(17) ペトリネットによる市街地地震火災延焼シミュレーションの精度評価法に関する基礎的研究

辻原　治[1]

[1]正会員　和歌山工業高等専門学校教授（〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77）
E-mail:tsujihara@wakayama-nct.ac.jp

地震火災の延焼シミュレーションにおいては一般に延焼速度式が用いられる．延焼速度式は，物理的な根拠や過去の市街地火災の被害調査などから構築されており，ばらつきがあることは否めない．本研究では，ペトリネットに基づく市街地地震火災シミュレーションにおいて，延焼速度式に基づいて算出された棟内および棟間の延焼時間にばらつきがあるとき，解析結果としての延焼到達時間の信頼性を効率的に評価する方法を提案する．

Key Words :　*earthquake, spreading fire, simulation, Petri Net, reliability*

１．はじめに

地震火災は，同時多発的な出火や消防水利の欠如，交通渋滞や道路閉塞等の特徴を持ち，通常の火災時のような効率的な消火活動が行われることは期待できない．地震発生直後の混乱の中で，既存の消防機能を活かし効率的な消火活動を行うためには，延焼予測が重要な役割を担う．また，このような延焼予測システムの構築は，地域防災計画の策定や地域住民の地震防災に対する意識の向上にも役立つと考えられる．

延焼解析についてはさまざまな研究がなされている．地震時火災による延焼解析の研究は，延焼モデル構築の研究と，それの市街地への適用法に関する研究に分けられる．

延焼モデルの構築については，棟内及び棟間の延焼速度式を，物理的な根拠や市街地火災の被害調査に基づいて展開する研究等が行われている．延焼速度式として従来，浜田式 [1)]がよく用いられてきた．この式はもともと純木造家屋への適応を基本としたものであるが，その後，防火木造や耐火造の延焼速度式も提案されている．また，1995 年の阪神・淡路大震災の後，東京消防庁より新たな延焼速度式（東消式 97）[2)]が提案された．この式は，阪神・淡路大震災で同時多発した市街地火災の調査・検討より，建物の全半壊等による影響を考慮した延焼速度式である．さらに，地震被害を受けた準耐火・耐火造建物の延焼性状に関する検討が加えられ，新たな延焼速度式（東消式 2001）[3)]が構築されており，これが現状では最も信頼性の高い式の一つといえる．

一方，延焼モデルの市街地への適用については，従来より市街地のマクロ的な情報（建ぺい率，建物構造比率等）から，メッシュ単位で延焼拡大をシミュレートすることはなされてきた．近年の GIS の発展や延焼速度式の提案等によって，1棟ごとの延焼拡大の状況のミクロ的なシミュレーションも行われるようになった．矢野ら [4)]は，火災の延焼過程を，建物の延焼過程，隣接建物等の関係で定まる伝播過程，および着火過程に分けて捉え，独自の式を用いて神戸市の地震火災の動態をシミュレートした．東京消防庁でも，同庁が提案した延焼速度式を用いた1995年兵庫県南部地震における神戸市の延焼シミュレーションを行い，実際の延焼動態が推定できることを示している [3)]．関沢らは，解析モデルのデータ作成に電子住宅地図を用いて予め延焼経路データを作成し，地震発生後に得られる風向，風速，出火情報などの条件を入力して延焼シミュレーションを行うシステムを構築している [5)]．また，辻原らは電子住宅地図を用いた簡便なデータ作成サブシステムを組み込んだ延焼シミュレーションシステムを提案し，延焼解析に最短経路探索を導入することで，延焼経路も含めて延焼動態をシステムの中で計算することを実現している [6,7)]．さらに，辻原らは離散事象のモデル化の方法の一つであるペトリネット [8)]で市街地をモデル化し，地震時火災の延焼を簡便にかつ，同時多発火災にも対応できるシステムを構築した [9)]．

以上のように，ミクロ的な延焼解析が行えるようになってきたが，解析結果の信頼性に言及した研究はほとんどない．

延焼速度式は過去の市街地火災の調査等の経験を一

部反映しており，そこには当然ばらつきがある．したがって，延焼速度式から算出される棟内及び棟間の延焼時間は期待値であるため，それを用いて延焼解析を行った場合，結果としての延焼到達時間の不確定性を定量的に評価することは重要である．

本研究では，ペトリネットを用いた地震時市街地火災延焼シミュレーションにおいて，棟内及び棟間の延焼時間が確率変数で与えられるときに，解析結果としての延焼到達時間の不確定性を評価する方法について，効率的な方法を提案する．

２．延焼シミュレーション手法の概要

ペトリネットを適用した延焼解析法[9]の概要を述べる．

建物の平面は，**図-1** に示すような家枠の頂点と内部の一点に位置するプレースと呼ばれる円で構成される．プレース間は，**図-2** に示すように，トランジションと呼ばれる棒とアークと呼ばれる矢印によって結ばれる．アークはトランジションに向かう入力アークとトランジションからプレースに向かう出力アークがある．トークンと呼ばれる黒丸がプレース内に存在すると，そのプレースが延焼していることを表す．アークはネットワークにおける流れの方向を示しており，トークンがアークに沿って移動する．アークには重みを付けることができ，トランジションに対する入力側のすべてのプレースに貯まっているトークンの数とそれぞれの出力アークの重みが一致すると，トランジションが発火してトークンを出力側のプレースに指定された数だけ移動させる．このとき，トークンを受け取った出力プレースは延焼したとみなす．延焼解析のモデルにおいては，1つのトランジションに対する入力アークは 1 本であり，入力アークの重みとして，これを挟む 2 つのプレース間を延焼するために要する時間が割り当てられる．建物間についても，プレース間にアークとトランジションを配置することで，延焼シミュレーションの対象とする区域全体のネットワークモデルを作成することができる．アークに付与する重みの算出においては，東京消防庁の提案式（東消式 2001）[3]を用いる．なお，ペトリネットによる延焼解析手法の詳細については文献 9)を参照されたい．

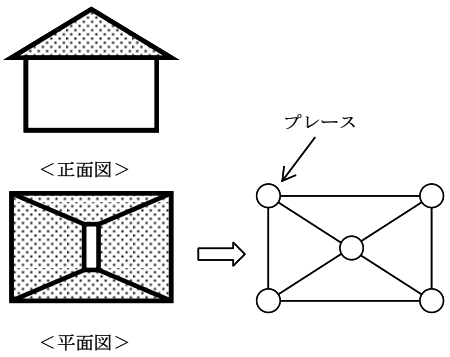

図-1 建物のモデル

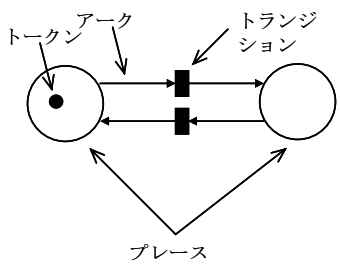

図-2 ペトリネットの基本要素

３．ペトリネットによる確率的な解析法

延焼解析にペトリネットを適用した研究においては，プレース間の延焼に要する時間をアークの重みとしてモデル化している．延焼したプレースは，１計算ステップごとにトークンを１個ずつ発生し，アークの重みと同じになったときに，トークンを１個出力プレースに送る．しかし，本来プレース間の延焼時間は，統計量などから定式化した延焼速度より計算されるものであり，ばらつきがある．したがって，アークの重みは確率変数と見ることができる．そこで，確率ペトリネット[10]を適用することが考えられる．しかし，確率ペトリネットは，トランジションの発火が可能になってから実際に発火するまでに遅延を許し，その遅延を表す指数分布確率変数を各トランジションに関連づけたペトリネットであり，本研究で扱う問題のようなトランジションの発火の条件が整う前，すなわち，アークの重みの期待値よりも少ないトークン数でも発火する可能性があることに対応するものではない．そこで，モンテカルロシミュレーションを適用することが考えられる．

以下では，２つの方法について述べる．

（１）アークの重みを確率変数とするモンテカルロシミュレーション

２つのプレース間の延焼所要時間に相当するアークの重みを確率変数として扱い，これを乱数として与え，モンテカルロシミュレーションを行う．

延焼解析は，その精度の観点から分単位の計算が現実的である．この場合，延焼解析の計算ステップは１分となり，延焼したプレース内ではトークンが１個／分で自動生成される．プレース内のトークン数が，整数の乱数で与えられた出力アークの重みと一致したとき，トークンが出力プレースに1個移動する．しかし，２つのプレース間の延焼所要時間は２分程度の場合があり，このよ

うに値が小さい整数を期待値とする整数の乱数を発生させる場合，その標準偏差にもよるが，ほとんどすべての乱数の値が期待値と同じになったり，また負値をとることが考えられる．したがって，例えば1計算ステップを1秒にし，アークの重みを60倍するなどの対応が必要である．しかし，その場合は計算時間が単純計算で60倍になる．アルゴリズムが簡単であるというメリットはあるが，規模の大きい領域を対象としてモンテカルロシミュレーションを行うとなれば，計算時間の増大は無視できなくなる．

（2）トークンを確率変数とするモンテカルロシミュレーション

ペトリネットにおいては，トークンはその有無によってシステムの状態を表すために用いられる．本研究では，延焼したプレースが自動生成するトークンを，1を平均値とする実数の乱数で与え，プレース内のトークンの値の合計が整数で与えられるアークの重みの期待値と同じか，これを超えればトランジションが発火するという方法を提案する．

この方法はファジィペトリネット[10]の一種とみなすことができる．ファジィペトリネットではプレースにそれぞれ命題が関連付けられており，その命題の真理度に応じて0～1の値を持つトークンを持たせる．各トランジションには，正しさの程度を表す確度が与えられており，それを閾値として，すべての入力プレース側のトークンの値が閾値を超えればトークンが出力側のプレースに移動するというものである．本研究で扱う問題においては，トークンの値として，アークの重みの信頼性に応じて1を期待値とする乱数で与え，トランジションに与える閾値はアークの重みの期待値と一致させることになる．この方法の利点は，（1）の方法のように分単位で計算していたものを秒単位の計算にする必要がないことであり，特にモンテカルロシミュレーションを行う場合は，大幅な計算時間の節約となり効率的である．

しかし，ここで一つ課題がある．トークンの値として，期待値1の乱数で与えることになるが，そのばらつきを設定する必要がある．具体的には，例えばある2つのプレース間の延焼所要時間が $N(\overline{w},\sigma_w^2)$ の正規分布で表されることがわかっているとき，本手法で計算を行う際，入力側のプレース内で自動生成するトークンの値の標準偏差をいくらにすればよいかという問題である．

式の誘導は紙面の都合で割愛するが，1つのトークンの標準偏差は，次式のように設定すればよいことがわかる．

$$\sigma_t = \frac{\sigma_w}{\sqrt{\overline{w}}} \qquad (1)$$

ここに，$\sigma_t, \sigma_w, \overline{w}$ はそれぞれトークンの標準偏差，アークの重みの標準偏差と期待値を表す．したがって，トークンの値は $N(1.0, \sigma_w^2/\overline{w})$ として与えればよいことになる．なお，1 つのプレースから複数のプレースに向けて出力アークが配置されている場合は，出力アークの重みに応じた標準偏差を持つ乱数を用いる必要がある．

4．数値計算例

図-3 に示す単純な解析モデルを用いて，前章で提案した(2)の方法を検証する．図において p, w, t はそれぞれプレース，アークの重み，トランジションを示す．以下では，アークの重みは期待値を $\{\overline{w}_1, \overline{w}_2, \overline{w}_3, \overline{w}_4\} = \{5,4,8,7\}$ (単位は分)とし，変動係数をすべて 0.2 とした正規乱数で表されるものとする．

p_1 のプレースを火元として，それぞれの方法で 10,000 回のモンテカルロシミュレーションを行った．

アークの重みを確率変数とする前章の(1)の方法においては，アークの重みをすべて 60 倍し，秒単位の計算を行っている．**図-4** に各プレースの延焼到達時間の平均値，標準偏差および変動係数を示している．グラフの横軸がプレースの番号で縦軸が延焼到達時間であるが，延焼到達時間は分単位に戻して表している．図より延焼到達時間の標準偏差は，火元から離れるほど大きくなっていることがわかる．一方，延焼到達時間の変動係数については，その逆で火元から離れるほど小さくなっている．このように変動係数が小さくなる傾向が見られるのは妥当な結果であり，この理由については理論的に検証することができるが，紙面の都合で割愛する．

つぎにトークンを確率変数とする前章の方法(2)を用いて解析した結果について述べる．この方法での計算アルゴリズムにおいて，一点注意する必要がある．プレース内のトークンの値の合計が出力アークの値と同じかあるいは大きくなったときに，出力側のプレースにトークンが移動する．このトークンの値を 0.5 としておく必要がある．つまり，延焼が到達したプレースは，その段階で 0.5 の値を持つトークンを持った状態で，次の計算ステップから 1 個ずつトークンを自動生成する．それは，以下の理由による．

簡単のため，プレース間の延焼所要時間の期待値が 1

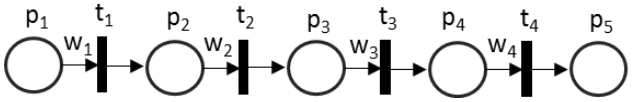

図-3 数値計算に用いるペトリネットモデル

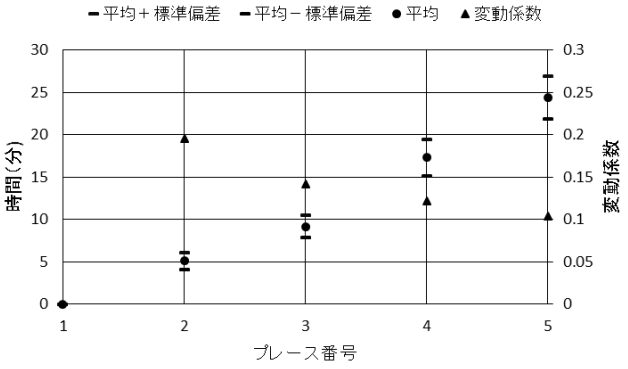

図-4 アークの重みを確率変数として解析を行った場合の延焼到達時間とその信頼性

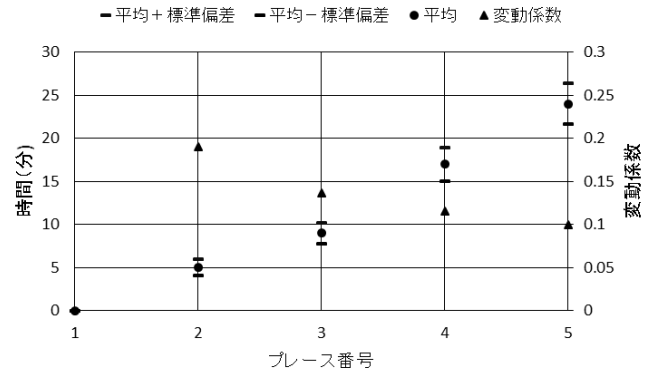

図-5 トークンを確率変数として解析を行った場合の延焼到達時間とその信頼性

分の場合ついて考える. 入力プレースに発生させるトークンの値は, 1.0 を期待値とする乱数であるから, 1 個目のトークンの値は約 1/2 の確率で 1.0 未満の値をとる. その場合 2 個以上のトークンを得て, 出力プレースにトークンを移動させることになる. モンテカルロシミュレーションを行う場合, 2 回に 1 回は 2 個以上のトークンを必要とするため, 延焼所要時間の期待値が 1 分であることと矛盾する. これは, 実数で表されるトークンの値の合計値と整数で表されるアークの重みを比較するときに, トークンの合計値の小数点以下が切り捨てられるために起こることであり, 四捨五入の効果を導入する必要がある. 延焼した入力プレースに対して最初に値が 0.5 のトークンを与えるのはそのためである.

計算結果を**図-5** に示す. **図-4** と比較すると, 同等の結果が得られていることがわかる.

５．まとめ

本研究では，ペトリネットに基づく延焼解析法において，プレース間の延焼所要時間に不確定性に起因する延焼解析結果の信頼性を評価する方法を提案し，数値計算により検討した.

以下その結果を要約する.

１）プレース間の延焼所要時間に相当する出力アークの重みを確率変数とするモンテカルロシミュレーションを行った.

２）トークンに値を持たせ，これを確率変数としてモンテカルロシミュレーションを行う方法を提案した．その際に必要となるトークンの値の標準偏差について，プレース間の延焼所要時間の標準偏差との関係式を導いた.

３）提案した二つの方法で数値計算を行い，結果として各プレースへの延焼到達時間の期待値および標準偏差を比較したところ，同等の結果が得られたことから，計算時間の観点からは，トークンを確率変数とする方法が推奨される.

参考文献

1) 日本火災学会:火災便覧, 共立出版, 第 3 版, 1997.
2) 火災予防審議会:直下の地震を踏まえた新たな出火要因及び延焼性状の解明と対策, 1997.
3) 火災予防審議会:地震火災に関する地域の防災性能計画手法の開発と活用方策, 2001.
4) 矢野公一, 松井武史, 高井広行, 坊池道昭, 上村雄二:大規模地震火災の延焼シミュレーションに関する研究, 土木計画学研究・講演集, No.19(2), pp.39-42, 1996.
5) 関沢愛, 高梨健一, 遠藤真, 座間信作, 山瀬敏郎, 篠原秀明, 佐々木克憲:リアルタイム延焼予測に基づく消防活動支援情報の出力システム, 地域安全学会梗概集, No.11, 2001.
6) 辻原治, 伏見悠生, 久堀貴史, 澤田勉:電子住宅地図を用いた簡便な地震時火災延焼シミュレーションシステムの構築, 土木情報利用技術論文集, Vol.12, pp.237-244, 2003.
7) 久堀貴史, 伏見悠生, 辻原治:電子住宅地図を用いたネットワーク理論に基づく地震火災延焼シミュレーションシステムの開発, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, I-55, 2003.
8) 例えば, 森下信: セルオートマトン, 養賢堂, 2003.
9) 辻原治, 寺田和啓, 澤田勉:ペトリネットを導入した地震時同時多発火災に対する延焼シミュレーションシステムの構築, 土木情報利用技術論文集, Vol.14, pp.129-136, 2005.
10) 奥川峻史:ペトリネットの基礎, 共立出版, 1995.