

I-16 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

Development of simulation system of spreading fire occurring simultaneously in many places in an earthquake using Petri-net

辻原治¹・寺田和啓²・澤田勉³

Osamu Tsujihara, Kazuhiro Terada and Tsutomu Sawada

抄録: 本研究の目的は、ペトリネットを適用した地震時市街地火災延焼シミュレーションシステムを構築することである。一つの建物を4個のプレースと12個のトランジションでモデル化し、入力アークには整数化された棟内延焼時間を重みとして与える。また、建物間の類焼については、隣接する建物を構成するプレース間にトランジションを設け、入力アークには整数化された棟間延焼時間を重みとして与えた。数値解析によって、ペトリネットを延焼シミュレーションに導入することで、同時多発火災にも対応できることを示す。

Abstract: The objective of this study is to develop the simulation system of spreading urban fire in an earthquake using Petri-net. A house is modeled by the 4 places and 12 transitions. The integral number which corresponds to the spreading time inside the house is allocated to each input arc. In order to represent the catching fire from next door, another transitions are prepared between the places which belong to the different houses. The integral number which corresponds to the spreading time of inter-house is allocated to the arc. It is demonstrated by numerical experiments that the simulation system can be applied to the case of fire which occurs simultaneously in many places.

キーワード: ペトリネット, 延焼, 地震

Keywords : Petri-net, spreading fire, earthquake

1. 序論

地震時火災は特殊な状況下で発生するため、通常起こる火災のときのように効率的な消火作業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火機能等を十分に活かして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、地域の常時及び地震時における耐火安全性の検討や地域防災計画の策定にも役立つものと考えられる。

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、その市街地への適用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(延焼速度式を構築する研究)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・淡路大震災における市街地火災の調査・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

1 : 正会員 博士(工学) 和歌山工業高等専門学校 助教授 環境都市工学科

(〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島 77, Tel :0738-29-8455, E-mail : tsujihara@wakayama-nct.ac.jp)

2 : 学生会員 和歌山工業高等専門学校専攻科

(〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島 77)

3 : 正会員 工博 徳島大学工学部 教授 建設工学科

(〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1, Tel :088-656-9132, E-mail : sawada@ce.tokushima-u.ac.jp)

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っている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ている^{6,7)}。

上述のミクロ的な延焼解析手法の多くは、建物群をノードとリンクから構成されるネットワークとして構築し、リンクを延焼経路とみなして、ある着火ノードから他のノードへの火災の伝搬時間を計算する方法を採用している。辻原らは、これ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)}。しかし、この方法には、地震火災の特徴である同時多発火災に対応できないという欠点があった。

離散事象のモデル化の方法にペトリネットがある。ペトリネットの概念は、1962のCarl Adam Petriによって提案され、並列的でダイナミックな事象をシミュレートできるモデル化ツールとして、工学分野においても応用例が多い⁸⁾。しかし、これまでペトリネットを市街地延焼拡大シミュレーションに応用した例はない。

本研究の目的は、ペトリネットを導入することで辻原らの方法^{6,7)}を改良し、地震時火災の延焼解析が簡便にでき、かつ同時多発火災にも対応できるシステムを構築することである。

2. 解析モデルの作成

(1) 延焼速度式

棟内及び棟間の延焼速度については、東京消防庁が提案したミクロ延焼速度式(東消式 2001)³⁾を利用した。同延焼速度式の特徴と概要を以下に述べる。

前章でも述べたとおり、東消式 2001 は 1995 年の阪神・淡路大震災における火災の状況を反映し、建物の全半壊の影響、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などが加えられた延焼速度式になっている。建物の構造形式は、裸木造、防火造、準耐火造、耐火造に分類することになっており、準耐火及び耐火造についてはそれぞれ用途に応じて3つのレベルに分類される。棟内の延焼速度は、裸木造で $V=52.1\text{m/h}$ 、防火造で $V=42.8\text{m/h}$ としている。準耐火及び耐火造については、それぞれのレベルについて、延焼距離及び区画損傷率(地震動加速度の関数)を用いて棟内の延焼速度式が与えら

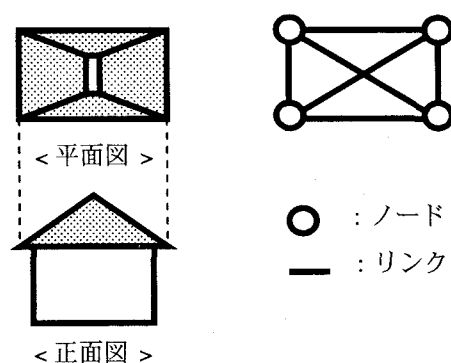


図-1 ノード・リンクを用いた建物のモデル⁶⁾

れている。隣棟間の延焼速度式としては、火元側と着火側の構造分類ごとに、地震動加速度、風速をパラメータとする関数として与えられている。なお、木造防火造系については、倒壊の状態によって異なる延焼速度式が提案されている。このような隣棟間の延焼速度の設定には、輻射受熱の計算結果が用いられている。

(2) 基礎データの作成

辻原ら^{6,7)}は、図-1に示すように4つのノードと6本のリンクで建物をモデル化した。リンクは有向であり、実際には双方向であるため、一つの建物に対して12本のリンクが設けられる。各リンクには、その長さ、風向、風速、震度などの関数として表される棟内延焼速度から、リンクの一端から他端まで延焼するのに必要な時間が割り当てられる。そして、棟間についてもノードからノードにリンクを設け、同様に、その長さ、棟間延焼速度から延焼時間が割り当てられる。このような作業はコンピュータ画面の電子住宅地図を用いて簡便に行うことができる。以下に述べるペトリネットによる解析においても、このようにして作成された基礎データを用いることができる。

3. ペトリネットによる延焼解析法

(1) ペトリネットの概要と定義^{8,9)}

ペトリネットは図-2に示すように、プレースと呼ばれる円と、トランジションと呼ばれる棒、トランジションからプレースに向かうアークと呼ばれる矢印、およびトークンと呼ばれる

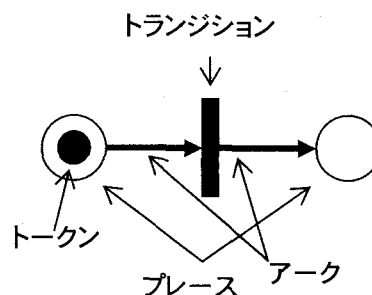


図-2 ペトリネットの基本要素

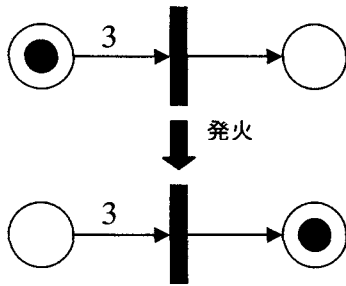


図-3 ペトリネットの発火

黒円の4つの部分で構成されている。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、トークンがそのアークに沿って移動する。アークには重みをつけられる場合があり、重みはアークの本数で表すか、アークに重みを表す数値を併記して表す。図-3のように入力アークの重みの分だけトークンが入力プレースの中にあればトランジションが発火し、トークンを出力プレースに送る。プレースはトークンが存在するか否かの2つの状態のうちいずれかとなる。

ペトリネットには並列性があり、複数の事象を同時に処理することができるため、コンピュータによる計算の効率がよい。そのため、ペトリネットは工学分野一般に広く応用されているが、土木工学の分野への適用は意外と少ない。交通流のシミュレーション¹⁰⁾などに用いられているが、延焼解析への適用例はない。また、ペトリネットの特徴として、ルールの変更や拡張が許され融通性に富んでいることが挙げられる。以下に示す方法でもペトリネットの基本ル

ルを変更して用いている。

(2) ペトリネットの市街地延焼解析への適用

建物1軒を4つのプレースで構成する。各プレース間にトランジションを配置し、またトランジションからその両側にあるプレースに向かう(またプレースからトランジションに向かう)アークを配置する(図-4 参照)。実際には、対角線方向にもトランジションとアークを配置するが、図が複雑になるので、説明の都合上ここでは省略している。

1つの建物を構成するプレース間のトランジション、アークをそれぞれ棟内トランジション、棟内アーク、異なった建物を構成しているプレース間のトランジション、アークをそれぞれ棟間トランジション、棟間アークと呼ぶこととする。それぞれのアークには、前節に述べたノードおよびリンクのモデルにおいて、相当するリンクに対する延焼時間が重みとして割り当てられる。

ペトリネットは、そもそも並列的かつ非同期的に振る舞う事象に対するグラフィックモデルとして知られているが、本研究で扱う延焼解析の問題では、延焼到達時間という時間の概念が必要である。後述のとおり、本研究で提案するペトリネットのルールでは、1 計算ステップごとにトークンを自動生成させる機能を持たせることから、計算はステップ・バイ・ステップで行うようにしている。

以下に、本研究で用いたペトリネットのルールと延焼解析へ適用する際の具体的な計算の流れについて説明する。

a) ペトリネットのルール

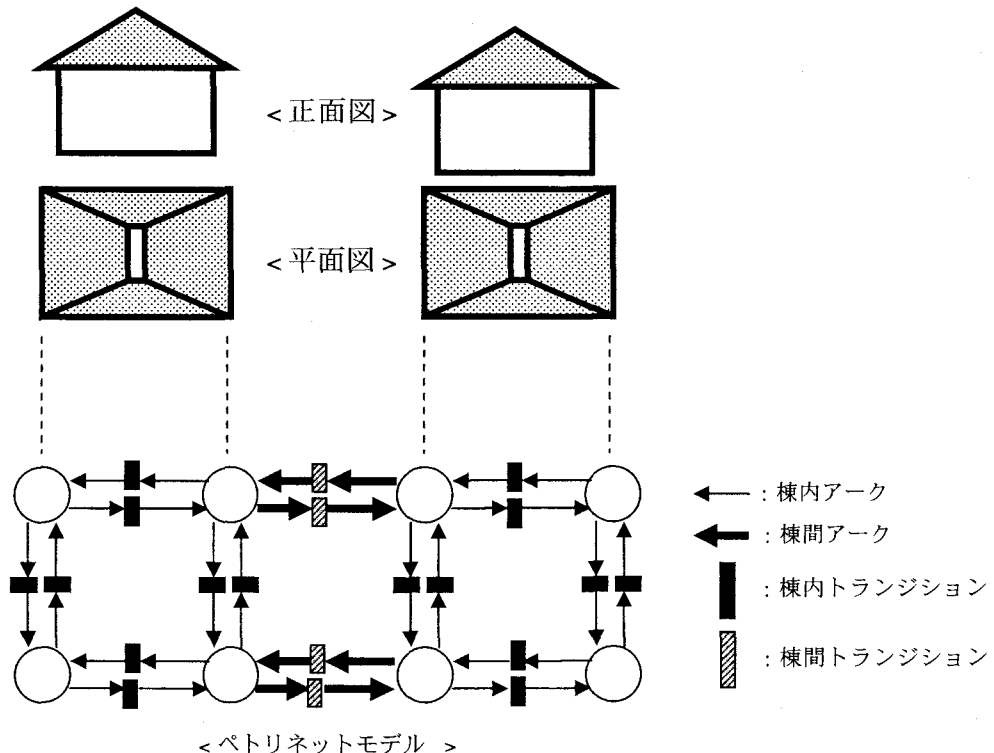


図-4 ペトリネットによる延焼解析モデル(アークの重みは省略)

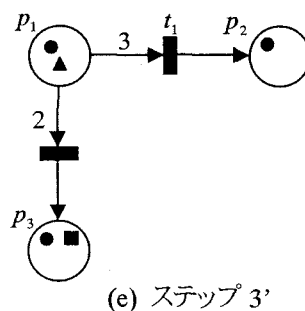
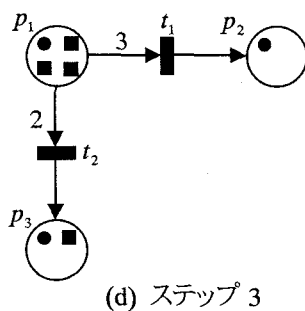
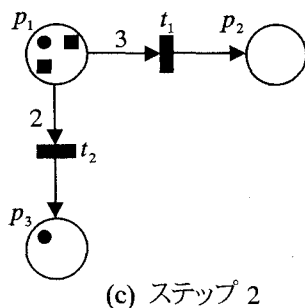
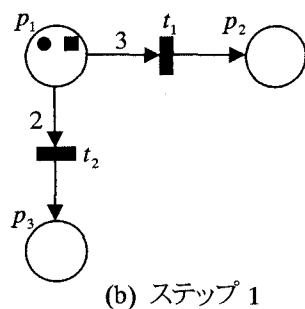
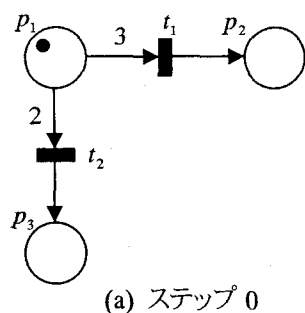


図-5 カラーペトリネットのルール

本研究では、トークンに属性を持たせる、いわゆるカラーペトリネットをベースにしている。

表-1 3種類トークンの名称と役割

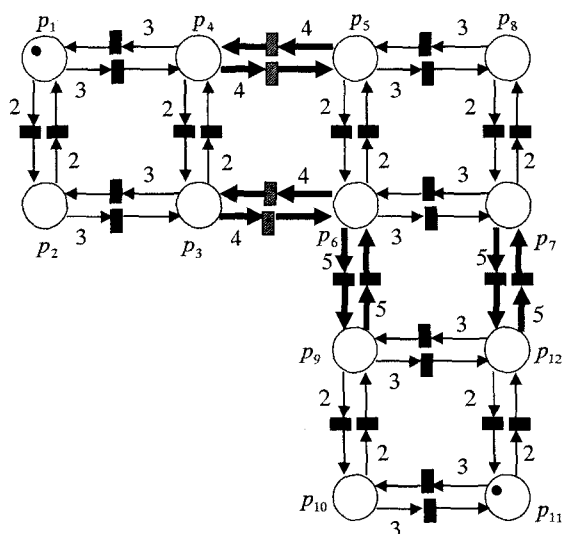
トークンの形状	名称	役 割
●	トークン A	当該プレースが着火したことを表す
■	トークン B	発火までの時間ステップのカウンター
▲	トークン C	関連トランジションからの発火が完了したことを表す

図-5 により、本研究で用いたカラーペトリネットのルールを説明する。これは、プレースとトランジションの集合 $P=\{p_1, p_2, p_3\}$ と $T=\{t_1, t_2\}$ およびアークからなる。トークンは 3 種類とし、説明の都合上、それぞれ表-1 に示す名称を付けておく。また、以下の説明において、「着火」と「発火」は区別して使っている。「着火」はプレースに延焼が到達し、燃えている状態を表し、「発火」はペトリネットの規則で、一般にトランジションが発火することを表す。

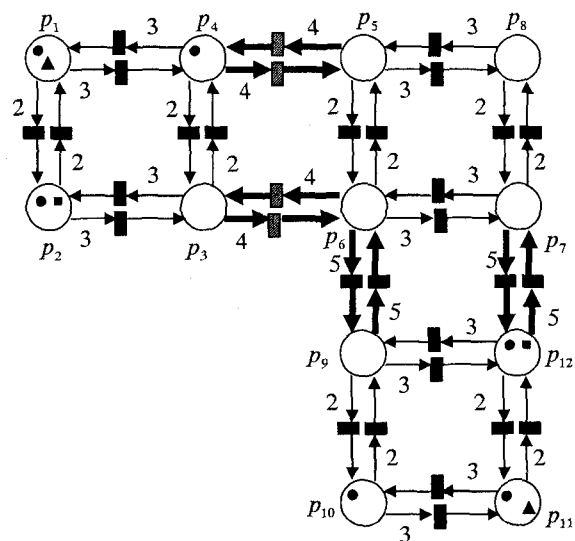
図-5 の(a)に示すような p_1 が着火した状態をステップ 0 とする。 p_1 には、着火プレースであることを表すトークン A が存在する。着火しているプレースは 1 計算ステップにつきトークン B を 1 個自己生成する。この状態が同図(b)に相当する。ステップ 2 において、2 個目のトークン B を生成する。この時点で、プレース p_1 内に存在するトークン B の個数と、 p_1 からトランジション t_2 へのアークの重みが一致し、 p_3 には p_1 のトークン A の「複製」が移動する。これが同図(c)の状態である。このときトークン B は移動せず、そのまま p_1 に存在する。さらに、次のステップ 3 において、 p_1 と p_3 のトークン B がそれぞれ 3 個と 1 個になる。 p_1 のトークン B の個数と p_1 からトランジション t_1 へのアークの重みが一致し、このとき p_2 には p_1 のトークン A の複製が移動する。これが同図(d)の状態である。この時点で p_1 から関係するトランジションへの発火が完了し、トークン C を自己生成すると同時に、 p_1 内のトークン B を消滅させる(同図(e)の状態)。

建物の延焼との関連でいえば、プレース p_1 から延焼する可能性があるのはプレース p_2 と p_3 で、ステップ 3 において、両方のプレースが延焼したことを表す。アークの重みが延焼に必要な時間(分)であり、1 計算ステップを 1 分と考えれば、 p_1 が着火してから、 p_2 と p_3 はそれぞれ 2 分後と 3 分後に類焼したことを表す。なお、トークン A が存在するプレースについては、他のプレースからトークンを受けとらないこととする。また、トークン C が存在するプレースについては、トークン B の自己生成はないものとする。

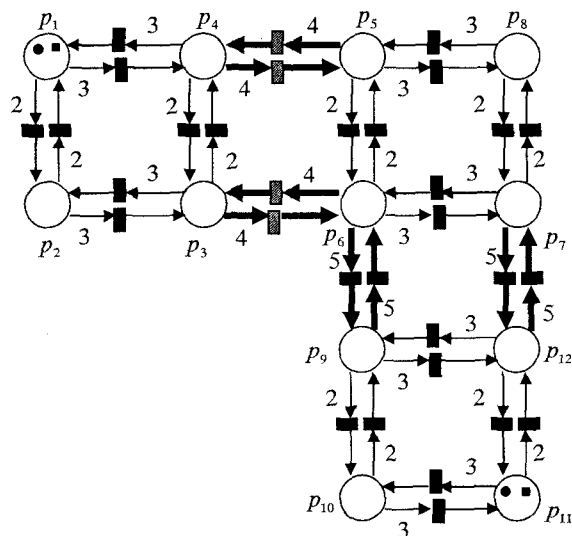
このようにして、それぞれのプレースにトークン A が移動して来たときの計算ステップ数を記憶させることで、全てのプレースへの延焼到達時間を求めることができる。また、それぞれのプレースに対するトークン A の移動元を記憶させておけば、延焼の経路を特定することも可能である。



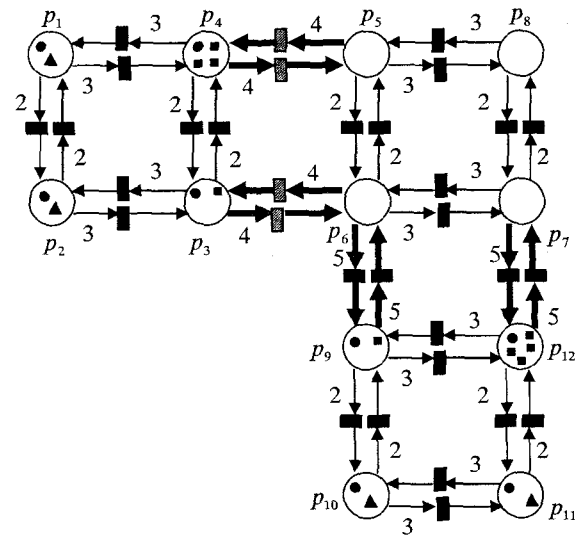
(a) ステップ 0



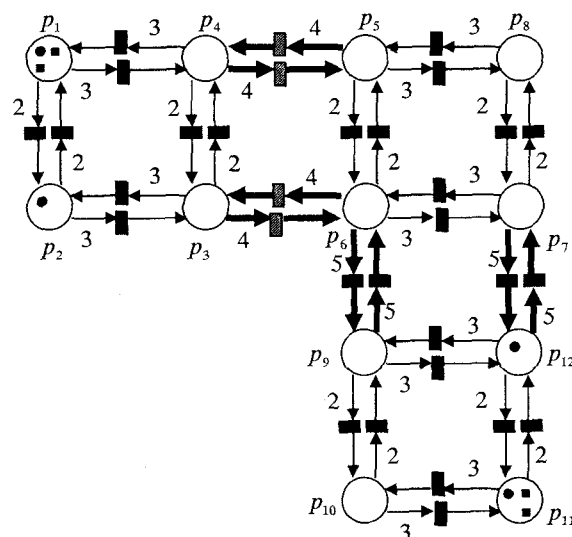
(d) ステップ 3



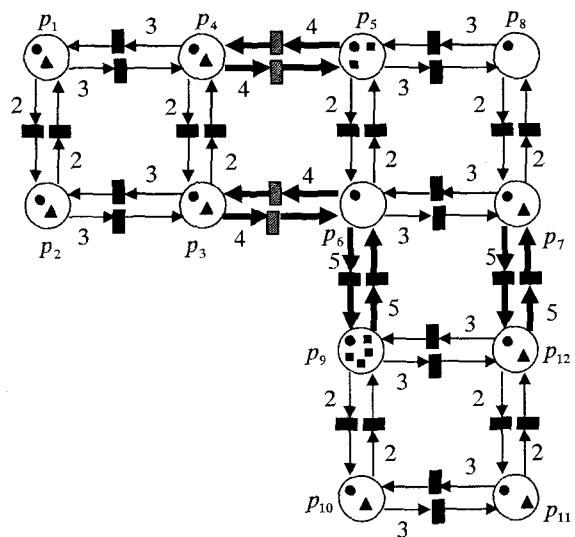
(b) ステップ 1



(e) ステップ 6



(b) ステップ 2



(f) ステップ 9

図-6 複数の着火ブレースからの延焼解析における計算ステップ 0,1,2,3,6,9 の状態

表-2 プレースの延焼到達時間

プレース番号	延焼到達時間(分)	トークン A の移動元のプレース番号
1	0	—
2	2	1
3	5	2 or 4
4	3	1
5	7	4
6	9	3 or 5
7	7	12
8	9	7
9	5	10 or 12
10	3	11
11	0	—
12	2	11

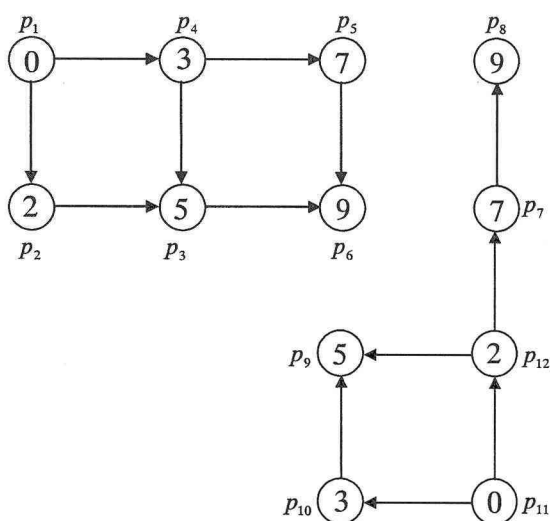


図-7 延焼経路と着火時間(プレース内の数値)

b) 同時着火の場合のペトリネットによる計算の流れ

図-6 に示すペトリネットモデルを用いて、複数のプレースが同時に着火した場合の計算の流れを示す。初期着火プレースは p_1 と p_{11} としている。図には、0,1,2,3,6 および 9 ステップにおけるマーキングを示している。表-2 にそれぞれのプレースが着火した時のステップ数を示す。9 ステップで全てのプレースが着火する。また、図-7 にプレースの着火時間(単位は分)と延焼の経路を示す。

4. 延焼シミュレーション

前章で述べたペトリネットによる解析法を用いた延焼シミュレーションを行う。

(1) ペトリネット延焼解析法と最短経路探索による延焼解析法⁶⁾との比較

図-8 に示すように規則正しく配置された 30×30 軒で合計 900 軒の建物群を対象とする。建物は裸木造で、平面

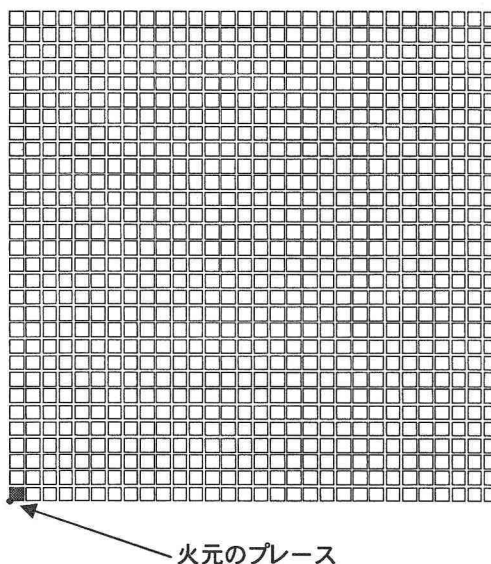


図-8 解析対象の建物群と火元のプレース

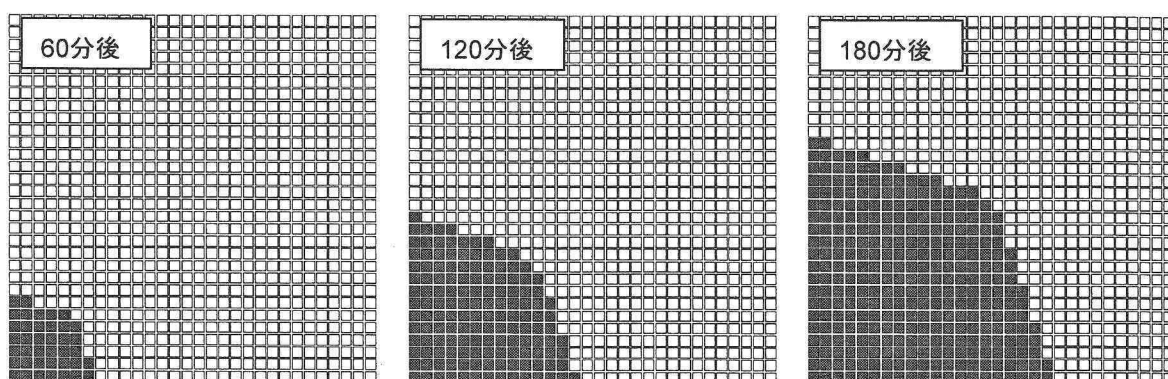
は 5×5m, 建物間隔は 1m とする。図-8 に示す左下の建物のプレースを火元として延焼解析を行う。ここでは、無風で震度 6 弱と仮定している。図-9 に解析結果を示す。火災発生から 60 分、120 分および 180 分経過後の延焼状況を示す。比較のため、最短経路探索を用いた方法⁶⁾による結果も示しているが、解析結果はよく対応している。若干の差異があるのは、ペトリネットを用いた方法において、計算の 1 ステップを 1 分相当としたため、プレース間の延焼時間を整数化したことによる。つまり、あるプレースと別のプレースの間を延焼するのに要する時間が延焼速度式から例えば 3.6 分と計算されても、アークの重みとしては小数点以下を四捨五入し、4 としているためである。1 ステップを 1 分とせず 1 秒とすれば、秒単位の計算が可能となる。しかし、延焼速度式の精度等を勘案すると、1 分単位の計算で十分であろうと考えられる。

ファイルからのデータの読み込み、計算結果のファイルへの書き込みを除き、延焼解析の計算のみに要する時間は、ペトリネットおよび最短経路探索を用いた方法ともに、1~2 秒程度であり、リアルタイムによる延焼予測への適用も可能である。

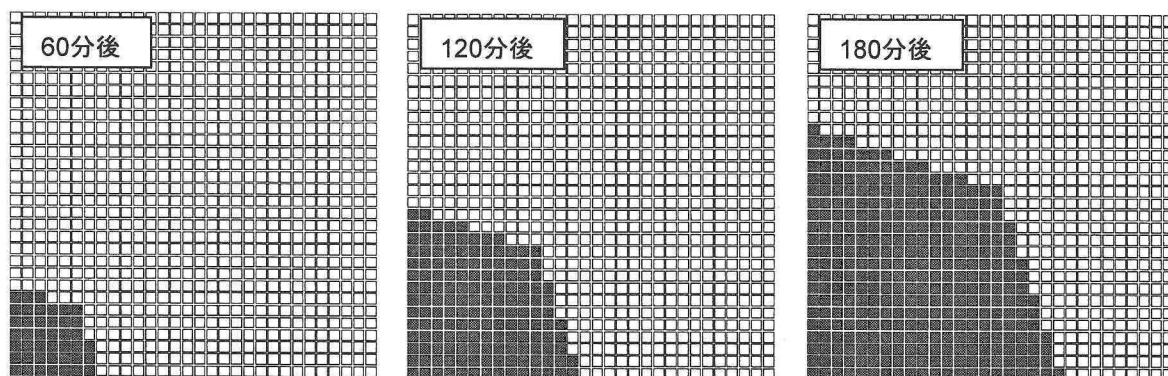
(2) ペトリネット延焼解析法の同時多発火災への適用

最短経路探索を用いた方法⁶⁾は、効率的な延焼解析を可能にする方法である。しかし、地震火災の特長である同時多発火災にこれを適用しようとする、複数の着火ノードからそれぞれ独立に最短経路探索を行い、他のノードに対して得られた複数の延焼開始時間の中から、それぞれ最短の値をもって、そのノードの延焼開始時間とすればよいように思われる。

しかし、そこには二つの問題がある。一つは、最短経路探索を、既に着火状態になっているノード(ペトリネットで



(a) 最短経路探索法によるシミュレーション



(b) ペトリネットによるシミュレーション

図-9 最短経路探索法とペトリネットによる延焼シミュレーションの比較

はプレースに相当)の数だけ繰り返し行わなければならないことである。もう一つは、複数のノードから最短経路探索を行う際、すべての経路(リンク)が有効であるとして計算が行われることである。同時多発火災であるから、別の場所で出火した火災によって建物群の一部が消失しており、ある時間経過後、その区域の延焼経路としては無効になっている状態が考えられる。しかし一般に用いられる最短経路探索は、予め設定した経路が途中で無効になるような問題を扱うことができないため、誤った結果を導く恐れがある。

一方、ペトリネットでは、ある時点の状態を次の状態に引き継ぐことができる。したがって、同時多発火災に対する対応についても、前章で述べたペトリネットのアルゴリズムをそのまま適用できる。

前節で用いた解析モデルについて、図-10 に示すように、3つの建物(合計12個のプレース)から同時に発生したことを想定して、ペトリネット延焼解析法によるシミュレーションを行った。解析条件は前節と同様に、無風で震度6弱としている。同図に、火災発生から60分、120分および180分経過後の延焼状況を示す。時間の経過とともに、出火建物を中心に延焼の広がっていくようすが表現できており、本研究で提案したペトリネット延焼解析法が同時多発火災のシミュレーションにも有効であることがわかる。

また、このようにペトリネットを用いることで、同時に発生

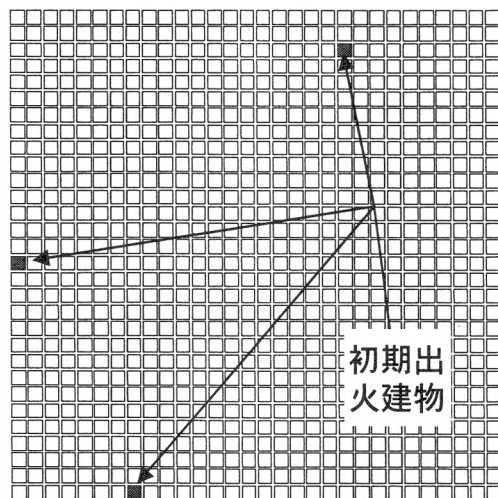
する火災のみならず、時間差をもって多地点で発生する火災の延焼解析にも容易に適応できる。

5. 結論

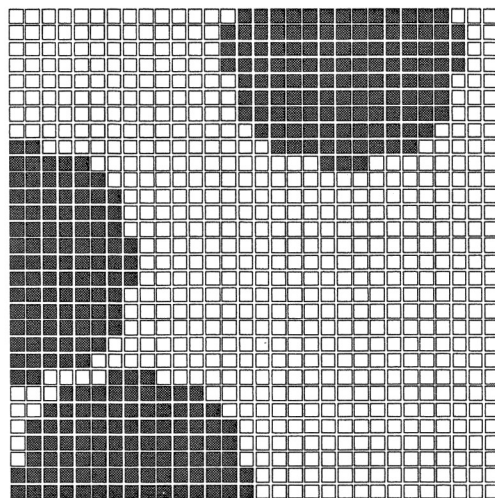
ペトリネットを用いた地震時市街地火災延焼システムを構築した。以下に本研究で得られた成果を要約する。

- 1) 地震時市街地火災延焼の解析にカラーペトリネットを導入した方法を構築した。一つの建物を4個のプレースと12個のトランジションでモデル化し、入力アークには整数化された棟内延焼時間を重みとして与えた。また、建物間の類焼については、隣接する建物を構成するプレース間にトランジションを設け、入力アークには整数化された棟間延焼時間を重みとして与えた。このようにして構築したペトリネットモデルにより延焼解析ができることを示した。
- 2) 単一の火元から最短経路探索を用いた従来法による延焼シミュレーションと比較し、本研究で提案した方法によって妥当な結果が得られることを示した。
- 3) 最短経路探索を用いた従来法では困難であった同時多発火災の延焼シミュレーションが、カラーペトリネットを導入した提案法を用いることで可能になることを明らかにした。

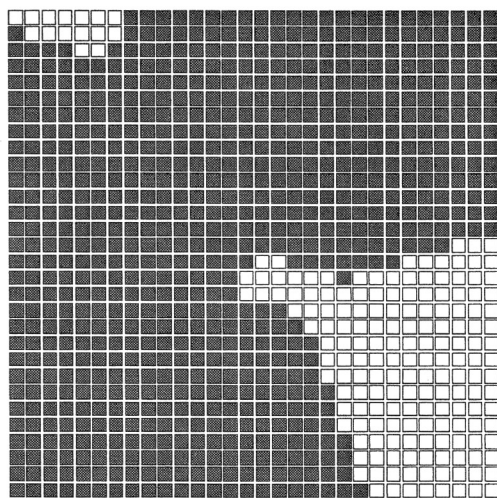
今後、実際の火災における延焼状況との比較を行い、



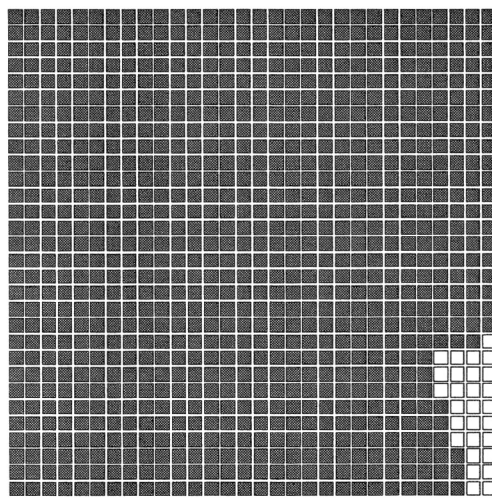
(a) 初期出火状態



(b) 出火後 60 分の状態



(c) 出火後 120 分の状態



(d) 出火後 180 分の状態

図-10 ペトリネットによる同時多発火災の延焼シミュレーション

本研究で提案した市街地延焼シミュレーションシステムの適用性について検討する予定である。

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, pp.117-120, 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, 1-55, 2003.
- 8) 村田忠夫: ペトリネットの解析と応用, 近代科学社, 1992.
- 9) 奥川峻史: ペトリネットの基礎, 共立出版, 1995.
- 10) 木俣昇, 岸野啓一, 白水靖郎: 交通流ペトリネットシミュレータの実用化システムの開発, 土木情報システム論文集, Vol.9, pp.31-40, 2000.

(2005.5.19 受付)