

- 25 延焼解析に基づく地震火災消火優先順位意思決定支援

システムに関する研究

Study on decision support system for extinguishing priority order
in earthquake fire based on spreading fire analysis辻原治¹・寺田和啓²・澤田勉³

Osamu Tsujihara, Kazuhiro Terada and Tsutomu Sawada

抄録：地震時に発生する火災の特長は同時多発することである。限られた消防能力を有効に活用し、被害を最小限に食い止めるためには、消火の優先順位を決め、これに基づいて活動することが重要となる。本研究では、延焼棟数、罹災世帯数、延焼面積等を最小化するような消火優先順位を決定するシステムを開発した。ペトリネットを適用した市街地延焼解析に基づき、出火しているすべての建物をそれぞれ消火した場合の効果と比較することによって消火優先順位を決定している。時間と共に変化する延焼動態と消火による効果が視覚的に表示される。

Abstract: Simultaneous occurrence of fires is one of the characteristics in an earthquake. The firefighting activities are important according to the extinguishing priority in order to minimize the damage because the capacity of firefighting force is limited. In this study, the system to assign the order of extinguishing priority to the buildings on fire is developed, in which the number of damaged buildings, household units and burned area is to be minimized. Based on the simulation of urban spreading fire using Petri-net, the order of extinguishing priority is determined by the comparison of effect of extinguishments of each building on fire. The movements of spreading fire and the effect of extinguishments, which change with time, can be expressed visually.

キーワード：地震火災、延焼、消火優先順位、意思決定支援システム、ペトリネット

Keywords : earthquake fire, spreading fire, extinguishing priority, decision support system, Petri-net

1. はじめに

地震時火災の特徴は同時多発することであり、通常起こる火災の時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、既存の消防力を最大限に活用して被害を最小限に食い止めるためには、消火優先順位の意思決定が大変重要となる。同時多発火災における消火優先順位の意思決定には種々の要因が介在するため、その判断は容易ではない。消防署員の経験や勘による判断のみに頼るのは危険であり、その意思決定を支援する手段として、リアルタイムで延焼予測を行って、延焼棟数等の直接的な被害を最小化するように、消火対象の優先順位を決めるシステムの開発が考えられる。このようなシステムは、発災時の消防活動の戦略策定に利用できるのみならず、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。

消防活動支援に関する研究はこれまでにいくつか行われている。関沢らは¹⁾延焼シミュレーションにより各火災の火面周長を計算し、消火に必要な部隊数を算定するシステムを構築している。上村らは²⁾1995年の阪神・淡路大震災が契機となって、延焼シミュレーションから消防活動構成員がそれぞれの消防行動を判断する消防部隊訓練用のシステムを構築している。また木俣らは³⁾地震時の消防防災行動全体を分析し、これを阻害する要因をペトリネットで表し、それらの連関として消防活動をモデル化している。このように、地震時の消防活動を支援システムについては、種々研究されているが未だ発展途上であり、自治体の規模や消防力なども考慮し、適切な消防活動支援システムを構築・適用することが重要である。

消防車やポンプ車の台数に厳しい制限のある特に中小の自治体においては、消防力の限界を考慮しつつ、火元の建物ごとに消火の優先順位を決めて活動することで、被害の拡大を軽減あるいは遅延させることにつながると考えら

1 : 正会員 博士(工学) 和歌山工業高等専門学校 准教授 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 徳島大学大学院
(〒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)

れる。本研究では、延焼棟数等を説明変数とする評価関数を導入して、延焼中の建物単位で消火優先順位を決定するシステムの開発を目的とした。延焼解析には、延焼速度式として東消式 2001⁴⁾を、延焼解析にはペトリネットを適用した解析法⁵⁾を用いている。

2. 延焼解析法の概要

本研究で開発するシステムにおいては、延焼シミュレーションが重要な役割を担う。以下では、延焼解析法の概要について述べる。

(1) 延焼速度式と延焼解析法

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あり、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⁶⁾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。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)⁷⁾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)⁴⁾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⁸⁾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^{たとえば9)}。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レーションも行われるようになった。矢野ら¹⁰⁾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⁴⁾。関沢らは¹⁾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。辻原らは^{11,12)}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。また、延焼解析にグラフ理論の一種であるペトリネットを適用することで、同時多発火災に対応

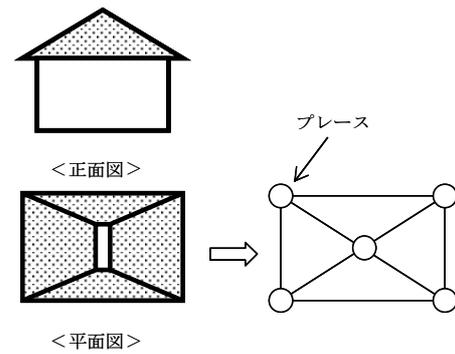


図-1 建物のモデル

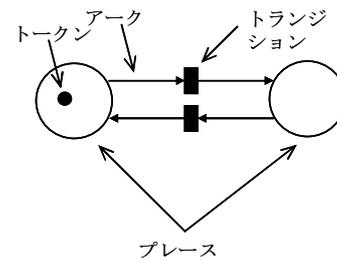


図-2 ペトリネットの基本要素

できるシステムを改良している⁵⁾。さらに辻原らは¹³⁾、この方法を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に適用し現地調査による延焼動態と比較しており、一部を除き概ね両者が対応することを報告している。

(2) ペトリネットによるミクロ延焼解析法

本研究では、ペトリネット¹⁴⁾を適用した延焼解析法⁵⁾を用いることとした。以下に、その概要を述べる。

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、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)⁴⁾を用いている。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 5) を参照されたい。

3. 消火優先順位の算出法とシステムについて

(1) 消火優先順位の算出法

消火の優先順位は、現在延焼中の建物*i*をそれぞれ消火した場合の効果、延焼シミュレーションによって評価項目ごとに数値として算出し、それによって決定する。具体的には、式(1)で示す評価関数によって計算された*B*値が小さい建物の順とする。

$$B(i) = \sum_{j=1}^{N_f} W(j) \cdot \text{Rank} \left(\sum_{k=1}^{N(i)} E(i, j, k) \right), \quad i = 1, 2, \dots, N_s \quad (1)$$

ここに、

N_s ; 現在延焼中の建物(消火優先順位を決める候補の建物)の総数

N_f ; 延焼棟数, 延焼面積等, 優先順位を決定する際に考慮する評価項目の総数

$W(j)$; 評価項目 j の重み係数

$N(i)$; 現在延焼中の建物 i を消火した場合に, 所定の時間内に他から延焼する建物の総数

$E(i, j, k)$; 評価項目 j について, 現在延焼中の建物 i を消火した場合に, 所定の時間内に他から延焼する建物 k に割り当てられている評価値

$\text{Rank}(\cdot)$; 現在延焼中の建物 i を消火した場合の評価値の合計に対する順位

重み係数 $W(j)$ は、本システムの利用者がその値を決めることができる。例えば、延焼棟数のみを対象として、これを最小にする場合には、この項目の重み係数を 1.0 とし他を 0 とする。重み係数の与え方によって計算結果に違いが出てくるが、本システムは利用者の意志決定を支援するためのものであり、どの項目を優先させるのかも含めて、最終的な意志決定は利用者任せられる。

対象領域の建物にはすべて属性情報が与えられているものとする。構造形式は、裸木造、防火木造、準耐火造、耐火造の4種類とし、建物の階数がわかっているものとする。これらの情報は棟内および棟間の延焼速度と関係する。優先順位を決定する際、延焼棟数以外で考慮する項目にもよるが、それぞれの建物に属する世帯数や人数等も把握することができれば、種々の条件で優先順位を算出することができる。また、延焼したときに爆発の危険を伴う建物等、他と区別する必要がある場合には、建物ごとに重要度を適宜割り当てておくことも可能である。

(2) 消火優先順位決定システム

本システムでは、延焼中のある建物を消火したものととして延焼動態をシミュレートし、解析対象地区の建物が延焼する時間を算出する。このような解析をすべての消火候補建物について行う。そして、例えば 60 分後の延焼動態のシミュレーション結果から、それぞれの候補の建物を消火した場合の B 値を計算し、これを元に消火優先順位を決定する。延焼動態のシミュレーションには表-1 に示す各ファイルが必要となる。このうち、「アークの重み」のファイルは、「プレースの座標」、「アークの属性」および「建物の属性」の基礎データのファイルを用いて計算・作成される。これらのファイルはすべて Microsoft Excel の形式で保存される。

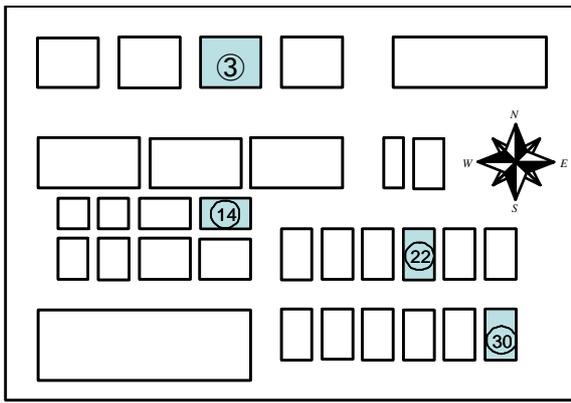
表-1 消火優先順位決定システムに必要なデータファイル

データファイル	内容
プレースの座標	家枠の頂点の番号とその座標
アークの属性	プレース間を結ぶ入力アークの始点プレースと出力アークの終点プレースの番号、棟内あるいは棟間のプレースを結ぶアークかを識別する数値
建物の属性	建物番号、建物を構成するプレースの番号、構造を識別する数値、階数、延べ床面積、世帯数、家族の人数、重要度等
アークの重み	プレース間の距離と延焼速度から計算されるプレース間を延焼するのに要する時間(分)
初期出火建物	現在延焼中の建物の建物番号

表-2 消火優先順位決定システムの主な機能一覧

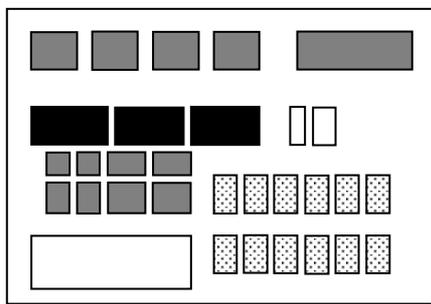
機能	内容
延焼動態の表示	放置火災とした場合の、10 分毎の延焼動態を地図(電子住宅地図)上に表示する。
消火による延焼動態の比較	1) 一つの候補の建物を消火したときの、その後 10 分毎の延焼動態を地図上に表示する。 2) それぞれの候補の建物を消火したときの、その後 10 分毎の延焼動態を地図上に比較表示する。
消火による効果のグラフ表示	1) 例えば延焼棟数など、各評価項目について、延焼による被害の実数の時間変化をグラフ表示する。 2) それぞれの候補の建物を消火したときの、一定時間後の被害の実数を、各評価項目についてテキスト表示する。 3) 各評価項目の重み係数 $W(j)$ を選択し、それぞれの候補の建物の消火優先順位の時間変化をグラフ表示する。
消火優先順位の表示	指定した時間経過後に被害を最小にするための消火優先順位を地図上に表示する。

シミュレーション結果から、それぞれの候補の建物を消火した場合の B 値を計算し、これを元に消火優先順位を決定する。延焼動態のシミュレーションには表-1 に示す各ファイルが必要となる。このうち、「アークの重み」のファイルは、「プレースの座標」、「アークの属性」および「建物の属性」の基礎データのファイルを用いて計算・作成される。これらのファイルはすべて Microsoft Excel の形式で保存される。



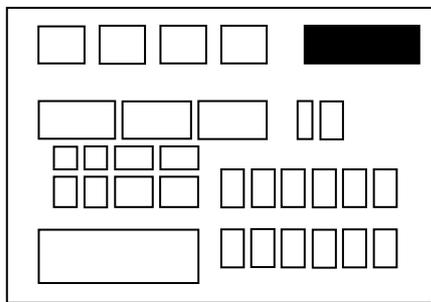
□ 未延焼 □ 延焼中

図-3 仮想都市における火元の建物とその建物番号



□ 裸木造 □ 準耐火造 □ 耐火造
 □ 防火造

図-4 建物構造形式



□ 1世帯 □ 5世帯

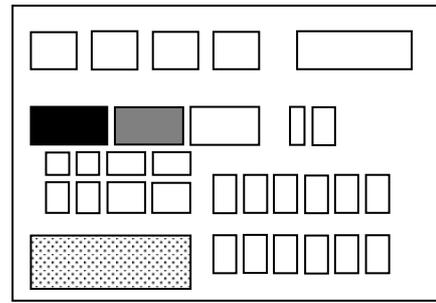
図-5 世帯数

一般にデータの作成は煩雑で膨大な作業を伴うが、電子住宅地図を用いて半自動的に基礎データのファイルを作成する試みもなされている¹⁵⁾。

表-2には消火優先順位決定システムの機能一覧を示す。以下に、システムの運用例を示す。

4. 消火優先順位決定のシミュレーション

ここでは、解析結果の評価の容易さを勘案して、図-3



□ 重要度1 □ 重要度3
 □ 重要度2 □ 重要度5

図-6 建物の重要度

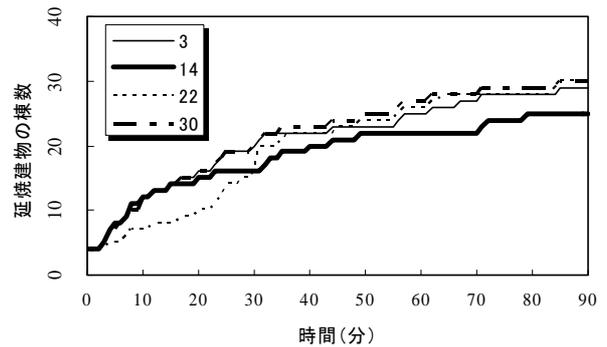


図-7 火元の建物を消火したときの延焼建物数の時間変化

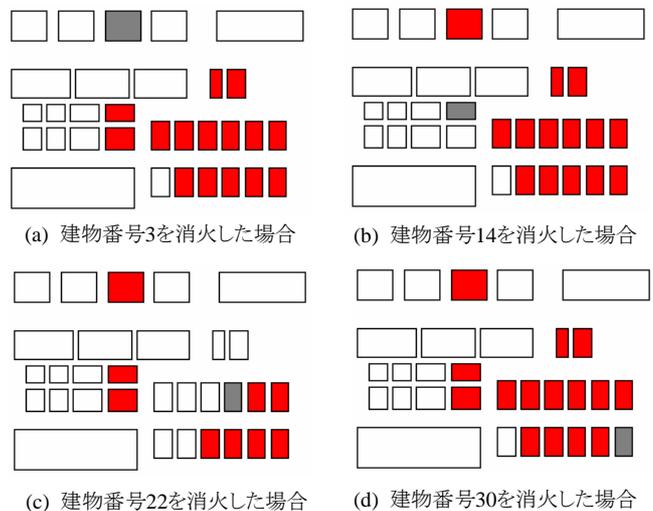


図-8 火元の建物を消火したときの20分後の延焼動態

に示すシンプルな仮想都市を対象として消火優先順位決定のシミュレーションを行った結果について説明する。震度は5強で無風の状態を想定した。同図には建物の平面を示しており、4棟で同時に出火したことを想定している。延焼中の建物内の丸印で囲まれた数字は、それぞれの建物の番号を表している。また、図-4~6に建物の構造形式、世帯数および重要度を示している。合計31棟の建物で構成されており、世帯数は35である。火元の建物をそれぞ

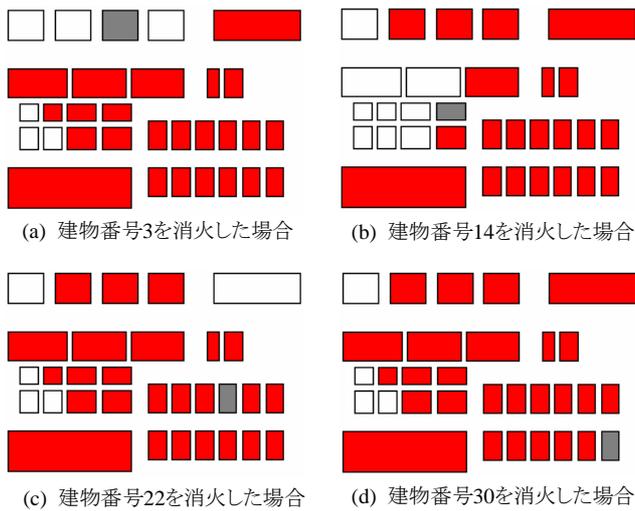


図-9 火元の建物を消火したときの60分後の延焼動態

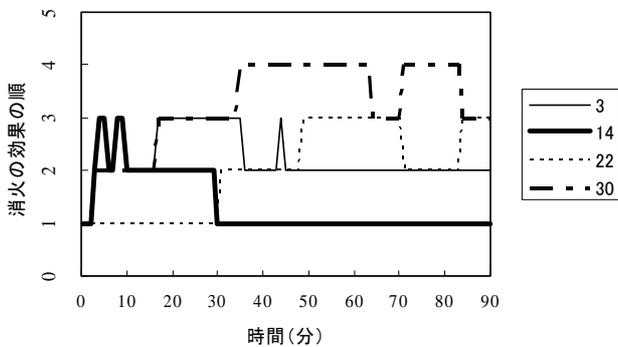
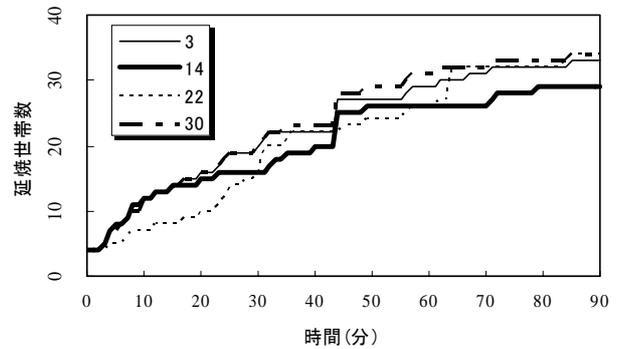


図-10 延焼棟数のみ評価項目とした場合の消火による効果の順位の時間変化

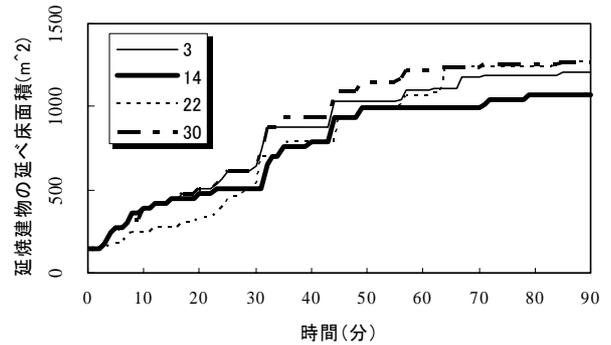
れ消火した場合の時間と延焼棟数の関係を図-7に示す。

出火後約30分までは、建物番号22を消火することで、最大の効果が得られることがわかる。建物番号3および14が準耐火造で燃えにくく、かつそれらの建物の周囲が同じ準耐火造もしくは耐火造の建物が多いため、延焼棟数に限定すれば、これらの建物を消火してもその効果は大きくない。一方、建物番号22と30は共に防火造であり、準耐火造に比べれば燃えやすい。両者のうち、建物番号22を消火することで、初期段階においてより大きな効果を発揮しているのは、その位置によるもので、建物番号30の東側への延焼がないためである。図-8に火元の建物を消火したときの出火後20分の延焼動態を比較して示している。建物番号22を消火することの効果は視覚的に表現されている。

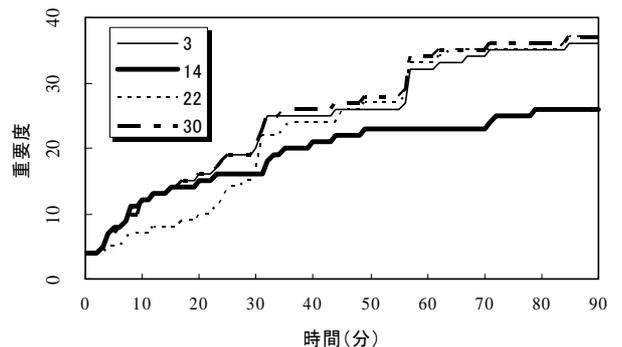
しかし、図-7より時間の経過と共に消火による効果は変化していることがわかる。出火から約30分以降は建物番号22よりも14を消火の方が、効果が大きい。図-9に火元の建物をそれぞれ消火したときの、出火後60分の延焼動態を比較して示す。防火造である建物番号22あるいは30のいずれかを出火時に消火できたとしても、60分後に



(a) 延焼世帯数の時間変化



(b) 延焼面積の時間変化



(c) 累積重要度の時間変化

図-11 各評価項目の時間変化

はもう一方の建物からの延焼が防火造の建物郡全体に広がっており、延焼をくい止める効果は期待できない。準耐火造の建物番号3を消火しても、両隣の延焼は妨げられるが、他の火元の建物からの延焼が速く、ほとんどの建物が類焼していることがわかる。また、これの南側が防火造の建物であり、かつ、棟間の距離が長いことから南側への延焼はもともと阻止できている。このような理由から、建物番号3の消火による効果が小さく現れている。これに対して、建物番号14を消火した場合、それよりも西側の建物への延焼を大幅に遅延させることに役立っており、その結果として、延焼棟数が最小になっている。延焼棟数を評価項目とした場合の、消火による効果順位の時間変化を図-10に示す。出火後60分後の被害を最小にするためには、

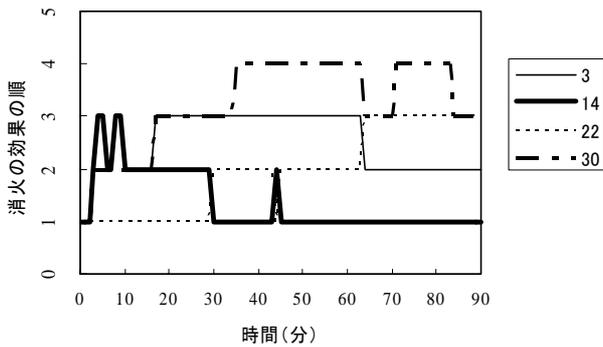


図-12 すべての評価項目を考慮した場合の消火による効果の順位の時間変化

建物番号 14 を消火すると最も効果が大きいということになる。以下建物番号 3,22,30 の順となっているが、図-7 より、これら 3 棟の消火による効果の差は小さい。

消火優先順位を決めるにあたっては、必ずしも延焼棟数を最小にすることだけを目的にするわけではない。図-11 に延焼棟数を除く他の評価項目について、火元の建

物をそれぞれ消火した場合の被害実数の時間変化をグラフ表示している。いま、式(1)の評価関数において、それぞれの評価項目の重み係数 $W(j)$, $j=1,2,3,4$ をすべて 1.0 として消火による効果の順位をつけると図-12 のようになる出火から 60 分後の被害を最小にするためには、建物番号 14 を消火すると最も効果が大きく、延焼棟数のみで評価した場合と同じになる。以下建物番号 22,3,30 の順となっており、延焼棟数のみで評価した場合と順位が一部入れ替わっている。図-13 および 14 に本システムの出力画面の例を示す。

ここでは、延焼中の建物のうち、いずれか一棟を消火するという設定でシミュレーションを行ったが、同時に 2 棟あるいはそれ以上を消火できるとして、消火する建物の組み合わせによる効果の順位を算出するようなシミュレーションも本システムでは可能である。また、消火のタイミングのずれを考慮することもできる。

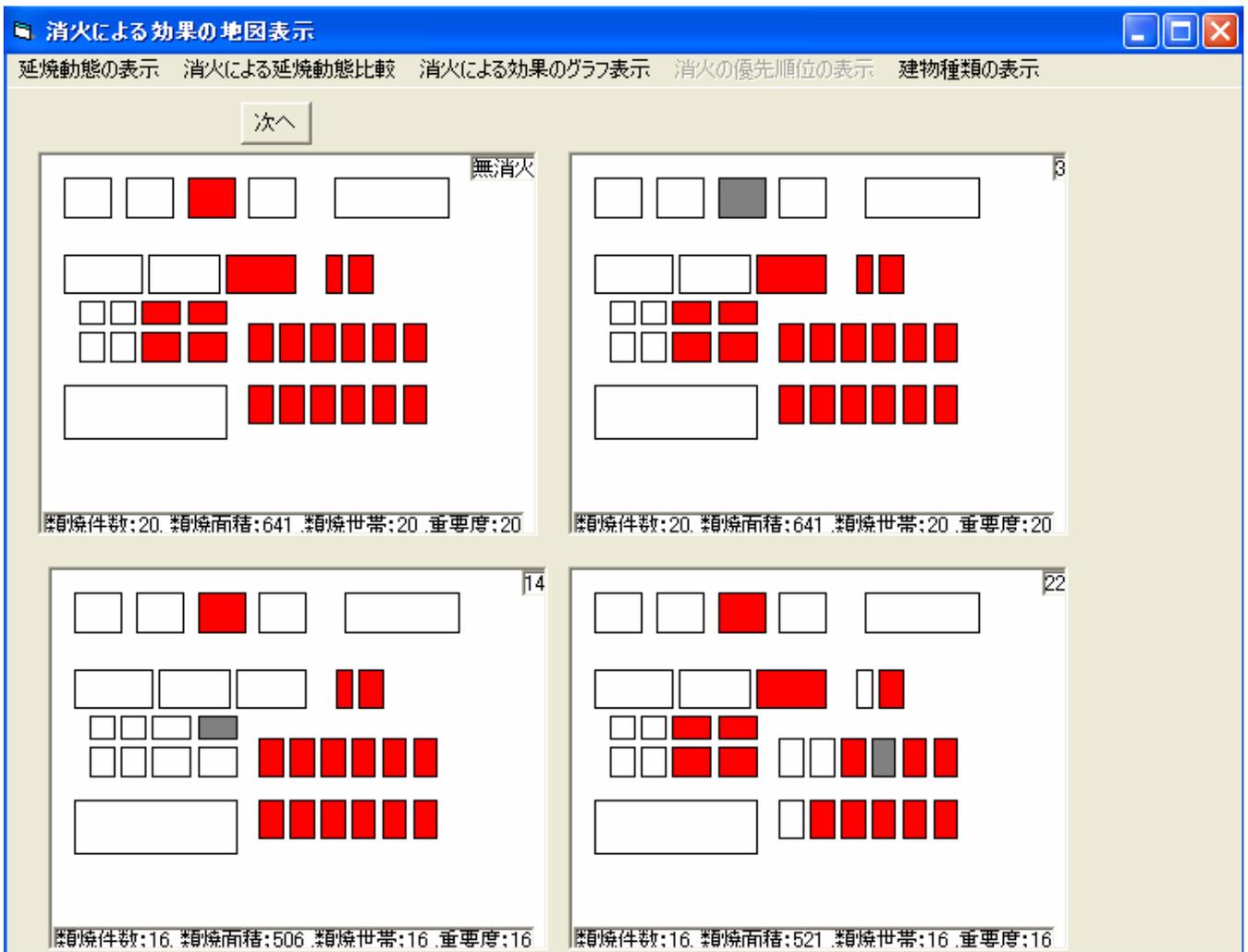


図-13 本システム出力画面の例(消火による効果の地図表示)

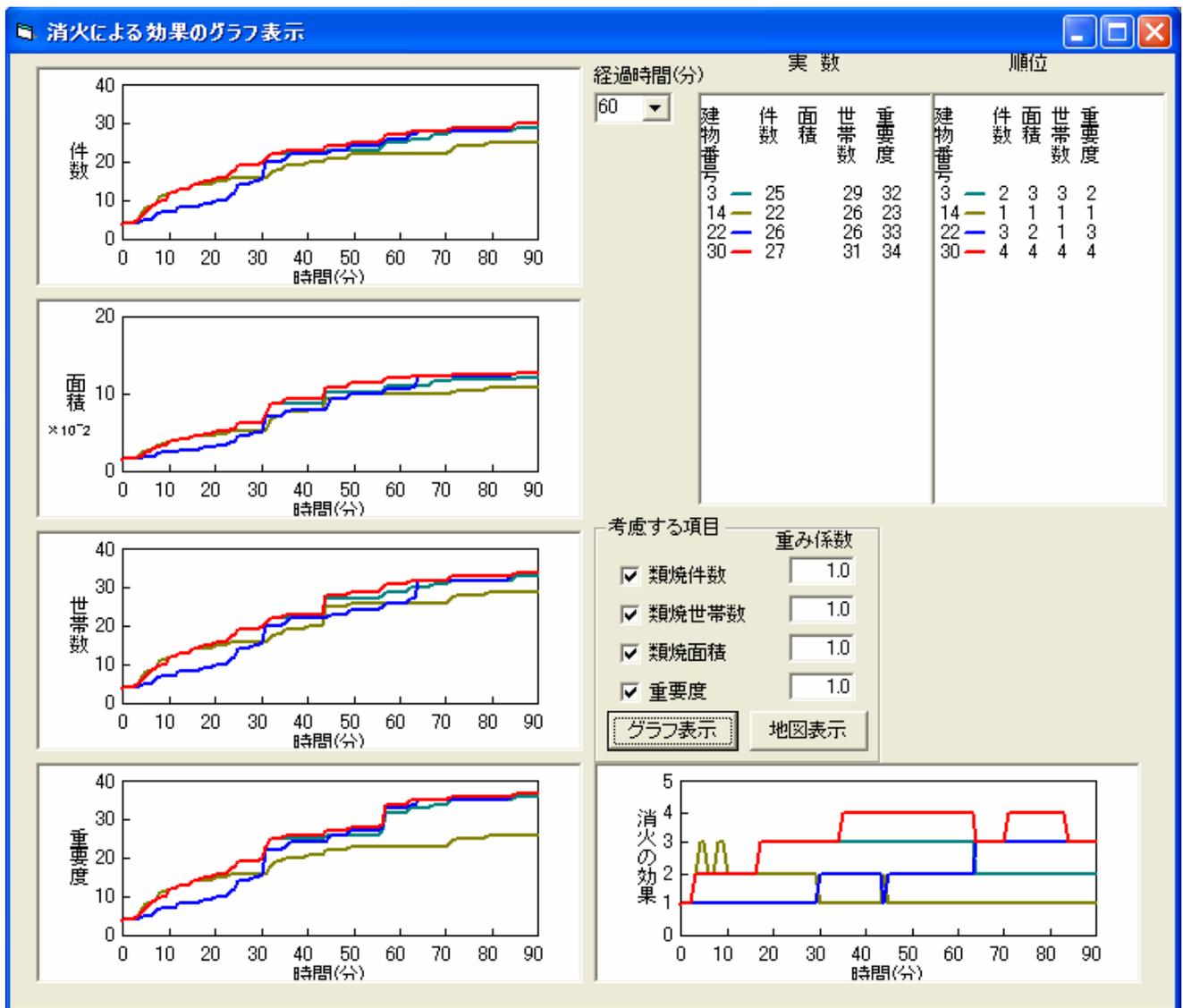


図-14 本システム出力画面の例(消火による効果のグラフ表示)

5. まとめ

本研究では、地震時の同時多発火災における消火優先順位の意志決定支援システムを構築した。

本研究の特徴は、延焼解析に基づいて延焼中の建物毎に消火優先順位を特定するところである。消防活動をリアルタイムで支援するツールとしての利用のみならず、消防活動の訓練や地域の火災に対する安全の評価に対する利用も考えられる。

今後、消防署の位置や消防車の保有台数および消防水利なども考慮し、より高精度かつ高機能のシステムに改良する予定である。

参考文献

1) 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.

2) 上村雄二, 坊池道昭, 矢野公一, 高井広行:神戸市における震災時の消防計画と消防部隊訓練システムに関する一考察, 土木計画学研究・講演集, No.20(2), pp.547-550, 1997.

3) 木俣昇, 鷺見育男:消防防災システムの障害要因のペトリネットシミュレーションに関する基礎的研究, 土木計画学研究・講演集, No.19(2), pp.43-46, 1996.

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, pp.1-248, 2001.

5) 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.

6) 日本火災学会:火災便覧, 共立出版, 第3版, 1997.

- 7) 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, pp.1-233, 1997.
- 8) 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, pp.155-277, 2003.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 村田忠夫:ペトリネットの解析と応用, 近代科学社, pp.1-203, 1992.
- 15) 辻原治, 寺田和啓, 澤田勉: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, 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.17-27, 2006.

(2007.5.18受付)