

- 3 地震時市街地火災延焼シミュレーションのための 解析モデル自動生成システムの開発

Development of automatic modeling system for simulation of urban spreading fire in an earthquake

辻原治¹・寺田和啓²・澤田勉³

Osamu Tsujihara, Kazuhiro Terada and Tsutomu Sawada

抄録：市街地における火災延焼シミュレーションを行うためには、解析の対象となる区域について、すべての建物を一棟毎にモデル化する必要がある。また、建物間の延焼を表現するためのモデルを作成する必要もあり、それらに要する作業は膨大になる。本研究では、電子住宅地図図を利用し、一連のモデル化を自動化するシステムを作成した。このシステムを用いれば、解析対象領域を範囲指定するだけで、地震時市街地火災延焼シミュレーションに必要なほとんどすべてのデータが作成されファイル出力される。

Abstract: Modeling of each building is required for the target area in the simulation of urban spreading fire. Some model, which expresses the spreading fire between the neighboring houses, is also required. The modeling often costs us tremendous labor and time. In this study, an automatic modeling system using the digital residential map is proposed. Almost all of the data, which are necessary for the simulation of urban spreading fire in an earthquake, are made automatically and saved in some files by just only specifying the target area in the map.

キーワード： 自動モデル化, シミュレーション, 市街地, 延焼, 地震

Keywords : automatic modeling, simulation, spreading fire, earthquake, urban area

1. はじめに

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。

延焼解析を行うためには、棟内および棟間の延焼速度を表す延焼速度式が必要で、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、現状では最も信頼性の高い式の一つといえる。それ以外にも、国土交通省総合技術開発プロジェクトによって放射・接炎、気流、火炎合流等の実験等に基づく延焼拡大の物理モデル⁴⁾等も提案されている。

一方、延焼モデルの市街地への適用について、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^{たとえは⁵⁾}。近年のGISの発展や延焼速度式の提案等によって、一棟ごとの延焼拡大の状況のミクロ的なシミュ

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)

レーションも行われるようになった。矢野ら⁶⁾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⁷⁾。辻原らは同様に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^{8,9)}。また、延焼解析にグラフ理論の一種であるペトリネット¹⁰⁾を適用することで、同時多発火災に対応できるようにシステムを改良している¹¹⁾。さらに、兵庫県南部地震における魚崎北町の延焼シミュレーションを行い、調査による延焼動態と比較している¹²⁾。

辻原らの延焼シミュレーションシステムには、2つの問題点がある。一つ目は、建物の平面形状が四角形のものしか扱えないことであり、それ以外の形状のものは、四角形に近似する必要がある。二つ目は、システムの中にデータ作成サブシステムを備えているが、コンピュータの画面に表示された住宅地図上で、建物を一棟ずつマウスにより選択する必要があり、また、建物データを作成した後、棟間の延焼をモデル化するためのリンクを作成するために、マウスでその始点と終点とを選択することも必要になることである。したがって、解析対象の領域が広い場合や、建物が密集している区域をモデル化する際には、多くの労力と時間を要することになる。また、データの作成にあたっては、ある程度の予備知識も必要になり、誰でもデータの作成ができるとは必ずしも言えない。

近年、都市域の防災性能の評価が重要視されるようになり、地震時を含めた延焼安全性を評価するための手段として、延焼シミュレーションの必要性はますます高まっている。対象とする区域のデータさえあれば、適用できるような延焼解析のアプリケーションは、上述のものも含め存在する。しかし、適用にあたって問題になるのは、やはり、それに対応したデータの作成であり、多大な労力と時間、専門知識を必要とする場合は使いづらい。

本研究の目的は、延焼シミュレーションに必要なほとんどすべてのデータが、コンピュータの画面に表示された住宅地図上で、マウスにより範囲指定するだけの操作で一括して作成できるシステムを開発することである。このシステムでは、上述の問題点の一つである建物の平面形状の問題も解決されている。なお、延焼シミュレーションには、延焼速度式として東消式2001³⁾を用い、延焼解析にはペトリネットを適用した解析法¹¹⁾を用いることを前提にしている。システムはMicrosoft Visual Basic (VB)で開発されており、電子住宅地図には Zmap-TOWN II¹³⁾、地図表示エ

ンジンには ActiveMap¹⁴⁾が利用されている。ActiveMap は、VB のフォームに、一つのコントロール(オブジェクト)として貼り付けることができ、VB で GIS ベースのシステムを開発するのに適したエンジンといえる。また、ActiveMap 用に変換された Zmap-TOWN II のデータベースを使用するために、VB のコード数行を記述する必要はあるが、それ以外の煩雑な手続きは要らない。

2. 解析モデルとペトリネットによる延焼解析法の概要

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、そのプレースが着火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、その入力側のプレースに貯まっているトークンの数と重みが一致すると、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。延焼解析のモデルにおいては、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、図-3 に示すように、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、

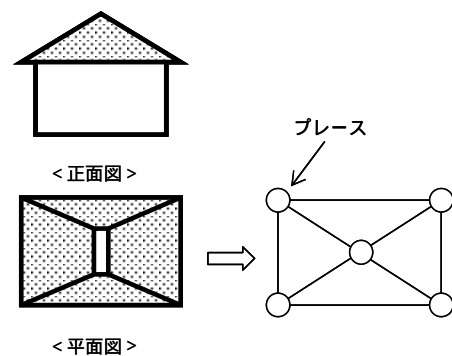


図-1 建物のモデル

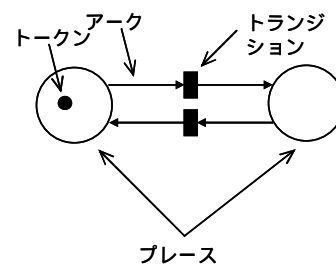


図-2 ペトリネットの基本要素

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⁾を用いている。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。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。棟内および棟間の延焼速度で該当するプレース間の距離を除することで延焼時間が算出される。これを入力アークの重みとして与える。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 11)を参照されたい。

3 . 解析モデルの自動生成

従来のシステム⁸⁾では、まず棟内の解析モデルを作成するために、画面表示された住宅地図において建物を一棟ずつマウスでクリックして家枠頂点の座標を求めさせ、そこにプレースを設ける必要があった。頂点の数が 4 を越える場合には、建物を四角形に近似するべく、マウスで適切な 4 頂点を順にクリックすることが要求された。さらに、棟間のアークおよびトランジションは、異なる建物に属する 2 つのプレースをマウスで連続してクリックすることによって設定される。これらの作業は、建物の数とともに増大し、無視できない程度の労力を伴うことになる。

そこで、これらの作業を一括して行えるように従来のシステムを改良した。改良したシステムにおいては、煩雑なデータ作成の作業から完全に解放され、画面表示された住宅地図において、解析対象領域(多角形)をマウスでクリックし指定するだけで、棟内および棟間のモデル(プレース、アークおよびトランジションの配置)が自動的に生成される。

解析モデルの自動生成の例を示す。図-4 は電子住宅地図の画面表示である。この画面上で、図-5 に示すように解析対象領域の範囲指定をマウス操作で行う。それだけで、図-6および7に示すように棟内のモデルおよび全体の解析モデルが自動生成される。なお、図-6 および 7 にお

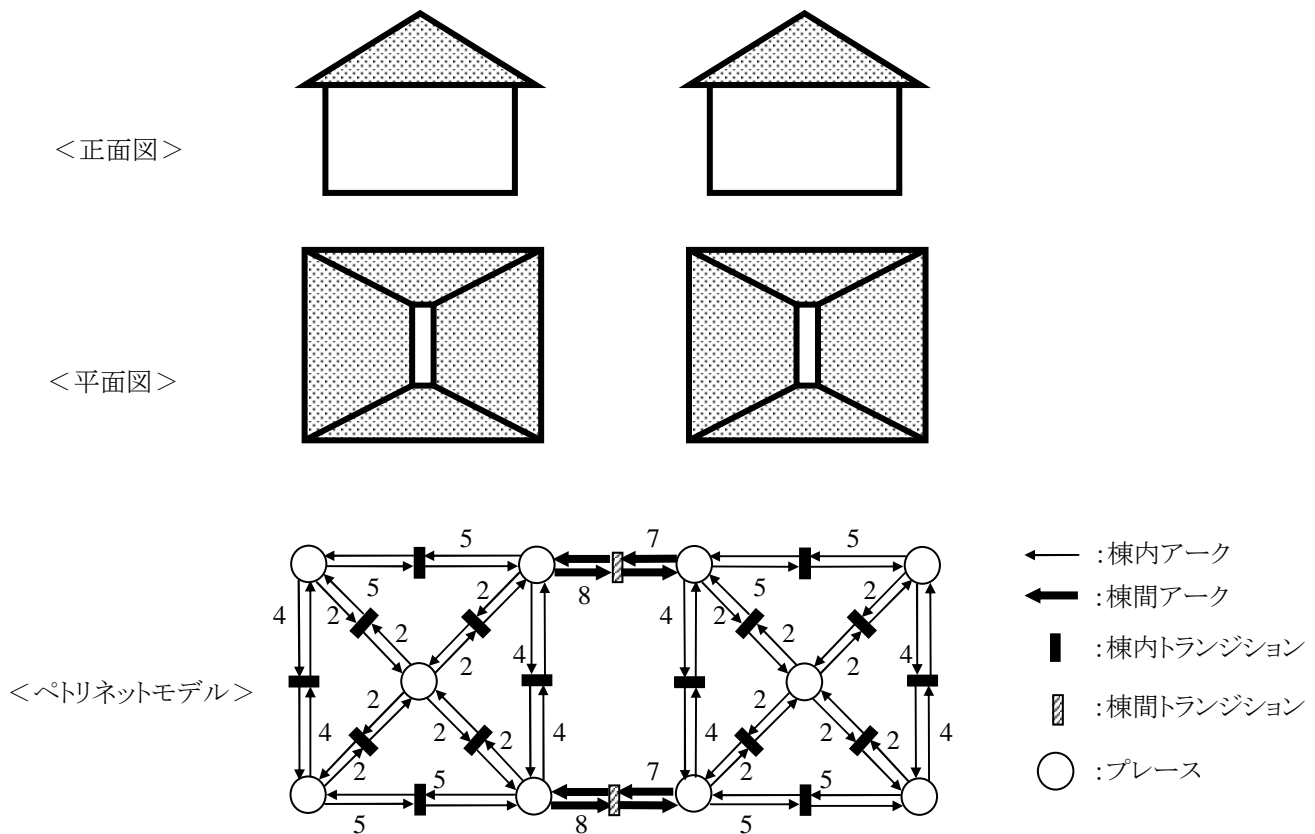


図-3 ペトリネットによる延焼解析モデルの概念図



図-4 住宅地図の表示画面

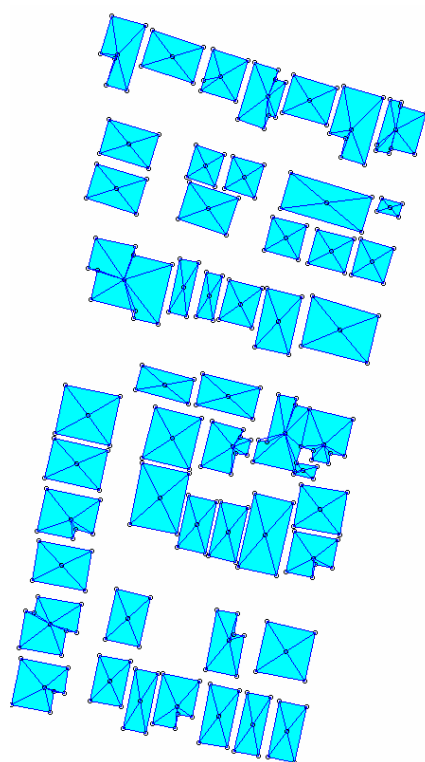


図-6 自動生成された棟内モデル



図-5 解析対象領域の範囲指定

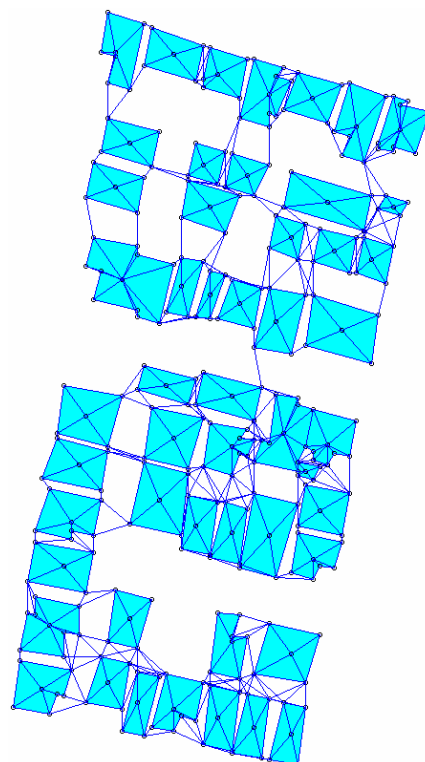


図-7 自動生成された解析モデル

いて、アークの矢尻やトランジションは表示されていないが、

プレースとプレースを結ぶ線分が二重かつ双方向のアークを表しており、その間にそれぞれトランジションが存在している。

アークの重みは風速、風向、震度によって異なるので、

表-1 プレースのデータファイルの例

番号	東経	北緯
1	134.5856083	34.06056
2	134.5856611	34.0605475
3	134.5856372	34.06047583
4	134.5855872	34.06048639

表-2 アークのデータファイルの例

番号	プレース1	プレース2	種別
1	1	2	1
2	2	3	1
3	3	4	1
4	4	5	1

解析モデルの自動生成では、プレース、トランジションおよびアークの配置を図-7 のように行い、その後、風速、風向、震度を与えてアークの重みを計算させるようにした。図-7 において、棟間アークの設定の限界距離をここでは 8m とし、プレース間の距離がこれを越える場合は、設定しないこととしている。

以下では、棟内のデータと棟間のデータの作成方法について、その詳細を説明する。

(1) 棟内データ作成の方法

プレースについては、家枠頂点および家枠の図心付近に配置することとし、それらの座標を電子住宅地図から取得する。そして、プレースの番号(生成された順)と座標をデータとしてファイルに出力する(表-1 参照)。アークについては、入力側と出力側のプレースの番号およびその属性をデータとしてファイルに出力する(表-2 参照)。アーク

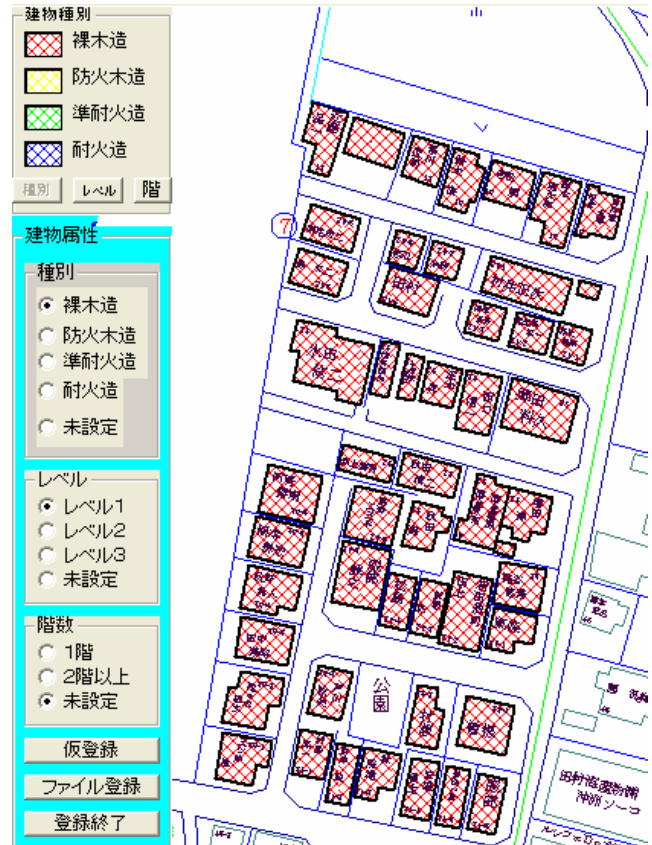


図-8 建物属性の編集サブシステム

の種別は棟内のアークか棟間のアークかを識別するためのもので、それぞれ数字の1と2で表している。トランジションはアークが配置されているプレース間に自動的に配置される。それぞれの建物を構成するプレースの数と番号等もまたファイルに出力される。表-3 に、この建物属性に関するデータファイルの例を示す。表中のそれぞれの項目を以下に説明する。

番号; 建物の番号(モデル化した順)

種別; 木造(1), 防火造(2), 準耐火造(3), 耐火造(4)

レベル; 準耐火および耐火造の場合に1~3を設定

階数; 建物の階数

リンクコード; 電子住宅地図上の建物コード

家枠頂点数; 家枠を構成する頂点の数

プレース番号; 家枠を構成するプレースの番号

表-3 建物属性のデータファイルの例

番号	種別	レベル	階数	リンクコード	予備	家枠頂点数	プレース番号									
							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1		2	1-82-4-58130816-1045		9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	1		2	1-82-4-58130816-1047		4	11	12	13	14	15					
3	1		2	1-82-4-58130816-1064		4	16	17	18	19	20					
4	1		2	1-82-4-58130816-135		6	21	22	23	24	25	26	27			

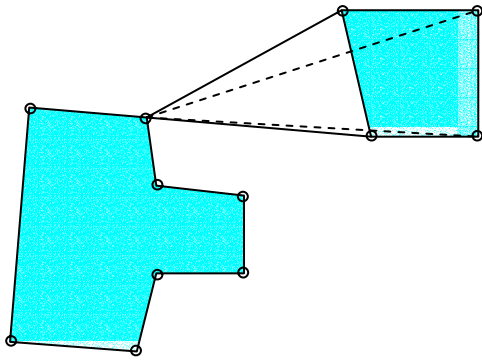


図-9 一つのプレースから他の家枠のすべてのプレースにアークを設置する場合

プレース番号は、家枠頂点数よりも1だけ多くなっているが、これは家枠の図心付近に配置されているプレースを含んでいるためである。なお、建物の種別と階数のデータは住宅地図から読みとることができないため、本システムでは木造2階建てをデフォルトとしてデータが生成される。このデータの修正は、図-8に示すような本システムに付属するサブシステムを用いて、マウス操作により画面表示されている住宅地図上で実行できる。また、すべてのデータはMicrosoft Excelの形式で保存されるため、データファイルを直接編集することも可能である。

(2) 棟間データ作成の方法

建物間のデータ作成は、異なる建物に属するプレース間にアークおよびトランジションを設定することである。基本的には、図-9に示すように、ある建物に属するプレースから他の建物に属するすべてのプレースに設定すればよいように思われるが、莫大な数を設定することになり、シミュレーションの際にも計算のロスが多くなる。そこで、つぎの①～④のケースについては除外することとした。

建物の中心の間隔がある制限を越える。

プレース間を結ぶ線分の長さがある制限を越える。

既にアークが設定されている。

プレース間を結ぶ線分が建物を横切る。

上記①～④のうち、①～③は簡単な手続きで処理できるため、以下では④について、その判定方法を述べる。

いま、図-10に示すように、棟間のプレースを結ぶ線分(破線)と家枠線が交わっているものとする。それぞれの線分は次式で表される。

$$y = a_1x + b_1$$

$$y = a_2x + b_2$$

ここに、

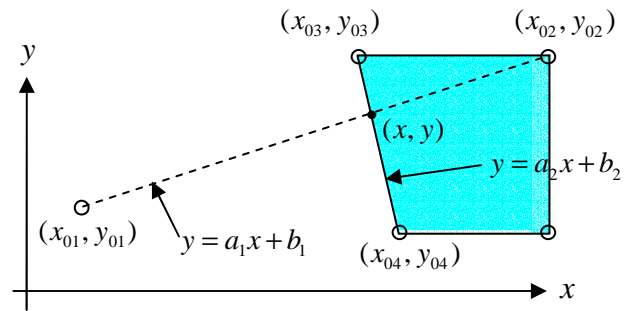


図-10 一つプレースと他の家枠のプレースを結ぶ線分が建物ポリゴンを横切る場合

$$a_1 = \frac{y_{02} - y_{01}}{x_{02} - x_{01}}$$

$$b_1 = y_{01} - a_1x_{01}$$

$$a_2 = \frac{y_{04} - y_{03}}{x_{04} - x_{03}}$$

$$b_2 = y_{03} - a_2x_{03}$$

これらの線分の交点の座標(x,y)は次のようにして得られる。

$$a_1x + b_1 = a_2x + b_2$$

$$(a_1 - a_2)x = b_2 - b_1$$

$$\therefore x = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}$$

$$y = a_1 \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} + b_1$$

交点の座標(x,y)がつぎの1)～3)の関係を満たすとき、アークが建物を横切ったと判別して除外するものとした。

以下では、図-10に示すような $x_{01} < x_{02}$, $x_{03} < x_{04}$, $y_{01} < y_{02}$, $y_{03} > y_{04}$ のケースを想定して、具体的な処理の方法を述べる。

1) $x_{01} \neq x_{02}$ の場合

$$x_{01} < x < x_{02}$$

$$x_{03} < x < x_{04}$$

$$y_{01} < y < y_{02}$$

$$y_{04} < y < y_{03}$$

の4つの条件が同時に満たされるとき

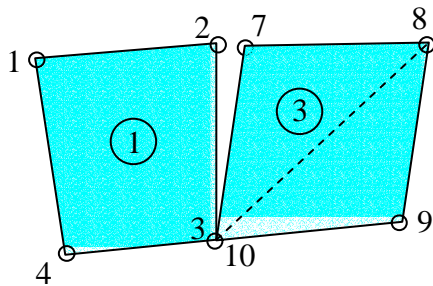


図-11 同一座標に複数の建物がプレースを有する場合

2) $x_{01} = x_{02}$ の場合

$$x = x_{01}$$

$$y = a_2 x_{01} + b_2$$

として、

$$x_{03} < x < x_{04}$$

$$y_{01} < y < y_{02}$$

$$y_{04} < y < y_{03}$$

の3つの条件が同時に満たされるとき

3) $x_{03} = x_{04}$ の場合

$$x = x_{03}$$

$$y = a_1 x_{03} + b_1$$

として、

$$x_{01} < x < x_{02}$$

$$y_{01} < y < y_{02}$$

$$y_{04} < y < y_{03}$$

の3つの条件が同時に満たされるとき

このような除外措置の機能を Check_Link1 としておく。

ところで、上述のような判別法を用いると、複数の建物が同じ座標をもつプレースを有する場合に、誤ってアークを設定してしまうケースがある。以下に、その例と対応について述べる。

a) 入力アークの始点のプレースが他の建物のプレースと同じ座標を持つ場合

図-11 において、プレース 3 と 10 がそれぞれ番号①と③の建物の属し、同じ座標を持つものとする。このとき、プレース 3 からプレース 8 へのアークが、建物を横切っていないと判断されて設定されてしまう。

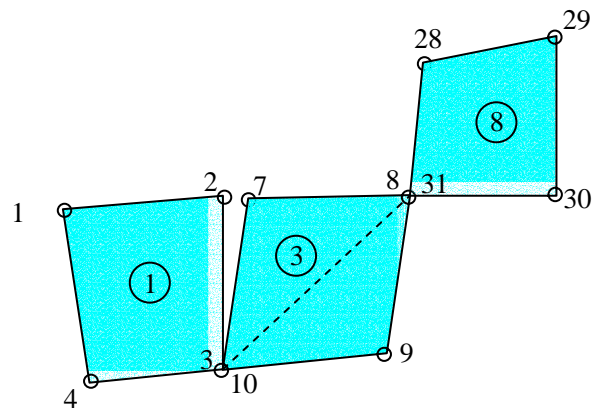


図-12 アークの始点と終点のプレースと同じ座標を持つ第3の建物がある場合

このようなケースへの対応として、入力アークの始点のプレースが他の建物のプレースと同じ座標を持つ場合には、プレース 3 から建物③の各プレースへ向かうアークはプレース 3 から 10 へのアークを除き、設定しないこととする。棟間の距離が 0m であっても、類焼するのに一定の時間を必要とするため、プレース 3 から 10 へのリンクは必要となる。このような除外措置の機能を Check_Link2 としておく。

b) 出力アークの終点のプレースが他の建物のプレースと同じ座標を持つ場合

上述の a) のケースとは逆に、図-11 において、番号③の建物のプレース 8 から番号①のプレース 3 に向かうアークも、建物を横切っていないと判断されて設定されてしまう。

このようなケースへの対応として、出力アークの終点のプレースが他の建物のプレースと同じ座標を持つ場合には、アークを設定しないこととする。このような除外措置の機能を Check_Link3 としておく。

c) 入力アークの始点および出力アークの終点のプレースと同じ座標を持つ2つのプレースを第3の建物が共に持つ場合

図-12 において、番号①と③の建物が同じ座標のプレース 3 と 10 を持ち、番号③と⑧の建物が同じ座標を持つプレース 8 と 31 を持つものとする。このとき、プレース 3 から 31 へのアークが、建物を横切っていないと判断されて設定されてしまう。

このようなケースへの対応として、棟間の入力アークの始点および出力アークの終点のプレースと同じ座標を持つ2つのプレースを第3の建物が共に持つ場合には、そのアークは施さないこととする。このような除外措置の機能を Check_Link4 としておく。

以上に述べた除外措置をそれぞれ施した場合の、棟間データの自動作成の結果を図-13~18 に示す。

建物の中心の間隔がある制限を越える場合の除外措置は、棟間モデル作成の際に、無駄な計算を極力省くた

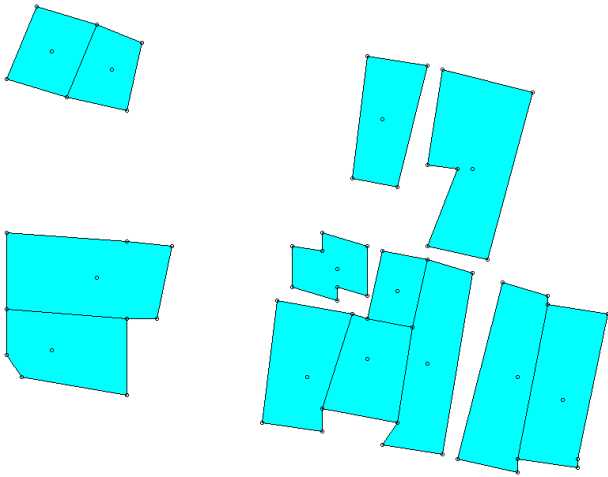


図-13 家枠のみ

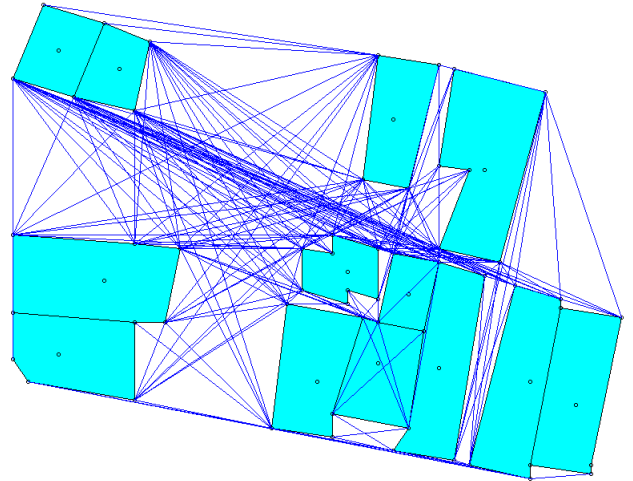


図-16 Check_Link1, 2 & 3 の除外措置を講じた場合

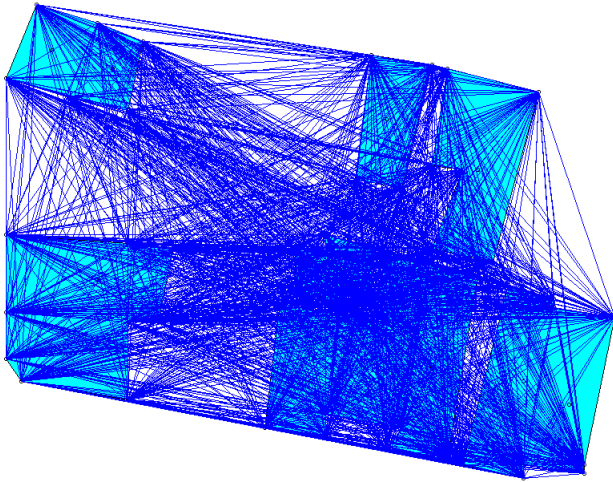


図-14 すべての家枠のプレース間にアークを設定した場合 (除外措置を全く施さなかった場合)

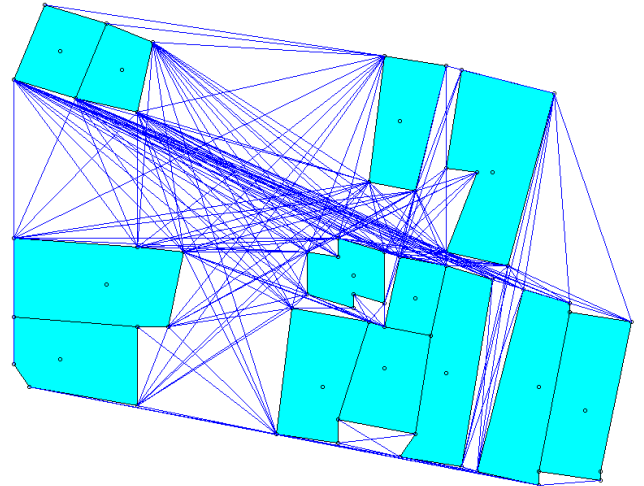


図-17 Check_Link1, 2, 3 & 4 の除外措置を講じた場合

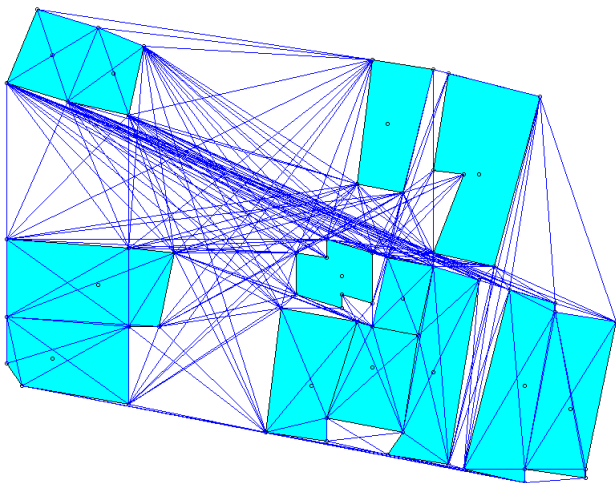


図-15 Check_Link1 の除外措置を講じた場合

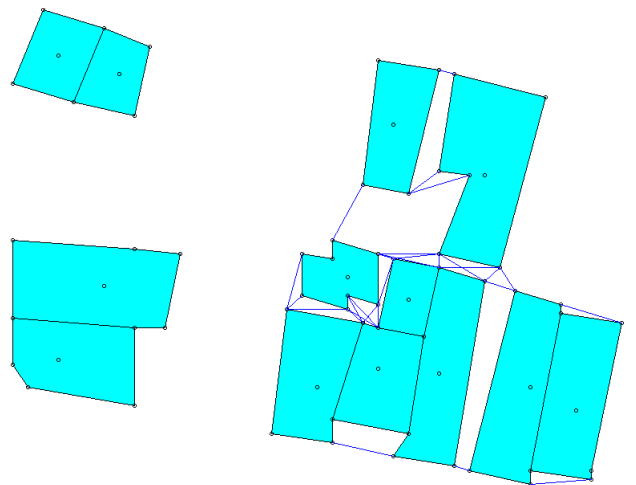


図-18 Check_Link1, 2, 3 & 4 およびプレース間距離の制限(ここでは6mとした)の除外措置を講じた場合

表-4 入力アークの重みのファイルの例

番号	入力プレース	出力プレース	種別	距離(m)	延焼時間(分)
1	1	2	1	6.01	6.92
2459	2	1	1	6.01	6.92
2	2	3	1	13.69	15.77
2460	3	2	1	13.69	15.77
3	3	4	1	1.07	1.23
2461	4	3	1	1.07	1.23

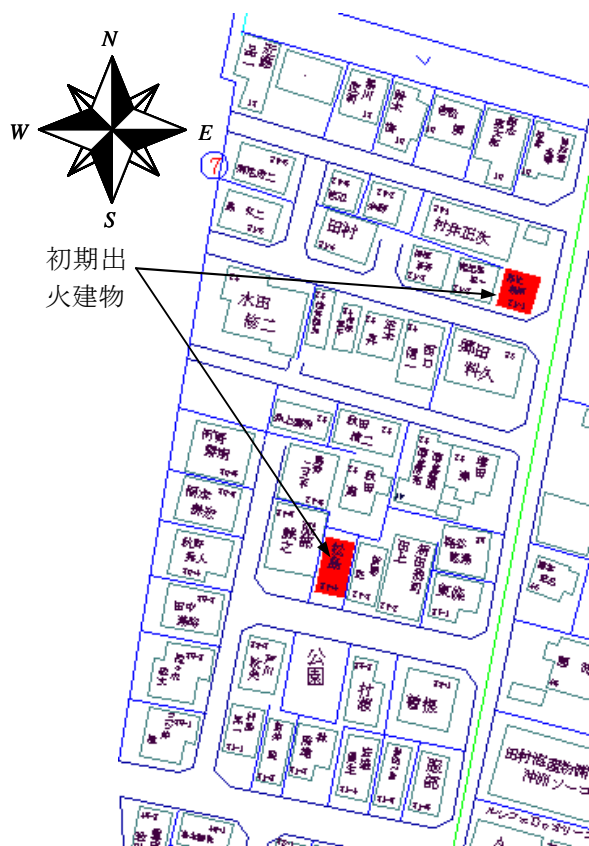


図-20 火災発生時の状態

めのものであり、実際には上述の除外措置のうちで最初に適用するとよい。

このようにして作成された棟間モデルのデータは表-2に示すファイルに追記される。

(3) アークの重みの算出

プレース、アークおよびトランジションの配置の後、風速、風向および震度を与えると、入力アークの重みが計算され、ファイルに出力される。表-4はその例であり、延焼時間が重みに相当する。延焼シミュレーションにおける計算の単位(例えば分単位)に応じて、実際には整数化された重みがペトリネットによる延焼解析では用いられる。出力アークの重みはすべて1とする。

以上で、延焼解析に必要なデータが整う。

4. 延焼シミュレーションシステムと計算例

延焼シミュレーションシステムにおいて、データの作成から延焼動態表示までの処理の流れと作成・利用されるファイルの関係を図-19に示す。従来のシステム⁸⁾において

は、“プレースの座標”、“アークの属性”、“建物の属性”のファイルのデータの一部あるいは全部が、当該建物などを一つずつマウスでクリックすることによって作成されていたが、本システムによれば、延焼解析の対象となる領域をマウスにより範囲指定するだけで、これらのファイルのすべてのデータが作成される。初期出火建物の選択の処理とそ

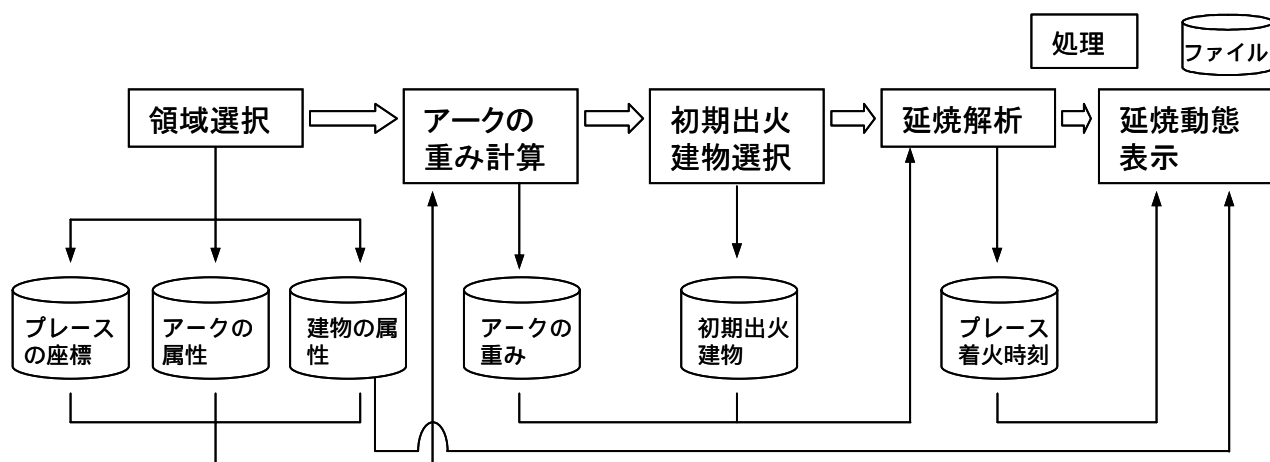
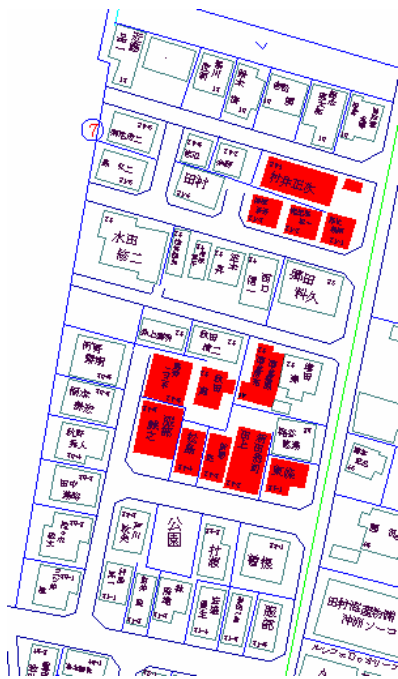
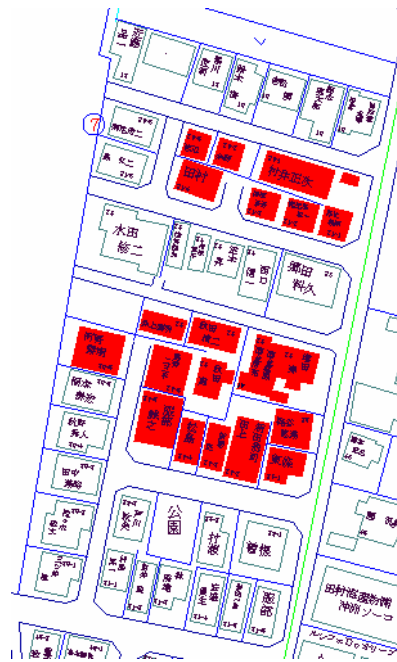


図-19 モデル作成から延焼シミュレーションまでのフローおよび作成・利用されるファイル



(a) 30 分後



(b) 60 分後



(c) 120 分後



(d) 180 分後

図-21 延焼動態シミュレーションの結果

れによって作成されるファイルが示されているが、これは、住宅地図上で該当する建物をクリックするだけの操作であり、自動的に初期出火建物として計算に必要なデータがファイルに出力される。

図-20および21に本システムを用いて延焼シミュレーションを行った例を示す。条件は、東の風、風速4mで震度5強を

想定した。また、建物はすべて木造2階建としている。図-20を火災発生の状態とし、30分後、60分後、120分後および180分後の状態をそれぞれ図-21の(a)～(d)に示す。北側に位置する建物を火元とする延焼は約1時間後に焼け止まりの状態になっているが、南側の建物を火元とする延焼は1時間後も拡大し、焼け止まるまで3時間程度かかっていることが

解る。このシミュレーションにおいては、延焼限界時間を60分とし、棟間アークの重みが60を越える場合には、そのアークに沿った延焼を阻止するような設定にしている。図-20に示す住宅群の解析モデルを図-7に示す。北部の火元が属するブロックの北側、南側および西側のブロックには延焼していない。これは延焼限界によるものである。また、南部の火元を含むブロックの建物から南側の建物にはアークそのものが設定されていない。これはブレース間距離が設定した8mを越えているためである。そのため、図-21に示されているように、火元のブロックの西側のブロックを経由して南側のブロックに延焼していることが解る。なお、延焼限界時間の設定には不明確な部分があり、今後最新の知見をシステムに反映させていく必要がある。

5. まとめ

本研究では、東消式 2001 に基づく地震時火災延焼解析法のためのデータ作成が、簡単なマウス操作で一括して行えるシステムを開発した。これにより、一般に煩雑かつ多大な労力を必要とするデータ作成の作業から解放され、大規模な延焼シミュレーションも可能となる。

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) 国土交通省総合技術開発プロジェクト, まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発(防災まちづくり総プロ)報告書, 2003.
- 5) 木俣昇:大震時避難計画のためのメッシュ型火災延焼シミュレーション・システムに関する検証, *Journal of Operations Research Society of Japan*, Vo.30, No.1, pp.59-87, 1987.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) TSUJIHARA, O., FUSHIMI, Y., KUBORI, T., SAWADA, T. and MITSUIWA, Y.: Simulation System of Spreading Fire in an Earthquake Using Digital Residential Maps, *Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, pp.1-9(in DVD-ROM), 2004.
- 10) 村田忠夫:ペトリネットの解析と応用, 近代科学社, 1992.
- 11) 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.
- 12) TSUJIHARA, O., TERADA, K. and SAWADA, T.: GIS Based Simulation System of Urban Spreading Fire in Earthquake Applying Petri net, *Proceedings of The International Symposium on Management System for Disaster Prevention*, pp.1-8 (in CD-ROM), 2006.
- 13) 株式会社ゼンリン, URL: <http://www.zenrin.co.jp/product/zmapdata.html>, 2006.5.
- 14) 株式会社カーネル, URL:<http://www.kernel-map.co.jp/product/i/index.html>, 2006.5.

(2006.5.19受付)