

市街地の震後延焼における消火能力照査と 防災対策

佐藤 陽平¹・野村 謙太²・小池 武³

¹武蔵工業大学大学院工学研究科
(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

E-mail: g0781606@sc.musashi-tech.ac.jp

²武蔵工業大学都市基盤工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

E-mail: g0517069@sc.musashi-tech.ac.jp

³武蔵工業大学都市基盤工学科教授 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

E-mail:tkoike@sc.musashi-tech.ac.jp

木造家屋が密集する市街地では、震後延焼被害の危険性が高く、早急な対策が必要とされている。1995年1月に発生した阪神・淡路大震災では、約300件の火災の発生と、建物の倒壊による道路閉塞により延焼被害が拡大した。今後発生が予測される首都直下型地震においても、震後火災は震災によって誘発される二次災害の中で、最も危惧される事象である。

本研究では、震後延焼被害が高いと予測される地域において、延焼被害の把握を目的とした消火能力照査を行った。構造物による道路閉塞を考慮した消防車の到達と火災の延焼をシミュレーションした結果、道路閉塞により到達できないエリアが複数存在する事、並びに延焼が広まり、限られた消防力で対応するためには、市街地全体の耐火率を上げることが必要であるという結果を得た。

Key Words : fire following earthquake ,fire fighting, street blockade, fire spread simulation

1. はじめに

日本では、伝統的に木造建物を建造し、かつ、人口密度が高いことから、地震火災は市街地の宿命といえる被害である。1923年に発生した関東大震災では、発生時刻が11時59分という火気の使用頻度が高い時間帯と、台風の接近による強風が重なり、焼失家屋が21万2000余という地震災害となった¹⁾。

その後、市街地の難燃化と公設消防の整備が進められた結果、日常火災による大火は急減し、地震火災の危険性も改善したものという認識が漠然と広がっていた。しかし、1995年1月に発生した兵庫県南部地震では、阪神高速道路をはじめ、多くの都市構造物が破壊されるとともに、300件近くの火災が発生し、神戸市を中心に約65haもの市街地が焼失し、大きな延焼被害をもたらした。これにより、日本の近代都市においても、耐火性の低い地域では地震火災に対して依然として脆弱であることを認識させる結果となった。

常時での火災は、火災が発生すると、家人または近隣住民による通報が行われ、近隣の消防署から多くの消防車が出動し、大量の放水により消火が行われる。しかし

地震時では、人々パニックや電話回線の不通により、消防署への通報が困難になる。そして、消防車の出動時には、家屋の倒壊などで道路が閉塞し、現地への到達が困難になる。また、火災現場に到達しても消火栓などの消防水利の被災で、必要な水の量が確保できないなどの状況が発生する。このように、地震時の火災に対処するためには様々な対策を必要とする。

今日、東海地震、東南海・南海地震をはじめとする巨大地震の発生が危惧されている。中央防災会議によると、予想される首都直下型地震では最悪の場合、1000箇所以上で火災が発生し、10000ha以上が焼失、10000人以上の住民が死傷する恐れがあると推定されており²⁾、震災による火災被害に対する軽減策が求められている。

しかし、現状の市町村では、木造住宅密集地や道路幅員、オープンスペース等が十分に整っていない地域も多く、地震火災に強い都市を実現するための具体的な工学的知見が求められている。

本研究では、延焼危険度が高い地域において、その地域の延焼シミュレーションと、地震時の道路閉塞を考慮した消防車の到達度評価から、対象地区の消火の可能性について検討し、有効な対策についても検討する。

2．対象地区の選定

(1) 地域の詳細

対象地区の特徴について図2-1で示す．対象地区は東急池上線と東急大井町線の2本の路線と、環状七号線で約その半分の囲まれ、これらを超えて火災が広がることは無いと考えられる．一方で、地域内は車が通行できない幅員の狭い路地が多く、火災の延焼を遮断できるような道路は少ない．火災発生時のこの地域を受け持つ消防署は、荏原消防署旗の台出張所(図2-1左上)となっている．



図-2-1 対象地区の航空写真

(2) 対象地区のモデル化

対象地区のモデル化は、国土地理院が発行する数値地図2500の空間基盤データを用いた．使用するデータは、道路線(ノード、ライン)、街区、公園、公共建物、鉄道であり、これらのデータをシェープファイルに変換し、ERSI社のArc GISを用いて表示させた．さらに、火災の延焼を表示させるための10mメッシュを作成した(図2-2)．



図-2-2 対象地区のノードとリンクとメッシュ

3．道路閉塞率の算定

(1) 道路閉塞率

既存の研究³⁾によれば、道路閉塞は家屋の倒壊確率と、その家屋が道路側に倒れる確率によって求められる家屋

影響値と、道路幅員などに影響される道路影響値で表すことができる．しかし、本研究では車両が通行できるかを評価するため、車両の通行に影響を及ぼす電柱、自動販売機、土塀、看板も加えて評価する．

(2) 道路閉塞算定式

道路閉塞のしやすさを示す第 i 番目の道路 R_i の道路影響値 $P[K(R_i)]$ は次式で定義されている．

$$P[K(R_i)] = P[RW(R_i)] \cdot P[RP(R_i)] \cdot P[RT(R_i)] \quad (3a)$$

ここで、 $P[RW(R_i)]$ は道路幅員係数、 $P[RP(R_i)]$ は歩道係数、 $P[RT(R_i)]$ は街路樹係数である．道路幅員係数は、阪神・淡路大震災での道路別の閉塞率から算出されたものである．

家屋影響値 $P[h(X_k^i)]$ については、次式で定義されている．

$$P[h(X_k^i)] = P[Z^h(X_k^i)] \cdot P[A^h(X_k^i)] \cdot Z^h(X_k^i) \quad (3b)$$

ここで、 $P[Z^h(X_k^i)]$ 家屋倒壊確率、 $P[A^h(X_k^i)]$ は道路側倒壊確率である．

(3) 追加する要素について

電柱、看板、自動販売機、塀についても同様に式(3b)から各要素の道路通過不可能確率 $P[E(R_i)]$ 、 $P[C(R_i)]$ 、 $P[D(R_i)]$ 、 $P[W(R_i)]$ を求めることができる．倒壊確率 $P[Z^y(X)]$ 、道路側倒壊確率 $P[A^y(X)]$ はそれぞれ表3-1、3-2の該当する値を採用する．

(4) 道路閉塞率の算定

要素ごとに求めた道路通過不可能確率より全要素の道路通過不可能確率を求める． i 番目の道路 R_i の沿線での全要素の道路通過不可能確率 $P[DC(R_i)K(R_i)]$ は次式で与えられる．

$$P[DC(R_i)K(R_i)] = 1 - (1 - P[H(R_i)]) \times (1 - P[E(R_i)]) \times (1 - P[C(R_i)]) \cdot (1 - P[D(R_i)]) \cdot (1 - P[W(R_i)]) \quad (3c)$$

したがって、道路閉塞率 $P[DC(R_i)]$ は式(3a)と式(3c)より次式で与えられる．

$$P[DC(R_i)] = P[K(R_i)] \cdot P[DC(R_i)K(R_i)] \quad (3d)$$

表-3-1 各要素の倒壊確率: $P[Z^y(X)]$ $y=E, C, D, W$

電柱	0.03	看板	0
自動販売機	0.21	塀	0.45

表-3-2 各要素の道路側倒壊確率: $P[A^y(X)Z^y(X)]$

電柱	0.7	看板	0
自動販売機	0.8	塀	0.9

対象地区の道路閉塞率を算定するために必要な道路に関する道路幅員や道路閉塞物のデータを入手するために現地調査を行った。現地調査は、道路閉塞物数の調査と写真による道路閉塞物の撮影を行った。

(5) 対象地区の道路閉塞率

前述した、道路閉塞率算定式と現地調査結果から対象地区の道路閉塞率を算定し、結果をGIS上で表示した。ただし、道路幅員が3m以下のものについては、消防車の通行が通常でも不可能として、閉塞率は100%としている。

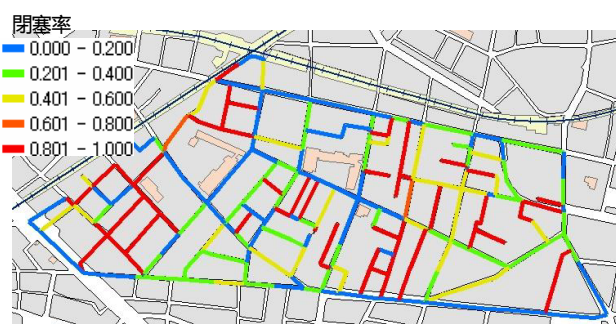


図-3-1 対象地区の道路閉塞率

4. 火災延焼シミュレーション

(1) 出火数の推定

本研究では、兵庫県南部地震のデータ⁴⁾における建物全壊率と出火率から出火数を算出する。対象地区の家屋数は約1500棟であり、地震による全壊率が30%と多く見積もっても対象地区での出火数は1件と推測される。

(2) 延焼速度式

本研究では比較的大規模な空間を対象として計算をするため、建物1棟1棟の詳細なデータを基に計算せずに、ある程度まとめた地区ごとの市街地状況に関する情報に基づいて、後述する延焼速度式を活用して計算を行う。

東京消防庁は、東京消防庁管内に発生した昭和55年～57年までの3カ年の建物全焼火災100平方メートル以上447例のデータに基づき検討された「東消式97」を1997年に開発した。兵庫県南部地震のデータも考慮に入れたもので、酒田の大火(1976)や兵庫県南部地震時(1995)の火災被害の再現性もある程度確認されている。この手法を用いて、出火時の風速、木造混成率、建ぺい率、風向き、建物全壊率に対しての延焼規模の計算を風下、風上、風側で行う。

$$V(t) = \frac{V_f}{1 + (1.3 - 0.3e^{-0.3t}) \left(\frac{V_f}{V_0} - 1 \right) \exp \left[-\frac{0.5V_f}{V_f - V_0} t \right]} \quad (4a)$$

$V(t)$: 延焼速度 (m/h)

V_0 : 初期延焼速度 (m/h)

V_f : 最終延焼速度 (m/h)

t : 経過時間 (h)

(3) 延焼モデルの改良

東消式 97 は、対象地区の特性値（隣棟間隔、耐火率）が全て一様という条件で行うため、延焼が一様に広がる⁵⁾。しかし実際の市街地は、道路や耐火建物などの分布が異なるため火災延焼は一様に広がらない。

そこで、対象地区に様々な特性情報を持ったメッシュ(図 4-2)を重ね合わせ、メッシュ単位で延焼規模を計算し、耐火特性の空間的変動の影響を考慮した延焼シミュレーションを行う。そのため、式(4a)の初期延焼速度 V_0 と最終延焼速度 V_f を場所 x の関数として式を改良した。

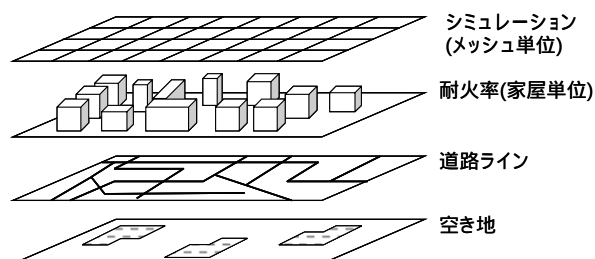


図-4-2 延焼特性パラメータの空間分布情報

対象地区でのシミュレーションを行う前に、延焼モデルの適合性を評価するため、兵庫県南部地震による実際の火災延焼動態図⁴⁾と 12m メッシュで行った延焼シミュレーションとを比較し整合性の確認をした。

(4) 対象地区での延焼シミュレーション

a) 対象地区の家屋分布

現地調査により作成した道路調査表を基に、対象地区の家屋の分類を行った。分類は、鉄筋造(新築)、鉄筋造(旧築)、木造(新築)、木造(旧築)の大きく4つにした。次に、分類した家屋に対して耐火造率を設定し、10mメッシュで色分けした。耐火造率の設定は、鉄筋造(新築)=0.9、鉄筋造(旧築)=0.7、木造(新築)=0.6、木造(旧築)=0.4とした。

なお、10mメッシュによるデータとして、国土地理院の細密数値地図があるが、この地図データは、最新のものですので1994年のデータあること、耐火建築についてのデータが含まれていないことから本研究には使用しなかった。

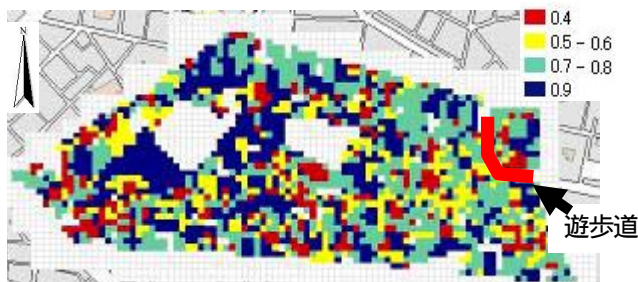


図-4-3 対象地区の耐火造率分布

図 4-3 から、対象地区の耐火造は全体として東の部分の耐火率が低くなっていることがわかる。

b) 延焼シミュレーション

対象地区のデータを用いて延焼シミュレーションを行った(図4-4)．耐火率の低い地域で出火させ、風向は東の風とした．また、空き地や学校、線路も兵庫県南部地震の事例から延焼しないものとした．風速は東京都の平均風速⁶⁾である5mとし、延焼時間は8時間までとした．



図-4-4 火災1のシミュレーション結果

シミュレーション結果から、耐火造率の低い地域で延焼が拡大することを確認した．また、オープンスペースを回り込むような延焼や、延焼遮断帯である道路を越えてしないことを確認した．

5．消防車の到達度と消火の可能性

(1) 消防車通行シミュレーション

a) 対象地区の道路ネットワーク

本研究では、消防活動を行うための消防車の位置を、対象地区の各ノード地点とした．しかしこの状態では、道路長の長い場所では、消火栓の位置が100m以上は離れることになり、現実に即していない．そこで、ノード間の距離が50m以上離れないように、リンクの途中にノードを設置し、この道路ネットワークを用いて、シミュレーションを行う．また、消防車は地震発生後の緊急時においても、一方通行に従って通行する．

b) シミュレーション方法

消防車の走行シミュレーションの流れを以下にフロー

チャートで示す．

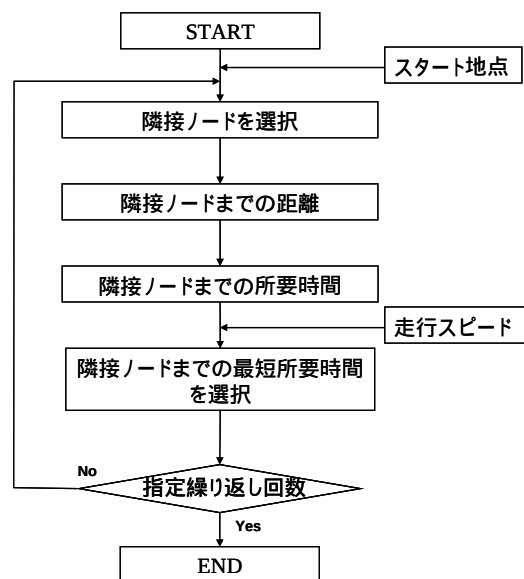


図-5-1 走行シミュレーションの計算フロー

走行シミュレーションのイメージ図を図6-3に示す．隣接ノードに進むことを1ステップとして計算を行う．A地点からスタートすると、1ステップでBに進み、2ステップでC・Dに進むことになる．ステップごとに、各ノードの到達時間を計算する．ノードへの到達に複数のルートがある場合、最小値をそのノードの到達時刻とする．

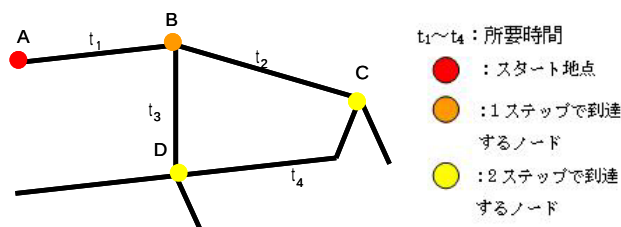


図-5-2 シミュレーションイメージ

c) 対象地区での走行シミュレーション

走行シミュレーションの精度確認のため、一方通行のみを考慮したシミュレーションを行った．結果を図5-3に示す．設定条件は、阪神大震災での消防車の走行スピードから15km/hとし、スタート地点は、図に示したとおりである．

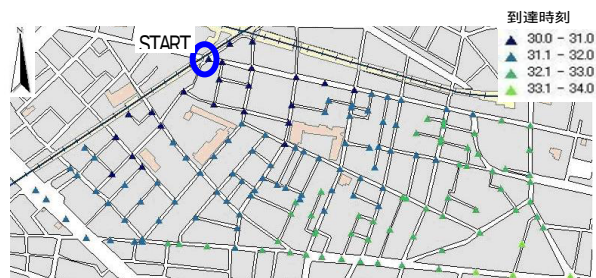


図-5-3 道路閉塞が無い場合のノードへの到達時刻

全てのノードに到達できていること、数点のノードについて所要時間の確認を行い、正確に計算が行われていることを確認した。また、到達時刻から対象地区はスタート後、4分程度で全てのノードに到達できるという結果を得た。

次に、3章で算出した道路閉塞率を用いて、道路閉塞を考慮した走行シミュレーションを行った。スタート地点と走行スピードは図5-3と同様である。道路閉塞は、50%を閾値として、それ以上の道路を閉塞させた。

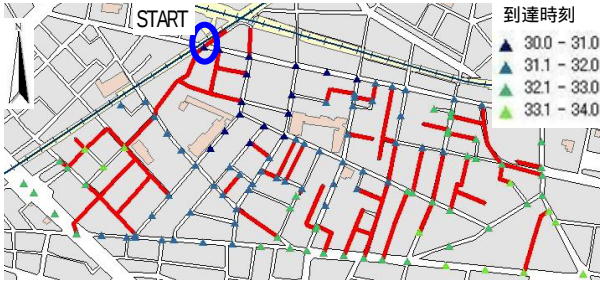


図-5-4 閉塞率50%以上の道路を閉塞させた場合

図5-4から、閉塞率50%以上の道路を閉塞させた場合でも、迂回することで大幅に到達時間が遅れるといった状況は見当たらなかった。

(2) 消防車の到達度

消火活動を行う際、消防車は公設消火栓が設置されている場所で停止し、そこから消防活動を行う。本研究では、消防車が停止する位置を各ノードとしているため、到達すべきポイントは火災に最も近いノードとなる。そこで、シミュレーションでは、火災が到達しているノードに隣接するノード、火災が到達しているリンクに最も近いノードを消防活動ポイントとした。

消火活動ポイント数は、火災発生後、延焼面積の増加に伴って増加し、消防車が到達可能なポイントも増加する。そして、消防活動は、消火活動ポイントに消防車が到達することで行うこととする。

本研究では、消防車の走行シミュレーションにおける現場到達状況について、到達度指標を用いて行う。到達度指標は、以下の式で求める(5a)。

$$R_T(i) = \frac{c(i)}{a(i)} \times \frac{c(i)}{A(i)} \times 100 \quad (5a)$$

$R_T(i)$: 時刻*i*における到達度指標(%)

$a(i)$: 時刻*i*での到達可能な消火活動ポイント

$A(i)$: 時刻*i*での火災を取り囲む消火活動ポイント数

$c(i)$: $a(i)$ と $A(i)$ が重なるポイント数

(3) 消火の可能性

所要消防力の基礎となる放水口数(K_n)は火面周長 $S(m)$ より算出する方法がある⁷⁾。火面周長とは、火災が広がる一番外側の周りの長さのことを言う(図5-5)。一般に放水口数 K_n と火面周長 $S(m)$ は次式で表される。

$$K_n = S/W \quad (5b)$$

K_n : 放水口数(本)

W : ホース 1 本当たりの平均正面幅 (m / 本)

S : 火面周長(m)

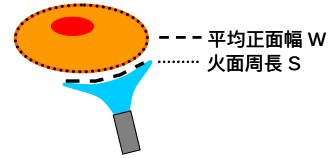


図-5-5 火面周長と平均正面幅

(5b)式は、ホースによって火災を取り囲める場合に消火が可能であることを表している。火面周長 S については、神戸市の地震時の資料⁸⁾と東京消防庁の資料から、以下の式を得ることが出来る。

$$S_{mean} = 1.11A^{0.655} \quad (5c)$$

$$S_{max} = 2.49A^{0.596} \quad (5d)$$

$$S_{min} = 0.259A^{0.770} \quad (5e)$$

火面周長と焼損面積の関係から、本研究では S_{mean} を用いて消火の可能性について検討する。算出した火面周長と必要消防車数の関係を図5-6に示す。

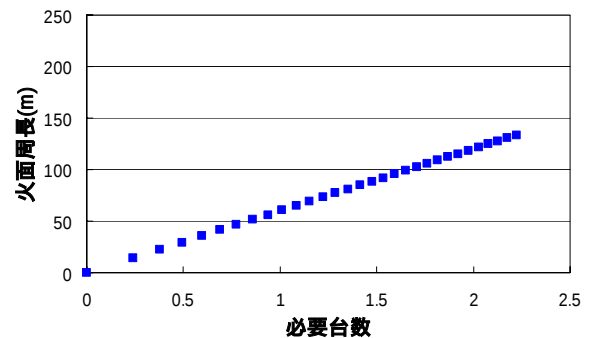


図-5-6 消防車の必要台数と火面周長の関係

消防車1台は、放水口数を4つ持ち、ホース 1 本当たりの平均正面幅 W は15mとした。本研究では、給水性能を100%として、式5b,5cから図5-6より、延焼面積と必要消防車数の関係を表したものを図5-7に示す。

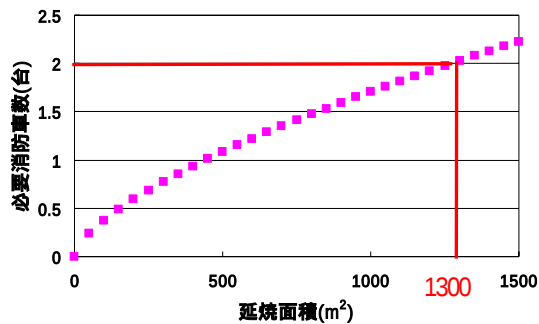


図-5-7 延焼面積と必要消防車数の関係

対象地区での火災に駆けつけることができるポンプ車数を2台とすると、対象地区の0.6%に当たる1300m²が限度であるという結果が得られた。

6．総合シミュレーション

(1) 計算フロー

4章、5章で示したシミュレーションの関係を図6-1にフローチャートで示す。

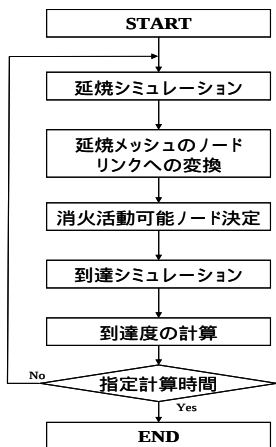


図-6-1 計算フローチャート

シミュレーションは、指定した時間までの延焼シミュレーションを先に行い、その結果から、閉塞リンク、閉塞ノードを決定し、到達度の計算を行う。

(3) ケーススタディ

a) 計算条件

対象地区において、延焼・消防車の到達シミュレーションを行った。出火点は、耐火造率が全体的に低い地域とした。表6-1にシミュレーションの条件を示す。

表-6-1 シミュレーション条件

風向	風速	道路閉塞	一方通行	走行スピード
西	5m	50%以上の道路	有	15km/h

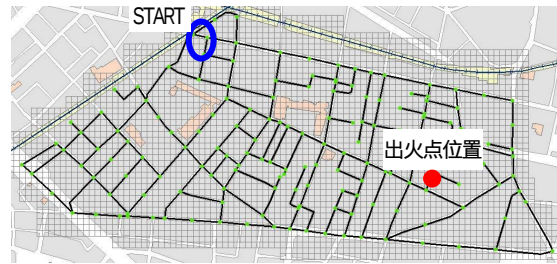


図-6-2 出火地点とスタート地点

b) シミュレーション結果

64分後の延焼シミュレーション結果を以下に示す。



図-6-3 延焼シミュレーション結果

延焼は耐火造率が全体的に低いため、円形の形に広がる延焼となった。以下に時間ごとの延焼面積を示す。

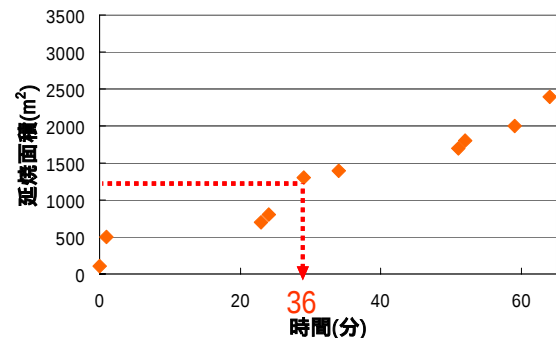


図-6-4 時間ごとの延焼面積

消火可能限界である1300m²から、対象地区では出火後30分程度で消火活動を開始していなければならないことが分かる。そこで、出火後30分にスタート地点に到達した場合の到達度シミュレーションを行った結果を以下に示す。

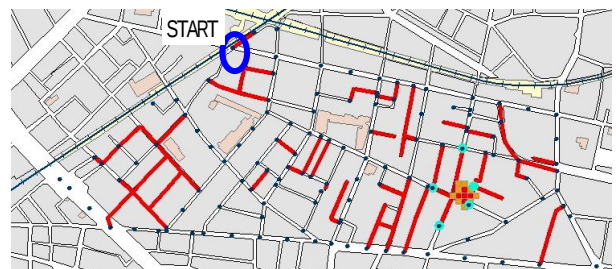


図-6-5 34分後の消火活動ポイントと到達可能ポイント

出火後34分における消防活動ポイントは5ヶ所となり、到達可能なポイントは4ヶ所となった。到達できなかった残りの1ヶ所は道路閉塞が原因である。

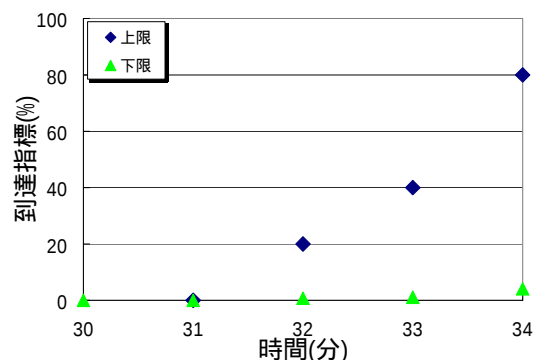


図-6-6 時間ごとの到達率

消防車が到達すべき5ヶ所のポイントを理解しているとすると、そのうちの4ヶ所に到達できるということで、最終的な到達率は80%となった。一方で、火災の延焼状況は、時刻と共に刻々と変化し、到達すべき場所が分からない場合、到達率は3%となった。よって、到達率は上限で80%、下限で3%となった。

c) 対象地区の特徴

これまでの結果から、対象地区について得られた事を以下に示す。

- ・消防車はスタート地点から、4分程度で各ノードに到達できる。
- ・対象地区では出火後30分程度で消火を開始しなければ消火は困難となる。

(4) 対策の検討

c)で述べた対象地区の特徴から、防災対策について検討する。シミュレーション結果から、現状では30分程度で到達しても、消火活動を開始しなければ、消火が困難であるという結果を得た。そこで、到達時の延焼範囲をできる限り、小さくする必要がある。そこで、耐火率を90%とし、シミュレーションを行った(図6-7)。

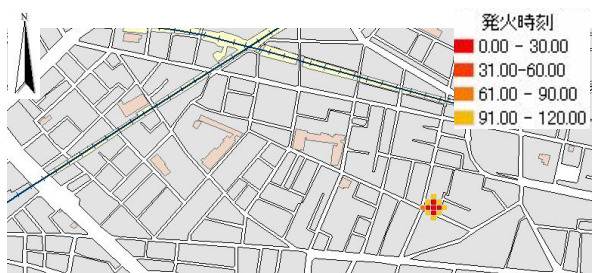


図-6-7 耐火率90%での120分後の延焼範囲

次に時間ごとの延焼面積を以下に示す。

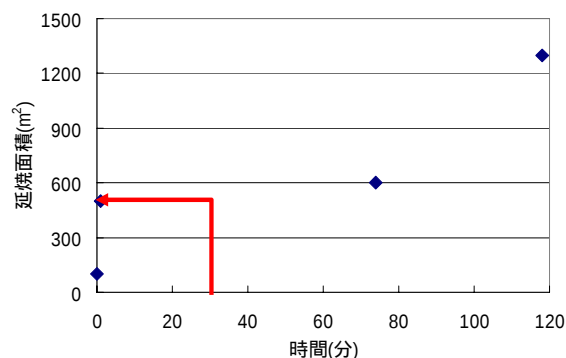


図-6-8 耐火率90%での時間ごとの延焼面積

以上の結果から、耐火率を上げることが対策として有効であることが確認できた。また、幅員が狭く消防車が進入できない道路については、道路の拡幅が望ましいが、長い時間を要することになる。そこで、可搬ポンプ車を設置することで、火災現場への水の供給が可能となり、しかも早期に駆けつけることが出来ると考えられる。

そして、これらの対策が具体的にどの程度必要であるかを把握するために、対象地区を22の街区に分け(図6-9)、各街区でシミュレーションを行い、必要な対策について検討した。

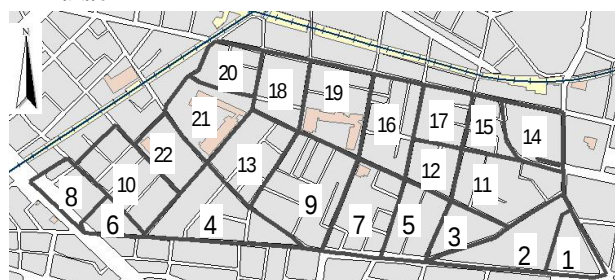


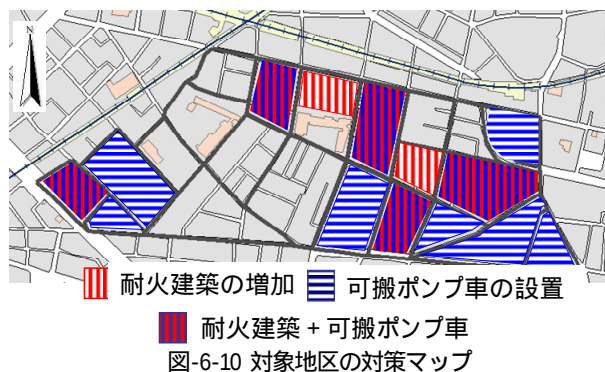
図-6-9 対象地区の分割

前述したシミュレーションと同一条件のもと、出火後30分でスタート地点に到達するとし、34分後までシミュレーションを行った。エリアごとの延焼面積と到達率の結果を表6-2に示す。

表-6-2 各エリアの計算結果

エリア	延焼面積(m ²)	到達率(%)
1	800	0
2	900	0
3	800	0
4	500	0
5	1200	40
6	1500	50
7	700	0
8	1200	0
9	500	50
10	1000	0
11	1200	33
12	1100	100
13	800	100
14	1000	0
15	900	100
16	1100	0
17	800	100
18	1600	0
19	1200	66
20	700	50

対策として、34分後の延焼面積が1000㎡を超える場合、耐火建築を増加させる対策を必要とし、また、34分後の到達度評価により、上限が50%を下回る場合、可搬ポンプ車の設置の必要性があったとした。これらを、図6-10で図に示した。これによると、耐火建築の増加と可搬ポンプ車の設置の両方の対策をしなければならないエリアが5ヶ所あることが分かった。



8. まとめ

(1) 結論

本研究では、東京都都市整備局が発表する地震による地域危険度調査結果から、震後火災による延焼危険度が高い地域の現状評価と防災対策について論じた。

シミュレーションは、道路閉塞を考慮した消防車の到達シミュレーションと火災の延焼シミュレーションについて行った。

数値検討結果によれば、下記の事項が明らかになった。

1. 道路閉塞率が50%以上の道路を閉塞させても、比較的多くのノードに到達できるが、30%以上の道路を閉塞させるとほとんどの道路が閉塞する。
2. 道路幅員が狭く、消防車の進入できない道路が多く、火災発生時に現場に到達できないエリアが多く存在する。

3. 対象地区では、出火後30分程度で消火活動を開始しなければ消火は困難である。

対策を検討した結果以下のことが明らかになった。

- 1) 対象地区の耐火造率を90%に上げることで、延焼速度を遅らせ、消火の可能性を上げることができる。
- 2) 道路幅員が狭く、消防車の進入ができない場所では、長期的な対策としては、道路幅員の拡張、短期的には、可搬ポンプ車の設置による対応が効果的である。

参考文献

- 1) 塚越功、梶秀樹：都市防災学 / 地震対策の理論と実践，学芸出版社、2007.3.10
- 2) 内閣府 情報防災のページ：
http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_syuto/syuto_top.html
- 3) 床井則友・片谷教孝：災害時における道路ネットワークの信頼度，1997年度日本オペレーション・リサーチ学会秋季研究発表会，pp.78-79
- 4) 日本火災学会：1995年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書
- 5) 岩見達也：延焼シミュレーションモデル～実火災との延焼速度比較～，日本建築学会大会学術講演便概集，2005.9
- 6) 東京都環境局 風力発電サイト：
<http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/sgw/renewable/lalala/results.html>
- 7) 保野健治朗ほか：平常時及び地震時火災の所要消防力と火面周長に関する基礎的研究，日本火災学会論文集 1997.Vol.47.No1,2
- 8) 日本建築学会：阪神淡路大震災調査報告 火災・情報システム 1998.10.20

FIRE DISASTER PREVENTION ASSESSMENT UNDER THE SEISMIC RISK IN A CONGESTED CITY AREA

This paper describes fire disaster prevention assessment under the seismic risk when a severe earthquake strikes a congested area of a modern big city.

Congested city area has high risk of fire following earthquake so immediate measures are needed. In 1995 Kobe earthquakes, large scale of fires occurred. There were 4 major causes. They are congested residential areas, old timber housing, street blockades, and too narrow roads for a fire engine.

The main purpose of this study is to investigate the fire fighting power under the fire following earthquake and examine preventive measures. Discussions will be done about the arrival time of the fire engine and possibility of the fire extinguishing. Then fire fighting measure, architecture measure and city planning measure will be mentioned.