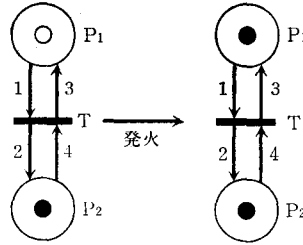


図13.2 基礎モデル2の例

表13.2 基礎モデル2の発火規則

発火規則	入力	出力
T	○	○
	○	●
	●	○
	●	●

つまり、トークンカラー（この場合は出口に関する情報を持っているというカラー）に対してのプレースの配置とトランジションの発火規則によって、トークンを出口に導かなければならない。出口に関する情報を持たない人は、途中で情報を持っている人に会えば情報が伝達され、出口に向かって移動しようとする。これをトークンの動きで表わすと、情報を持たないカラーのトークンが途中で情報を持っているというカラーのトークンに出会えば、情報を伝達（つまりカラーが変わる）され出口に向かうことになる。

図13.1に示す基礎モデル1は、非常に狭い通路などの一方通行の場合であり、双方向の通行を表わすことはできない。この場合は、表13.1に示すように情報の伝達は起こっていない。しかし、火災などのときに反対方向から来る人に出会わないとは言いきれない。これを改善するために、基礎モデル2として図13.2に示すように、少なくとも各方向に2本以上のアークが必要になり、これに伴ってトランジションの発火規則も増加する(表13.2)。

2つのトークン“○”と“●”が出会うということは、情報の伝達が行なわれることに相当し、有用な情報の伝達が行なわれたならば、情報を与えた人と情報を得た人が違う方向に向かうのは不自然である。つまり、情報を持った人同志がスレ違った後、別々の方向に向かったのでは出口にたどり着かせるのも困難になる。

さらに、この問題を解決するために図13.3に示す基礎モデル3を導入する。このモデルでは、情報を得た人は情報を伝達してくれた人と同じ方向に向かうようにしている。しかし、1本のアークが1個のトークンを導くので、トランジションが発火するには双方のプレースに2個以上のトークンが存在しなければならない。この矛盾を取り除くために“無色トークン”(transparent token)なる概念を導入する。これは、情報の有無などの属性を持つカラートークンに対して、“情報の有無”という情

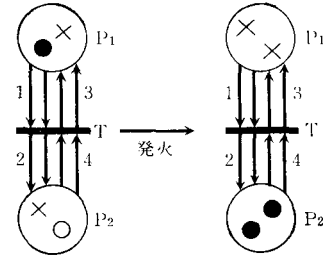


図13.3 基礎モデル3の例

報さえたないトークンで、たんにトランジションの発火に関与するだけのトークンである。無色トークンを各プレースについて、全体の避難者に対して十分に多い数を初期値として配置しておくことで、カラートークンが不自然な動きをしないようにコントロールすることができる。そのさい、表13.3のようにトランジションの発火規則に無色トークンを含めた規則を加えなければならない。

表13.3 基礎モデル3の発火規則

発火規則	入力	出力			
T	1	4	2	3	誰もいない
	○	○	○	○	たんなる移動
	○	○	○	○	たんなる移動
	○	○	○	○	たんなる移動
	○	○	○	○	たんなる移動
	○	○	○	○	たんなるスレ違い
	○	○	○	○	避難
	○	○	○	○	スレ違いのさいに情報伝達と避難

×：無色トークン

13.3 対象の選択と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。ここでは次に示す点に限って考慮する：

- 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1つのフロアを選んだ(文献[36], p.45参照)。通常、高層建築での避難をシ

ミュレーションする場合にも、1つのフロアごとにシミュレーションを行ない、それらを階段で結合すれば、平

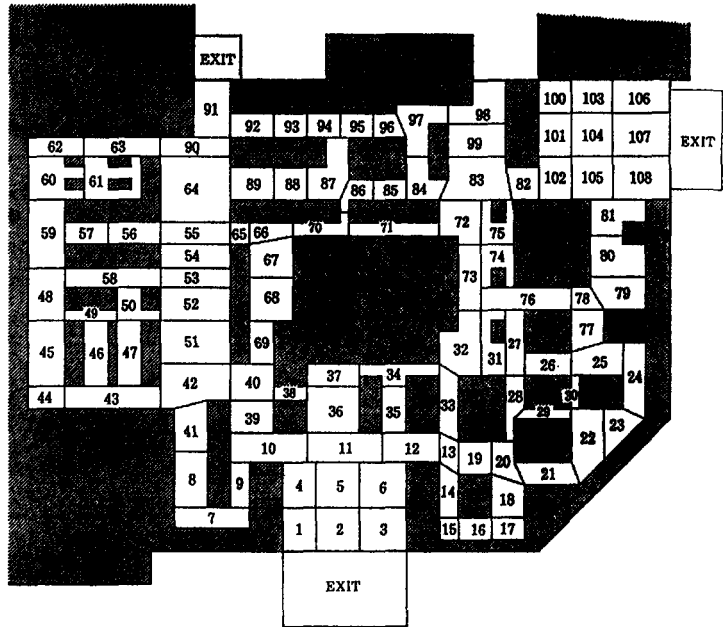


図13.4 平面図のブロック化

面的に考えることができるので、1つのフロアについてのみシミュレーションすることが基本となる。

デパートの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。これを行なった結果を図13.4に示す。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は十数メートル先ぐらいまでと言われており、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言われていることによる。各ブロックをそれぞれベトリネットのプレースに対応させ、ブロック間の関係をプレース間関係としてトランジションに対応させる。図13.5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。

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、ブロック間関係として人間の移動の条件を加える。これは発火規則によって定めることができる。空間での人は、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

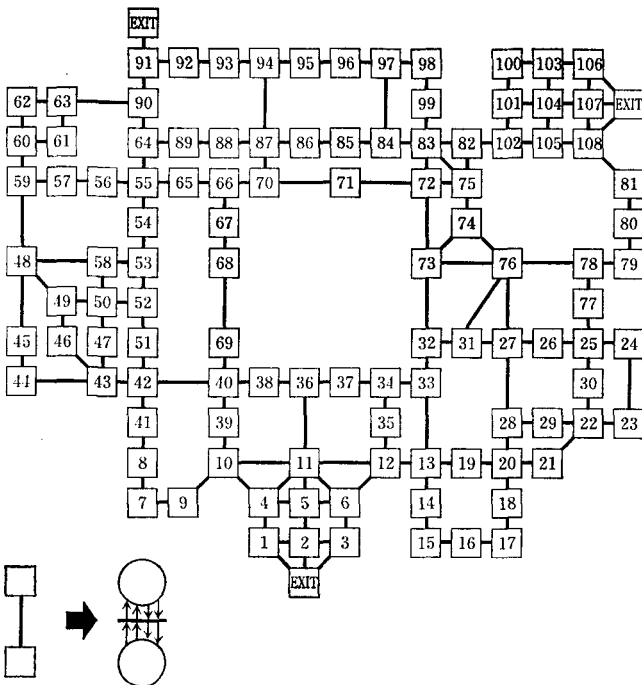


図13.5 デパートのベトリネットモデル(ただし、トランジションとプレースは左下の簡略表現とする)

口を知らない人に対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あるので、ここでは、簡略化のため省略した。

13.4 シミュレーションの実行結果の例

シミュレーションを有効に行なうために、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、①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、②どちらへも移動できる規則、③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、すべての人が一方に（出口に）移動できるような発火規則、の3つである。これらの規則の発火カラー対応が満たされれば、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、その発火規則にしたがって、それぞれの番号に対応して、出力ブレースにトークンが加えられる。ここでは、発火規則を簡略化するため1ステップに移動できるのは1人に限った。

シミュレーションを実行するためには、各々のトランジションがどの発火規則を適用するかを定めなければならない。ここでは、紙数の関係でその詳細は省く。

この発火規則は、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行けるときは、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持たせるためである。このとき、情報を持った人がうろろしないように、これらの規則を適当に配置する。

以上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、無色トークンは十分に多くの数を置く。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一樣に分散配置する。また、情報のない人は、いつまでも火災に気づ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。

シミュレーションの実行結果の一例を図13.7に示す。その1においては、初期値として情報を持っている人が5人、情報を持っていない人が45人とした。その2では、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。両者を比較すると、その2の方が滞留の発生はみられるものの、情報伝達はスムーズに行なわれていることがわかる。これは、密度が濃いため、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にもかかわらず、情報伝達は制限のないときとほぼ同等に行なわれている。このことから、全体に分散している状態で、1つの場所に集中しなくても、情報伝達に大差がないことが推察される。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な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なわれることに期待するものとする。その他にも、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ようである。

13.5 より現実的なモデル化をめざして

避難行動のより正確な状況をモデル化するには、ベトリネットの発火規則を改良すればよい。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が、ベトリネットによるモデル化の基本的なアプローチとしての初期の目的は十分に達していると思われる。今後さらに、この種のモデル化をより現実な姿に近づけるには、煙に関する情報もつけ加え発火規則を定めなければならない。事実、煙の情報も含めた発火規則を適用すると、より現実的なシミュレーションが可能となることが確認されている[37]。

14. ネットツールの動向

ベトリネットのためのコンピュータ・ツールは、汎用のものと特別用途のものを含めると、最近その数が急増してきている。Feldbrugge と Jensen がネットツールの必要性を訴えてからまだ日が浅いが [38, 39, 40]、国内外を問わずそれに対する関心が高まっている。たとえば、神戸製鋼の生産ライン制御のためのロジックコントローラ[41]、川崎重工のFMSのためのプログラミングシステム(K-ネット[42])などはベトリネットにもとづいたツールである。また、沖電気工業の EXPRESS[43]は、通信ソフトウェア開発における要求仕様化段階の自動化を行なう目的で、通信システムに対する1つのサービス要求をベトリネットを用いて、ユーザー要求からサービス仕様を作成している。

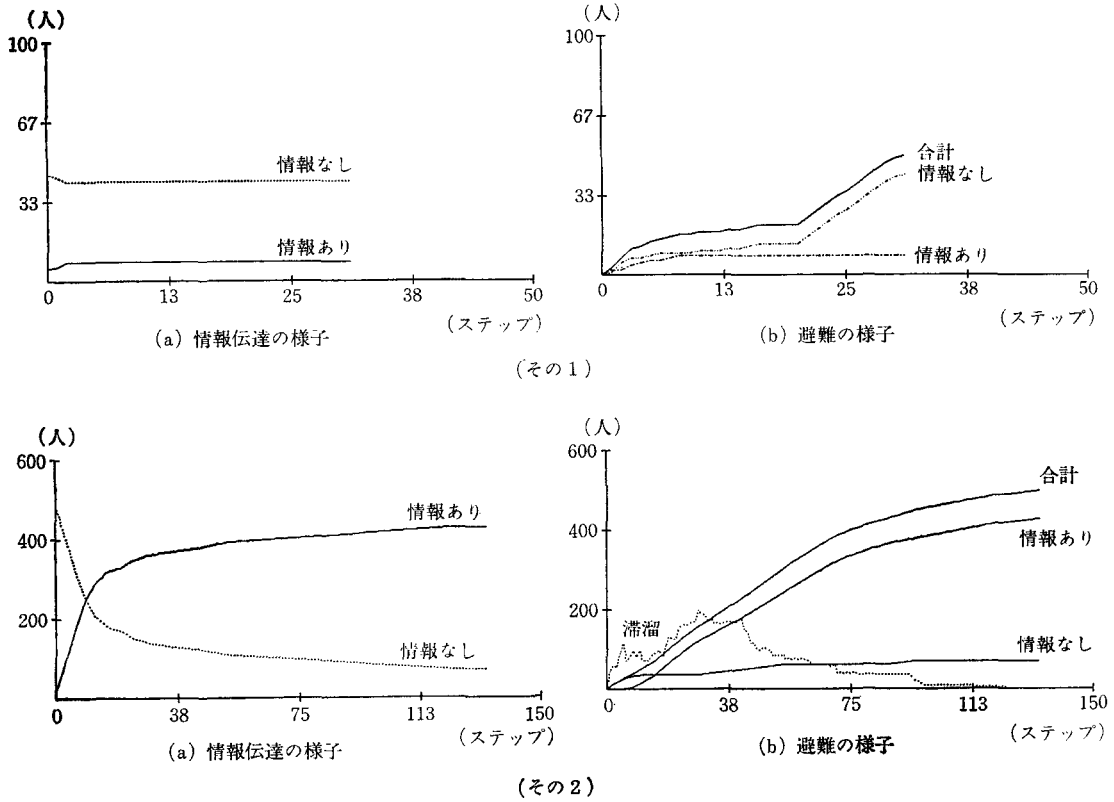


図13.6 シミュレーションの実行例

META SOFTWARE[45]は、ペトリネットツールを商業ベースにのせた最初の企業であろう。カラーペトリネットの先駆者である Jensen 教授は、大学と META SOFTWARE の両方に籍をおき、精力的にソフトウェア開発に取り組んでいる[44]。それらのソフトウェアの性能はかなり優れたものであるが、価格が高すぎるというのが難点である。今後、ペトリネットが幅広く普及するには、使いやすく安価なソフトウェアの出現に期待するところが大きい。

15. おわりに

本講座では、理論的な内容をなるべくさけて、ペトリネットの実用的な事例を中心に解説を試みてきた。ペトリネットの解析的な性質に関しては最近の話題までを含めた Murata の解説論文[46]が参考になろう。しかし、本講座の主題である「シミュレーションへの応用」ということに関しては、ある程度の目的は達しているものと思われる。はじめにも述べたように、離散事象システムのシミュレーションは、今後ますます必要にせまら

れる傾向が予想される。ペトリネットがシミュレーションツールとしてばかりでなく、離散事象システムの記述言語としての地位を確立し、いわゆる「離散事象シミュレーション理論」を組み立てる礎になる可能性を持っていることは確かであろう。(完)

文 献

- (前回までにあげたものは省く)
- [29] 池田兼一：“緊急時の情報処理”，東京大学出版会，1986年。
 - [30] 小栗正裕・吉原郁夫・山元有次：“ビル火災に対する避難誘導システム”，日立評論，Vol.62，No.2，pp.17-20，1980年2月。
 - [31] 仲谷善雄・荒屋真二：“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年4月。
 - [32] 飯島昭雄・椎塚久雄：“カラ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), pp. 49-56, 1986年12月.
- [33] 椎塚久雄・石塚裕隆: “ペトリネットによる知識情報伝達モデルとその応用”, 情報処理学会知識工学と人工知能研究会, 58-1, pp. 1-9, 1988年5月.
- [34] 上原茂男: “避難と煙流動に関する総合シミュレーションモデル”, Pritsker シミュレーション・ソフトウェアユーザ・コンファレンス '89 事例発表論文集, pp. 1-6, 1989年10月.
- [35] 伯野卓彦: “ビルにおける避難の数理モデル”, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 35, No. 1, pp. 62-63, 1990年1月.
- [36] 森喬: “商業施設設計資料集”, オーム社, 1976年.
- [37] 小谷野健治: “ペトリネットによる情報伝達モデルとその応用に関する研究”, 工学院大学卒業論文, 1990年3月.
- [38] F. Feldbrugge: “Petri Net Tools”, G. Rozenberg(ed.), *Advances in Petri Nets 1985, Lecture Notes in Computer Science 222*, pp. 203-223, Springer-Verlag 1986.
- [39] K. Jensen: “Computer Tools for Construction, Modification and Analysis of Petri Nets”, W. Brauer, W. Resig and G. Rozenberg(ed.), *Petri Nets: Applications and Relationships to Other Models of Concurrency, Lecture Notes in Computer Science 255*, pp. 2-19, Springer-Verlag 1987.
- [40] F. Feldbrugge and K. Jensen: “Petri Net Tool Overview 1986”, *ibid.*, pp. 20-61.
- [41] K. Omura, T. Takahashi and M. Konishi: “Petri Net Simulator with External Logic Controller and its Application to Production Line Control”, *The Third International Workshop on Petri Nets and Performance Models, Work-in-Progress, Kyoto, Dec. 10, 1989*.
- [42] Y. Nagao et al.: “Petri-Net Based Programming System for Flexible Manufacturing System”, *ibid.*, 1989.
- [43] K. Shibata et al.: “A Study on Verification of Service Specification in Communication Software Development” *THE TRANSACTIONS OF THE IEICE*, Vol. E71, No. 12, pp. 1203-1211, Dec., 1988.

- [44] P. Huber, K. Jensen and R. M. Shapiro: “Hierarchies in Coloured Petri Nets”, 10th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, Bonn, June 1989, pp. 1-17.
- [45] META SOFTWARE CORPORATION, *Schedule of Prices*, October 1, 1989.
- [46] T. Murata: “Petri Nets: Properties, Analysis and Applications”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 77, No. 4, pp. 541-580, April, 1989.

— 明日のシステム創りを目指す —



- ・システムプランニング、デザインからメンテナンスまで。
- 通産省認定のシステムインテグレータ
- ・活動分野は国内全業種から海外まで。
- ワールドワイドなSE活動を展開中

募集学科: 理工系各学科、文科系各学科
 職 種: システムエンジニア
 : ソフトウェア開発要員
 : 海外要員
 : インストラクタ
 : 営業、スタッフ部門要員

日立システムエンジニアリング株式会社

本社: 東京都大田区大森北3-2-16
 TEL フリーダイヤル 0120-15-2444
 九州事業所: 福岡市、新潟事務所: 新潟市
 札幌事務所: 札幌市