

I-26 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

Construction of Convenient Simulation System of Spreading Fire at an Earthquake
Using Digital Residential Maps

辻原 治¹ 伏見 悠生² 久堀 貴史³ 澤田 勉⁴
Osamu Tsujihara Yu-ki Fushimi Takayoshi Kubori Tsutomu Sawada

【抄録】本研究の目的は、簡便な地震時火災シミュレーションシステムを構築することである。一般に、この種の解析のためのデータ作成には多大な労力を要する。しかし本システムでは、風速、風向、地震の震度と建物に関するいくつかの属性データおよび建物の座標データのみを必要とし、後者は電子地図を用いれば簡単に取得できる。そのような基礎データを利用して中間ファイルが作られ、延焼解析シミュレーションは最短経路探索問題として定式化されて、ダイクストラ法のアルゴリズムで解かれる。また、シミュレーションの結果はコンピュータ画面上の住宅地図上に表示される。

【Abstract】 The objective of this study is to develop the convenient simulation system of the spreading fires at an earthquake. Generally, it requires a tremendous labor to make the data which are used for this kind of simulation. This system needs some attribute data and the coordinate of each residence which can be picked up with a digital residential map in a simple manner besides the data about the wind direction, wind velocity and seismic intensity. A work file is produced with the basic data and the simulation of the spreading fire is formulated as the shortest route problem, which is solved by the Dijkstra's algorithm. The results of the simulation can be shown on digital residential maps of computer display.

【キーワード】 延焼シミュレーションシステム、地震、電子住宅地図、最短経路探索問題

【Keywords】 simulation system of spreading fires, earthquake, digital residential map, shortest route problem

1. 序論

1) 地震防災システムの現状と課題

1995年の兵庫県南部地震以降、規模は小さくても局部的に大きな被害を引き起こす地震があることが再認識された。このような直下型地震に対しては、国が震源を設定して被害想定を行うことが困難であり、関係地方公共団体において、それぞれが直下の地震に係る被害想定を行い、事前の防災対策の検討に役立てることが望まれるようになった。旧国土庁防災局震災対策課は、関係地方公共団体における地

震被害想定 of 作成を支援するため、平成8年4月より「地震被害早期評価システム」の運用を開始した。しかし、このシステムはどの地方公共団体でも適用できる反面、メッシュ単位の被害率等を推定するのであり、細かな設定をすることはできない。一方、いくつかの地方公共団体では独自の地震防災システムを構築している。例えば横浜市のリアルタイム地震防災システムでは、高密度強震計ネットワークを用いた地震発生後のリアルタイム被害推定とGIS等のシステムの結合により、高度なシステム¹⁾を構

1:和歌山工業高等専門学校環境都市工学科(〒644-0023 御坊市名田町野島 77, TEL0738-29-8455)

2:和歌山工業高等専門学校専攻科エコシステム工学専攻(〒644-0023 御坊市名田町野島 77)

3:徳島大学工学部建設工学科(〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

4:徳島大学工学部建設工学科(〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1, TEL088-656-9132)

築している。しかし、同システムを他の地方公共団体に適用するには施設・設備の面、すなわち経済面でほぼ不可能である。

このように、地震防災支援システムはいくつか開発され、実用にも供しているが、未だ発展途上であり、南海地震や東南海地震の発生確率も政府を通じて公式に出された状況において、多くの地方公共団体が利用できる、より簡便かつ機能的なシステムの構築が望まれている。地震時火災のシミュレーションについても、1995年の阪神大震災における火災による被害の甚大さを考えると、地震防災支援システムに是非とも必要な機能である。

地震による被害想定、地震発生直後の救援活動を支援するためのリアルタイム被害推定、さらに復旧活動を支援するための被害状況の把握は、基本的に同一のシステムで構築できる。最も利用価値の高いものとしては、各地方公共団体がカバーするエリアにおいて、家一軒、一軒についての情報が把握できるものであろう。近年、株式会社ゼンリンの Zmap Town II をはじめ電子住宅地図の利用が可能になり、建物の属性データとの関連付けを行うことで GIS ベースのソフトウェアの開発が容易になった。

2) 延焼解析の研究

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（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²⁾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）³⁾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）⁴⁾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⁵⁾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。また、近年セルオートマトンの考え方を適用した地震時火災シミュレーションの研究^{6,7)}も行われているが、このような市街地延焼解析を扱った研究は少なく、未だ確立されていないのが現状である。

3) 研究の目的および特徴

本研究では、多くの地方公共団体が利用できることを前提とし、

- ・ 基礎データの入力作業が簡単で必要最小限であること
- ・ 地方公共団体等で構築される地震防災システムの中でも、他の機能との共存ができるようなものであること
- ・ 延焼解析のための計算時間があまり長くないこと

等をコンセプトとして、延焼モデルの市街地延焼解析への新たな適用法を提案する。

本研究で提案するシステムは、電子住宅地図を用いて基礎データの作成が簡便にでき、結果の表示も可能である。また、延焼解析を最短経路探索問題として扱っており、大規模な計算に対応でき、かつ計算時間にも配慮した設計になっている。

2. 延焼解析

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）⁴⁾を利用した。同延焼速度式の特徴と概要を述べる。

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, 棟内の延焼速度式が, 延焼距離及び区画損傷率(地震動加速度の関数)を用いて, それぞれのレベルについて与えられている。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, 風速等をパラメータとする関数として与えられている。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。

つぎに, 延焼速度式の市街地延焼解析への適用法について述べる。延焼解析の対象となる地区について, それぞれの建物を図-1に示すように, 4つのノードと6本のリンクで構成する。各リンクには, その長さと棟内延焼速度から, リンクの一端から他端まで延焼するのに必要な時間を割り当てる。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, その長さと棟間延焼速度から延焼時間を割り当てる。このような作業は, 次章で述べるようにコンピュータ画面上で行うことができる。図-2に棟内リンクと棟間リンクも含めた例を示す。このようにして作成されたノードとリンクからなるネットワークに対して, 火元からの最短経路探索問題として, 各ノードの延焼到達時間を求める。

最短経路探索問題の概念図を図-3に示す。図の丸印がノードで, その中の数値はノードの番号を表す。

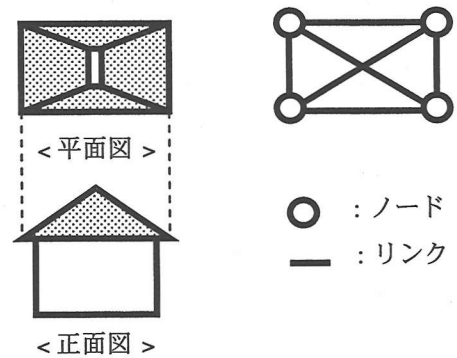


図-1 ノード・リンクを用いた建物のモデル

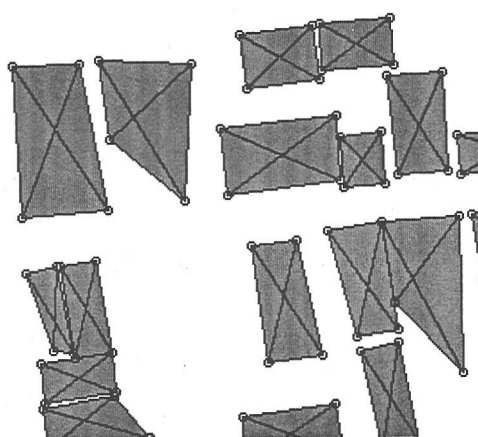
また, 矢印はリンクで, アンダーライン付きの数値は各リンクを通過するために必要な時間(分)を表す。例えば, ノード1を起点としてノード5へ到達する経路は種々あるが, 最短時間で到達する経路として次の3つの候補を挙げて到達時間を求めると, このようになる。

経路1: ノード1→ノード2→ノード5 . . . 10分

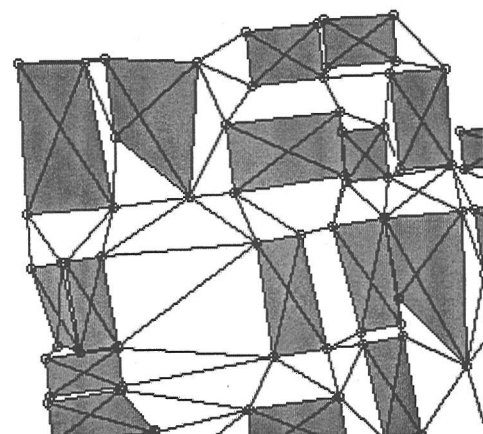
経路2: ノード1→ノード4→ノード5 . . . 9分

経路3: ノード1→ノード3→ノード4→ノード5 . . . 8分

したがって, この場合は経路3が最短(時間)経路となり, 所要時間は8分である。次章で述べる延焼シミュレーションシステムにおいて, 「リンクの延焼時間算出サブシステム」は, 図-3に示すような各リンクを通過するために必要な時間を求める機能を持つ。また「ノードの延焼開始時間算出サブシステム」は, 上述の最短経路探索の機能を持っている。なお, 最短経路探索のアルゴリズムにはDijkstra法⁹⁾を用い



(a) 棟内リンク



(b) 棟内および棟間リンク

図-2 延焼シミュレーションのための町並みモデルの作成

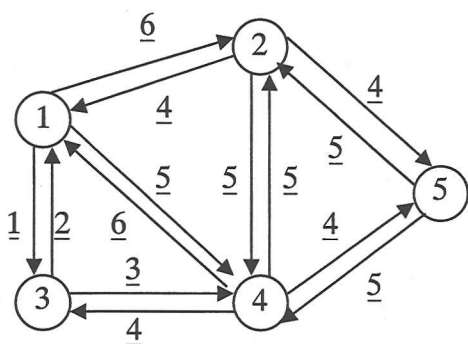


図-3 最短経路探索問題の概念図

ている。

以下に、図-4に示すような規則正しく配置された縦30軒、横30軒の建物群を対象として行った延焼解析の例を示す。

まず、建物のすべてを1階建ての裸木造として、風の影響による延焼動態の違いをシミュレートした。解析の条件は次のとおりである。

- ① 建物の平面形状は $5\text{m} \times 5\text{m}$ の正方形とし、上下・左右の建物間の距離は 1m とする。
- ② 風向は東向き（紙面に向かって左から右）とす

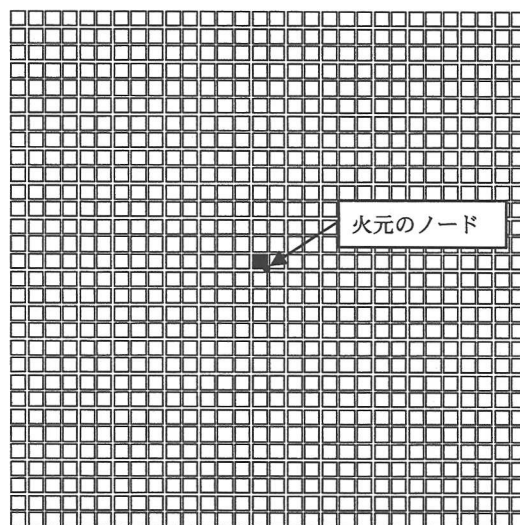
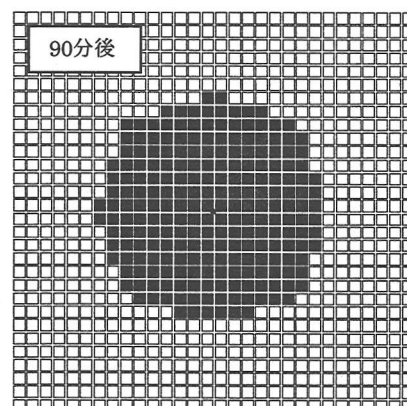
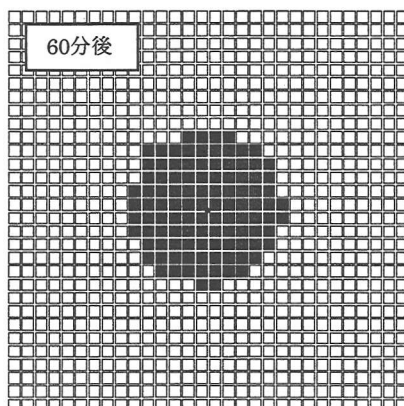
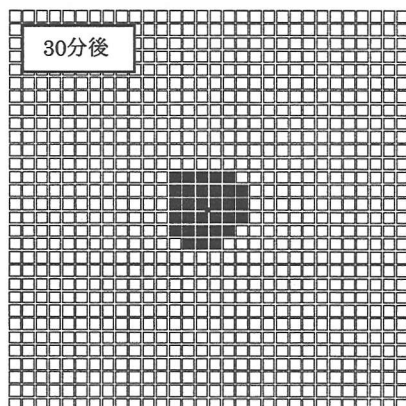


図-4 解析対象の建物群と火元のノード

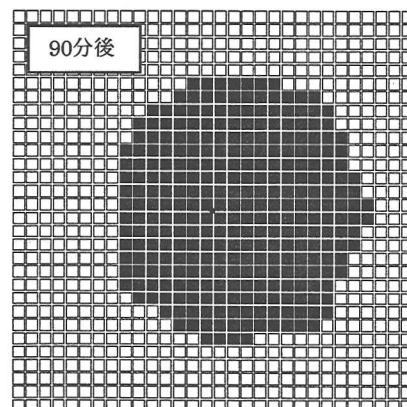
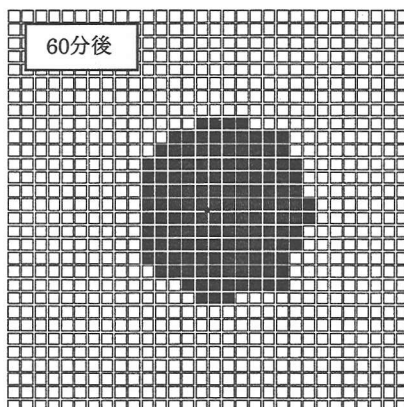
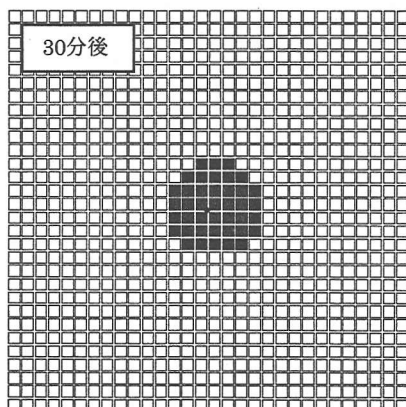
る。

- ③ 風速は 0m/sec (無風) もしくは 10m/sec とする。
- ④ 地震の震度は6弱とする（加速度に換算して用いる）。

発火後30分、60分および90分後の延焼動態を図-5に示す。塗りつぶされているセルが、既に延焼

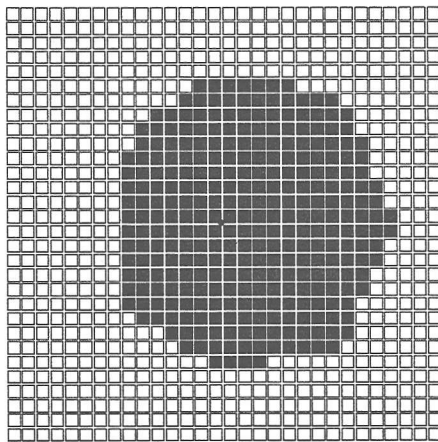


(a) 無風の場合

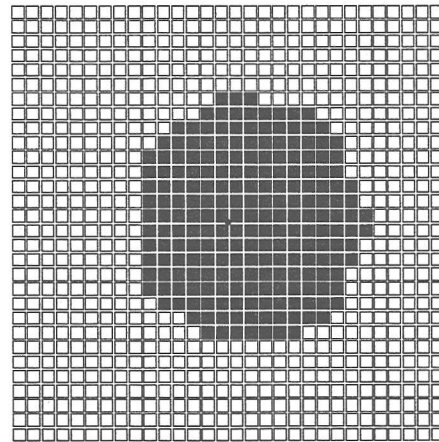


(b) 風速の 10m/sec の場合

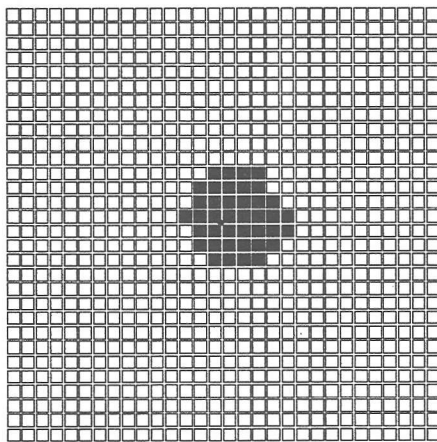
図-5 裸木造の建物の延焼シミュレーション結果



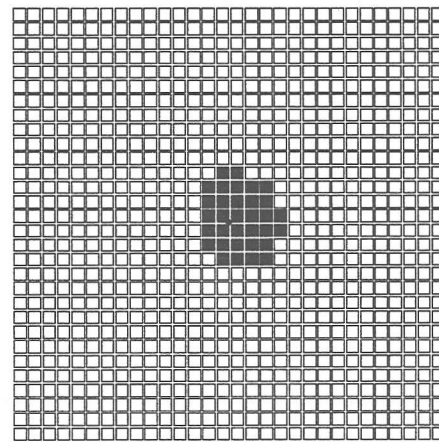
(a)裸木造



(b)防火造



(c)準耐火造(レベル3)



(d)耐火造(レベル3)

図-6 火災発生から90分後の延焼動態の構造形式による違い

が到達している建物を表す。無風の場合には、火元を中心に放射状に延焼している動態がシミュレートできている。また風速が 10m/sec の場合は、風下の方角には早く延焼し、風上の方角には遅く延焼する動態がシミュレートできている。

つぎに、建物の構造形式の違いによる延焼動態の変化をシミュレートした。これを図-6 に示す。解析の条件は同じで、風速は 10m/sec とした。図には、裸木造、防火造、準耐火造（レベル 3）、耐火造（レベル 3）について、発火後 90 分の延焼動態を示している。裸木造の延焼が最も早く、最も延焼速度が遅い耐火造の 3～4 倍の早さで延焼が進む様子がうかがえる。

3. システムの構成とデータの作成

延焼シミュレーションシステムの構成を図-7 に

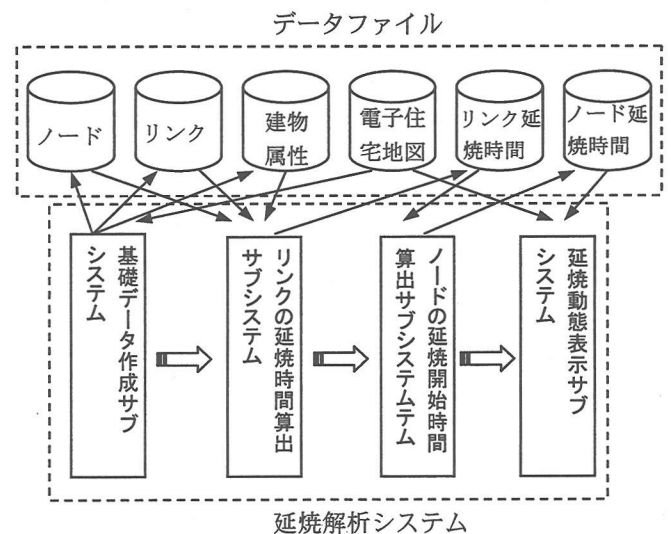


図-7 延焼シミュレーションシステム

示す。延焼解析に必要な基礎データとして、ノード、リンク及び建物属性のファイルがある。これらは基

表-1 ノードファイル

番号	X方向距離	Y方向距離	座標系	図番号	図内属性番号
1	2555.12	7098.03	6	11927698	50
2	2555.81	7104.62	6	11927698	50
3	2564.61	7101.09	6	11927698	50
4	2562.51	7095.71	6	11927698	50
5	2563.22	7094.75	6	11927698	76
6	2564.92	7089.37	6	11927698	76
7	2567.69	7090.12	6	11927698	76
8	2567.25	7094.75	6	11927698	76
9	2565.41	7095.25	6	11927698	37
10	2567.25	7100.16	6	11927698	37
11	2571.61	7099.21	6	11927698	37

表-2 リンクファイル

リンク番号	ノード1	ノード2	種別
1	1	2	1
2	1	3	1
3	1	4	1
4	2	3	1
5	2	4	1
6	3	4	1
7	5	6	1
8	5	7	1
9	5	8	1

礎データ作成サブシステムを用いて、コンピュータ画面の住宅地図上で作成できる。電子住宅地図としてゼンリンの Zmap Town II⁹⁾を用い、この表示等にはカーネルの Active Map Pro¹⁰⁾を使用している。

基礎データ作成サブシステムを用い、コンピュータ画面上で任意の建物をクリックすることで、ノードファイル、リンクファイル（棟内）および建物属性ファイルにデータが書き込まれる。これらのファイルは Microsoft Excel の形式で保存されるため、同サブシステムを利用せず、直接データを作成することも可能である。ノードファイルのサンプルを表-1に示す。表中の「X方向距離」と「Y方向距離」は基準点からの水平及び鉛直座標（単位は m）を表す。「座標系」「図番号」「図内属性番号」は、シミュレーションの結果を表示する際に必要な地図情報のデータであり、これらも自動的にファイル出力される。家枠の頂点が 5 以上の場合には、これを四辺形に近似する。表-2 はリンクファイルのサンプルである。選択されている建物の棟内リンクが自動的に作成され、各リンクの番号、両端のノードの番号及び種別が Excel ファイルに出力される。種別としては、棟内リンクの場合「1」が入る。表-3 は建物属性ファイルのサンプルである。選択されている建物を構成するノードの番号、種別（構造形式の分類、1:裸

表-3 建物属性ファイル

番号	ノード1	ノード2	ノード3	ノード4	種別	耐火レベル	階数
1	1	2	3	4	2		2
2	5	6	7	8	2		2
3	9	10	11	12	2		2
4	13	14	15	16	2		2
5	17	18	19	20	2		2
6	21	22	23	24	1		2
7	25	26	27	28	3	1	2
8	29	30	31	32	3	2	2
9	33	34	35	36	1		2
10	37	38	39	40	1		2
11	41	42	43	44	1		2
12	45	46	47	48	1		2
13	49	50	51	52	1		1

表-4 ノード延焼開始時間ファイル

ノード番号	延焼開始時間(分)	座標系	図番号	図内属性番号
77	106.6	6	11927698	142
78	105.8	6	11927698	142
79	92.8	6	11927698	142
80	99.4	6	11927698	142
81	0.0	6	11927698	301
82	15.3	6	11927698	301
83	22.0	6	11927698	301
84	17.6	6	11927698	301
85	30.1	6	11927698	355
86	23.0	6	11927698	355
87	30.7	6	11927698	355
88	33.5	6	11927698	355
89	18.4	6	11927698	182

木造、2:防火造、3:準耐火造、4:耐火造)、耐火レベル（準耐火造および耐火造の建物に設定）、階数を入力する。なお種別、耐火レベル、階数については画面上に選択肢が表示されるので、これが利用できる。棟間のリンクについては、建物ポリゴン及びこれを構成するノードをコンピュータ画面上に表示させ、棟間のリンクを設定するノードを選択することで、表-2 のリンクファイルに追加書き込みされる。棟間のリンクについては種別欄に「2」が入る。すべてのリンクは、双方向の延焼が可能となるように設定される。

このようにして作成した基礎データをもとに、それぞれのリンクの始点から終点までの延焼時間を、リンクの延焼時間算出サブシステムにより計算し、これを Microsoft Excel 形式のファイルに出力する。

つぎに、このデータを用いて、ノードの延焼開始時間算出サブシステムにより、発火ノードからその他のノードへ延焼が到達する時間を求め Microsoft Excel 形式のファイル出力する。このファイルのサンプルを表-4に示す。

最後に、延焼動態表示サブシステムにより、延焼の状況を電子住宅地図上に表示する。火災発生から



図-8 本システムによる延焼シミュレーション結果の例

任意の時間を指定すると、延焼した建物が識別表示される。図-8に本システムを利用して行った延焼シミュレーションの結果を示す。図-8の①に示す範囲を計算対象領域として、シミュレーションを行った。図中の塗りつぶした建物を火元としている。北向きの風（図の下から上に吹く風）が10m/secとし、震度は6弱とした。発火から30分、60分、90分後の延焼動態を示す。

以上のシステムは、開発言語 Microsoft Visual Basic で構築している。

4. 結 論

本研究では、電子住宅地図を用い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した。本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 4つのサブシステムからなる延焼シミュレーションシステムを、Microsoft Visual Basic を用いて構築した。このシステムは、データファイルが基本的には Microsoft Excel 形式で作成されることから、融通性があり、地方自治体等で既に構築されている地震防災システムへも比較的容易に組み込む

ことができる。

- (2) 延焼解析に必要な基礎データが、コンピュータ画面の住宅地図上で作成でき簡便である。
- (3) 延焼解析を最短経路探索問題として扱うことで、計算の効率化が図られており、リアルタイム延焼予測にも適用可能である。

謝 辞

東京消防庁・防災課・震災調査係の瀧本英明氏には延焼速度式の使用法などについて助言等を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) <http://www.city.yokohama.jp/me/bousai/bousai.wmv>, 2003.5.
- 2) 日本火災学会, 火災便覧, 共立出版, 第3版, 1997.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 山田篤, 瀧澤重志, 河村廣, 谷明勲, セルオートマトンを用いた都市火災のシミュレーション, 日本建築学会近畿支部研究発表会, pp.657-660, 1999.
- 7) 謝孟春, セルオートマトンの都市火災シミュレーションへの適用, 福井工業高等専門学校研究紀要科学, 第35号, pp.19-24, 2001.
- 8) 土木学会土木情報システム委員会, 土木情報処理の基礎—FORTRAN77に即して, 土木学会, pp.231-236, 1988.
- 9) <http://www.zenrin.co.jp/product/zmapdata.html>, 2003.5.
- 10) <http://www.kernel-map.co.jp>, 2003.5.