

地震時における消防力の効果的な運用

糸井川栄一，熊谷 良雄

阪神・淡路大震災の事例に見られるように，大規模地震時には，多くの建物倒壊によって住民の生き埋めや，同時多発火災が発生することが予想される．これに対応する消防力は，人的・物的被害の大きさに比較して十分に対応するには非常に限られた資源である．この消防力を大地震発生後に戦略的・効果的に運用することが必要不可欠の課題となっている．本稿はこの問題に 대응するため，震災時に必要な消防活動のうち消火活動と救出活動に注目し，同時多発した火災と救出事象に対して消防機関がどのような対応を行うことが最も効果的に被害を軽減しうるか，検討を行ったものである．

キーワード：大規模地震，消防隊，消防団，市街地火災，消火活動，救助活動

1. 研究の背景と目的

大規模地震時における消防力（ここでは，公設消防としての消防隊・消防団を指す）は，発生が予測される人的・物的被害の大きさに比較して十分に対応するには非常に限られた資源である．この消防力を大地震発生後に戦略的・効果的に運用することが，被害の拡大を未然に防ぐためには必要不可欠の課題となっている．しかしながら，阪神・淡路大震災の消防対応を例にとってみても，十分戦略的な活動が行われたとは言い難い．駆け込み通報などの覚知に基づいて消火活動に向かう途中の消防車両が，途中の被災現場で倒壊家屋に埋まった住民を救出する要請を受けて，一部隊員が救出活動のために途中の被災現場で対応するなどの状況も見受けられた．近い将来予想される各地での大震災時の消防力運用方針を考える上で，消火活動や救出活動をどのような方針の下で実施すれば被害を効果的に軽減できるかを早急に検討することが重要な課題である．

本稿はこの問題に 対応するため，震災時に必要な消防活動のうち，消火活動と救出活動に注目し，火災拡大予測を行いつつ，この二つの活動を計算機上でシミュレーションし，その活動の効果を算定する「消火・救出活動支援演算装置」を開発し，同時多発した火災と救出事象に対して消防機関がどのような対応を行うことが最も効果的に被害を軽減しうるか，同装置を用いて行ったシミュレーション実験結果について述べるも

いといがわ えいいち，くまがい よしお
筑波大学 大学院システム情報工学研究科
〒305-8573 つくば市天王台1-1-1

のである．

2. 「消火・救出活動支援演算装置」の概要

消火・救出活動支援演算装置は，消防力の一定の運用方針（例えば消火活動を優先，もしくは救助活動を優先，通報による覚知時刻順対応など）に基づいて，建物1棟ごとの延焼拡大・阻止と救助活動を同時に計算し，一定時間後の活動の成果（消火件数・救助者数など）と被害程度（焼損面積，死者数など）を出力することを目的としたものである．

「消火・救出活動支援演算装置」は，発生した火災・救助事象（与件として与える）に対して，火災の拡大を予測計算しつつ，被害の覚知から隊選別・出場（出勤），展開，放水/救助の各消火・救助活動およびその活動による被害状況計算がGISベースのシステム上に実現されている．各活動は，一定の資源と所要時間と要するものとしてその算定モデル内生化されている．図1は「消火・救出活動支援演算」の基本概念

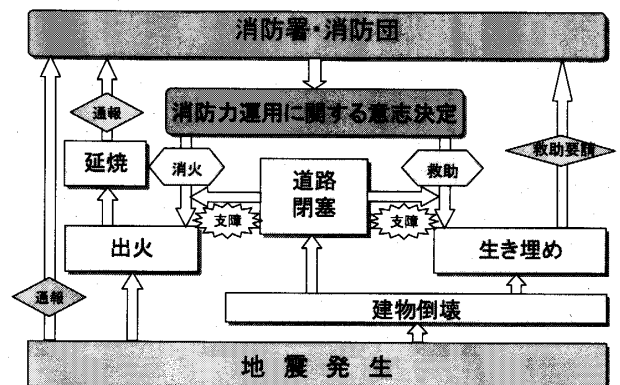


図1 消火・救出活動支援演算装置の基本概念

を示したものである。

地震の発生に伴う消防隊・消防団の消火活動と救出活動（以降、二つを総称して消防活動と呼ぶ）は以下に示す状況下で展開すると想定される。消火活動地震の発生によって建築物の構造的被害が生じ、この結果、倒壊建築物を中心としてその内部にいた人々は一部生き埋めの状態になる。また、地震の振動によって、火気器具を中心とした原因によって相当数の出火が見込まれ、出火後、住民によって消火できなかった火災は一棟火災を経て市街地火災となる。一方で、建築物の構造的被害は市街地内の道路を閉塞させるため、消防隊・消防団が消防活動を展開する際に通行上の支障が生じる。

このような状況下で、生き埋め者救出や消火の要請が駆け込み通報や119番通報などによって覚知されるわけであるが、覚知された複数の要請の中からどの現場を優先して消防活動を展開することが望ましいのかに関する活動方針の方向性を示すことが、本稿の目的である。そのために、同装置に様々な活動方針に従って被災現場に優先順位をつける機構を内生化し、その中から一定の活動方針を選択してその活動方針に従った消防活動を行った場合の被害状況（人的被害、物的被害）をシミュレーション計算する。様々な活動方針に基づいた計算結果から、最も被害を低減せしめる活動方針を効果的な消防運用方針として検索するものである。

2.1 火災拡大・消火活動に関するモデル

(i) 出火点の位置設定と延焼拡大モデルの概要

与件として与えられる出火数にしたがって、対象市街地内にランダムに出火点を設定する。地震後の出火時間は阪神・淡路大震災時の火気器具からの分析事例に基づいて確率分布するとし、乱数で定める。ある建物からある建物に延焼拡大するか否かは、一方の建物が火災中である時に他方に着火するかどうかで判定される。この着火するか否かの判定の対象となる建築物は、その構造・規模・隣棟間隔等でその目安をつけることができる。ある建物から別の建物に延焼する可能性のある候補群同士を延焼経路によって結びネットワークを構成し（延焼経路ネットワークと呼ぶ）、建物内・建物間の延焼拡大判定計算の対象経路とする。

延焼拡大は、建物の着火時間が最も早くなる延焼経路で延焼が進むものとする。着火時間を計算するためには、建物内および建物間の延焼速度が与えられる必要があるが、これらは東消式2001マイクロ式[1]で与

える。

(ii) 消防における覚知および覚知時間

消防による火災の覚知手段として大きく、①住民通報、②消防機関による情報収集活動として高所見張りや地震発生後の巡回、の二つを想定している。住民通報と消防機関による情報収集は互いに独立な事象であると考え、両者の通報時刻を比較して、早いものを「覚知時間」とする[2]。住民の通報手段である駆け付け通報と119番通報による覚知時刻は、阪神・淡路大震災の際の分析事例に基づいている。

(iii) 消火活動およびその効果の概要

建物を対象として消火活動効果を評価する方法の基本は、火災中の建物から出ている隣接建物への延焼経路を、ホースからの放水によって遮断することで代表させる。現実の消火活動では延焼経路が明示化されているわけではないから、火災建物群を囲む凸包領域が集团的に炎上しているものとして、その凸包領域を横切る延焼経路を、ホースが受け持つ担当火面長で包囲していくものである。

この担当火面長については、これまでは、筒先1口あたり概ね10mという数値が経験的に使用されてきているが、火災の発生している周辺市街地状況によって筒先1口あたりの有効範囲は異なる。そこで、平成7年から14年までの間に東京消防庁管内で発生した建物火災のデータを活用し、出火地点周辺の市街地状況を加味した筒先1口あたりの有効範囲を求める計算式を導出した。得られた重回帰式は以下のとおりである。

$$y = 0.336x_1 + 0.019x_2 + 0.073x_3 + 0.098x_4 + 0.429$$

ただし、 y ：放水口数

x_1 ：延焼建物棟数[-]

x_2 ：延焼床面積[m²] (≥20 m²)

x_3 ：木造系建ぺい率[%]

x_4 ：非木造系建ぺい率[%]

ホースの筒先配置の順序は、最先着消防隊は風下側を起点として最も多くの延焼経路を遮断できる位置に配置され、火面周長がすべて包囲されるまで順次降着消防隊によって筒先範囲に間隙が生じないように配置するものとした。なお、個々の火災の完全鎮火までの焼損面積あたり放水量は、耐火建物1棟火災で0.3 m³/m²、木造・防火造の1棟火災で0.5 m³/m²、準耐火建物では0.4 m³/m²とした。

2.2 救助活動に関するモデル

(i) 生き埋め者の位置設定

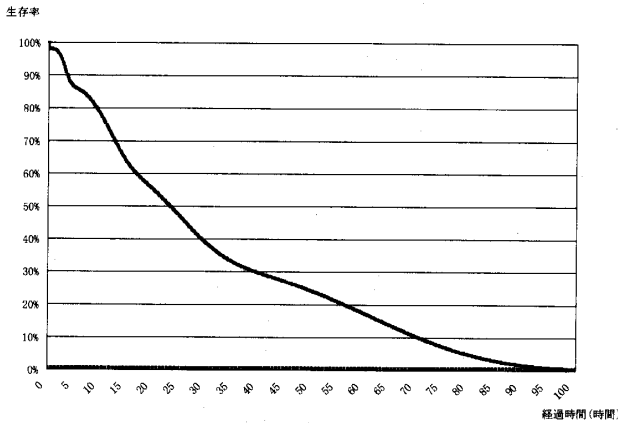


図2 生理め者の余命和特性関数[3]

与件として与えられる生理め者数にしたがって、対象市街地内にランダムに生理め者を設定する。

(ii) 生理め者の生存時間

太田ほかによる研究では、人間の寿命分析や機械系の故障を合理的に説明する確率関数であるワイブル分布関数の考え方を応用することにより、阪神・淡路大震災の救助事例に基づいて、「余命和特性関数」として地震に伴う死の発生（死に致るまでの余命特性＝待ち時間）の定量化を試みている[3]。図2に「余命和特性関数」を示す。本稿では、この「余命和特性関数」をそのまま適用する。

(iii) 生き埋め者の救出要請の覚知時間

消防機関が生理め者の発生を覚知するまでの時間は、それぞれの生理め者に対し、「付近住民が生理め者を発見するまでの時間」と「生理め者情報を通報するまでに要する時間」の和とする。付近住民が生理め者を発見するまでの時間については、阪神・淡路大震災の事例分析から表1のように設定し、この分布に応じて確率的に設定した。また、「生理め者情報を通報するまでに要する時間」は、阪神・淡路大震災の事例を見ても、生理め者の救出要請は主として消防署所（消防署および消防出張所の総称）への駆付けにより通報されるものとしているため、以下のように生理め者発生地点と消防署所との距離により決定した。

生理め者を通報するまでに要する時間 [min] =

$$0.006 \times \text{消防署所までの直線距離 [m]}$$

(iv) 生理め者を救出するために要する時間

生理め者を救出するために要する時間は、生理め者がどのような建物内で生理めとなり、どの隊（特別救助・ポンプ隊・消防団）により救助されるかにより異なる。阪神・淡路大震災の事例分析から、表2のように設定した[4]。

表1 地震発生から5時間までの生理め者発見割合

地震発生からの時間	生理め者が発見される割合
地震発生と同時	4.0%
地震発生～1時間後	25.0%
1時間後～2時間後	21.5%
2時間後～3時間後	19.0%
3時間後～4時間後	16.5%
4時間後～5時間後	14.0%

表2 地震発生からの生理め者発見割合

生理め者の救助に要する時間	割合	
	木造 (木造・防火造)	非木造 (準耐火・耐火造)
地震発生 ～ 0.5時間	5.0%	5.0%
0.5時間 ～ 1.0時間	12.5%	7.5%
1.0時間 ～ 1.5時間	25.0%	12.5%
1.5時間 ～ 2.0時間	22.5%	15.0%
2.0時間 ～ 2.5時間	20.0%	10.0%
2.5時間 ～ 3.0時間	10.0%	5.0%
3.0時間 ～ 4.0時間	5.0%	5.0%
4.0時間 ～ 5.0時間	0.0%	5.0%
5.0時間 ～ 6.0時間	0.0%	5.0%
6.0時間 ～ (時間内に救助できない)		30.0%

(v) 生理め者の救助判定

(iii)による「生理め者を覚知するまでの時間」と(iv)による「生理め者を救助するのに要する時間」に消防隊・団の移動時間を加えて「地震発生から生理め者が救助されるまでに要した総時間」を求め、この時間を前述の「余命和特性関数」に当てはめることにより、消防隊等により救助された生理め者が生存の可能性を求める。また、救助前に生理め地点の建物が火災となった場合は死亡と判断する。

2.3 消防隊等が出場可能となるまでの時間

消防隊（ポンプ隊、特別救助隊）は、地震発生と同時に出場待機状態となるので、出場可能となるまでの所要時間は0分、また、消防団は地域住民等により組織されているものの、分団本部等に参集するまでに時間を要することから所要時間を15分とした。消防隊の予備車隊については、参集した職員により編成される隊であることから、出場可能となるまでの所要時間

を30分とした

2.4 消防隊の現場への走行

消防隊等は、消火活動を開始するまでに、以下の手順を踏むものとする。

- (i) 出火点直近の消防水利まで消防車両が最短走行
- (ii) 部署した（割り当てられた）消防水利から出火地点まで消防隊員等によってホースを延長
- (iii) 火災に対する放水を開始

救助活動を開始するまでの活動は、消火活動での「出火点直近の消防水利」を「救助活動拠点」と置き換え、「ホースを延長」を「資機材を準備」と置き換えることにより(i)~(iii)を準用している。なお、(i)の段階で閉塞道路に遭遇した場合には、その閉塞道路を除外した道路ネットワークで再度経路選択を行う。走行速度、移動速度は、既存研究[5]や東京都の想定[6]を参考として(i)、(ii)について消防隊10 km/h、消防団9 km/h、(iii)については、7 km/hとしている。

3. ケーススタディ

3.1 対象消防署の概要

東京23区内には58の消防署が存在し、管内面積や地震時に予想される被害状況等は異なっているため、消防署の選定に際しては、できるだけ多くの項目で平均的な値を示していることを基準として、A消防署を対象とした。A消防署管内の面積は約13.9 km²であり、A区総面積48.16 km²の約29%にあたる。人口は212,483人で、練馬区総人口649,729人の約33%にあたり、世帯数は102,665世帯である。建物の構造別では、木造および防火造の建築物が約70%を占めており、耐火造建築物は約30%となっている。

A消防署には合計8台のポンプ車と特別救助隊が配備されており、練馬消防団には第1分団から第8分団までの8分団と、合計18の資機材倉庫が存在している。また、震災時の利用の可否が定かでない消火栓を除いた消防水利の数は、防火水槽の285基をはじ

め、計536基（箇所）となっている。シミュレーション実験では、A消防署の現有消防力を反映したポンプ隊8隊（うち予備車2隊）、特別救助隊1隊、消防団18隊の合計27隊が活動を実施するものとする。

3.2 被害発生パターンの設定

東京都の被害想定結果等を参考に、表3に示した6種類の「被害発生パターン」を設定した。

3.3 消防機関の消防力運用方針の設定

震災時において、消防機関が実施することが可能な基本的な運用方針は、表4にも整理した下記のような方針であると考えられる。

- (i) 火災が発生している場合には必ず出場し、余力がある場合のみ救助活動に出場する「消火活動を優先した運用方針」
- (ii) 火災の通報、生理め者の通報の別にかかわらず、消防機関が覚知した順に順次出場する「通報に従い活動を行う運用方針」
- (iii) 生理め者が発生している場合には必ず出場し、余力がある場合のみ消火活動に出場する「救助活動を優先した運用方針」

ここでは、以上の3つの運用方針を設定し、シミュレーション実験を実施する。

3.4 ケーススタディ結果[7]

- (i) 発生被害が甚大なケース

図3、4は、表3の被害「高」「高」型（出火件数も生き埋め者数も多い：被害パターン6）のパターンについて、10回のシミュレーションを行い、地震発生

表3 被害発生パターンの設定

被害発生パターン	出火件数(件)	生理め者発生数(人)
1 被害「低」「低」型	3	10
2 被害「低」「中」型	3	100
3 被害「中」「高」型	6	1,000
4 被害「高」「低」型	12	10
5 被害「高」「中」型	12	100
6 被害「高」「高」型	12	1,000

表4 消防機関の消防力運用方針

運用方針	内容
消火活動優先	火災を覚知した場合には必ず出場し、出場した消防隊、消防団のみにより消火が可能である場合には（消防機関に余力がある場合には）、救助活動にも出場する対応方法。救助活動を実施している途中でも、火災を覚知した場合には、救助活動現場から火災現場まで転戦することもあり得る。
通報優先	火災の通報、生理め者の通報の別にかかわらず、消防機関が覚知した順（消防署所に通報された順）に消防隊、消防団を対応させる方法。火災を消火、もしくは生理め者を救助するまで転戦は行わない。
救助活動優先	生理め者を覚知した場合には必ず出場し、消防機関に余力がある場合には、火災にも出場する対応方法。消火活動を実施している途中でも、生理め者を覚知した場合には、消火活動現場から救助活動現場まで転戦することもあり得る。

後6時間の段階で被害等を算定し、指標の各値と平均値を付置したものである。

図3をみると、消火件数は当然のことながら、「消火活動優先」>「通報優先」>「救助活動優先」の順に多くなっており、一方で、生存救助者数は「救助活動優先」>「消火活動優先」>「通報優先」の順である。縦軸、横軸の指標ともに値が大きい方が望ましいものであり、通報優先に比較して、消火活動優先もしくは救助活動

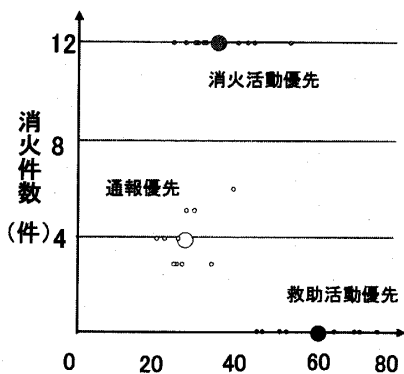


図3 消火件数と生存救助者数の関係

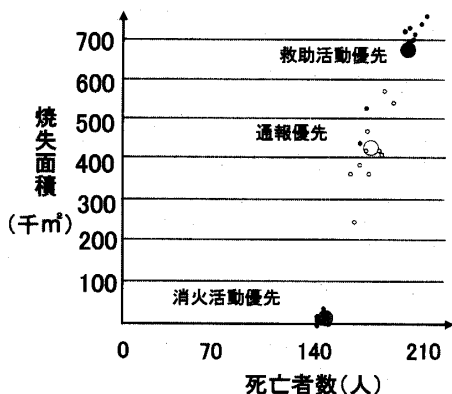


図4 焼失面積と死亡者数の関係

優先が望ましいことが分かる。

また、図4を見ると、図3の消火件数の多い順で焼失面積の値が小さくなっていることは当然の帰結である。「死亡者数」は「救助活動優先」>「通報優先」>「消火活動優先」となり、興味深い結果となっている。「救助活動優先」の場合は生存救助者が多いことは当然であるが、その一方で、火災が事実上の放任火災となり、その中に生埋め者が存在する場合、火災によって死亡する過程を優先していないことが、思いのほか大きな数字となっている。これは図4において如実に表れている。この図では、縦軸、横軸の指標ともに値が小さい方が望ましいものであり、消火活動優先>通報優先>救助活動優先の順で望ましくなっている。

「消火活動優先」の場合、12件全ての火災の消火に成功し、焼失面積も他の運用方針に比較して非常に小さい値である。死亡者数についても最も低い値であり、「消火活動優先」に基づいた運用方針は、地震による被害が甚大な場合には、消火、焼失面積の縮小、死亡者数の軽減に関して最も望ましい結果を得ることができる。一方で、生存救助者数については最も望ましい結果とはなっていない。様々な考え方があろうが、ここでは、より値の大きいことが望ましい生存救助者数と、より値の小さいことが望ましい死亡者数の差を“人命に関する活動効果”として新たに捉えなおす。

(ii) 様々な被害パターンと運用方針の関係

表5は、表3に示した6つの被害パターンについて、シミュレーション10回の平均値を示したものである。

出火と生き埋め者の被害がともに小さい場合(被害パターン1)、運用方針の違いにかかわらず同様の結果となっている。これは、この被害が現行の消防力に

表5 被害パターン別・運用方針別の各種指標平均値

被害パターン	運用方針	消火件数 (件)	焼失面積 (㎡)	生存救助者数 (A)	死亡者数 (B)	人命に関する活動効果 (A-B)
被害パターン1 (被害「低」「低」)	消火活動優先	2.9	11,181.1	6.7	1.1	5.6
	通報優先	2.9	11,181.1	6.7	1.1	5.6
	救助活動優先	2.9	11,181.1	6.7	1.1	5.6
被害パターン2 (被害「低」「中」)	消火活動優先	3.0	2,665.9	47.0	12.2	34.8
	通報優先	2.6	17,199.5	53.1	11.8	41.3
	救助活動優先	1.3	80,578.8	50.9	12.2	38.7
被害パターン3 (被害「中」「高」)	消火活動優先	6.0	1,306.9	54.1	143.9	▲ 89.8
	通報優先	3.4	79,703.8	47.1	148.9	▲ 101.8
	救助活動優先	0.1	261,079.0	72.6	165.1	▲ 92.5
被害パターン4 (被害「高」「低」)	消火活動優先	11.6	9,176.4	5.7	1.3	4.4
	通報優先	11.6	9,399.4	5.6	1.2	4.4
	救助活動優先	11.6	9,324.6	5.6	1.3	4.3
被害パターン5 (被害「高」「中」)	消火活動優先	12.0	4,242.1	42.2	13.3	28.9
	通報優先	9.5	54,239.7	42.2	12.6	29.6
	救助活動優先	3.2	383,785.8	42.6	14.0	28.6
被害パターン6 (被害「高」「高」)	消火活動優先	12.0	5,966.7	38.2	145.8	▲ 107.6
	通報優先	4.0	418,430.2	27.2	174.3	▲ 147.1
	救助活動優先	0.0	674,534.1	60.1	190.7	▲ 130.6

とって十分対応可能な余裕のある被害であるため、運用方針は異なっているが、実際の消防力運用状況は異なる状況には至らなかったためと考えられる。

被害の程度が大きくなるにつれて、それぞれの指標で効果的な運用方法に違いが生じているが、総じて、次のようにまとめることができる。

生理め者が少ない場合（被害パターン1, 4）には、いずれの運用方針に基づいて活動を実施しても結果に大きな違いは生じない。一方、生理め者が多い場合（被害パターン3, 6）には、先述の“人命に関する活動効果”の視点を導入すると、物的・人的被害ともに「消火活動優先」が最も効果的な運用方針であることが分かる。これに対して、生理め者被害が中程度の場合、出火の多寡に関わらず（被害パターン2, 5）、明瞭な傾向をつかむことが困難である。すなわち、「消火活動優先」では、火災に関する「消火件数」、「焼失面積」の2指標を相対的に効果的にすることができるが、人的被害は良好な結果となっておらず、また、「通報優先」は、人的被害に関して望ましい運用方針となっている。生理め者被害が中程度の場合でも、「救助活動優先」が“人命に関する活動効果”に最も望ましい結果とならないことは、生理め者被害が高い場合と同様であるためと考えられる。

4. 消防力の効果的な運用

4.1 シミュレーション実験の結論

現実の震災時には、地震直後に出火件数と生理め者数の全容を把握することは不可能であることから、消防機関は常に最悪の事態を想定しながら活動を実施する必要がある。

一方、本稿で示したシミュレーション実験においては、被害が甚大な場合には、「消火活動優先」が最も望ましい運用方針であり、また、被害が少ない場合においては、対応パターン別の結果に看過できないほどの大きな被害量の差が生じていないことを考慮すると、消防機関が取るべき対応方法は、「火災の消火を優先した活動」を前提として対応を実施することが「大きな間違いのない消防運用」であるといえるかもしれない。

4.2 更なる知見[2]

本稿では紙面の制約上、示すことができなかったが、様々な状況設定を行ってシミュレーション実験を繰り返すと、以下に例示するように、これまでの運用方針を再検討する必要があることが示唆されている。

- (i) 出火数がポンプ車台数以上の場合、一定時間待機してより多くの被害情報を把握した後、燃え広がる可能性の高い地域の火災から対応することが、延焼面積の抑制に効果的である。すなわち、一定時間待機することによる延焼拡大の損失よりも、待機中の状況把握の効果により、待機後に戦略的に消防力を運用できる効果が大きい。
- (ii) 住民等による通報ばかりでなく、消防機関が地震直後に情報収集を実施することにより、より早期に被害状況を把握することは、当然、早期対応による被害軽減になるが、視点を変えてみると、積極的な情報収集をすることは、上記(i)の“一定時間待機”と同等の効果があることから、戦略的な消防力運用によるより一層の効果を期待することができる。

5. おわりに

本稿で紹介した「消火・救出活動支援演算装置」は現段階も開発が進行しているものである。火災拡大の予測方法、消火活動効果・救助活動効果の評価方法、消防力の具体的運用方法の現実とのギャップなどに改善が必要な項目が存在していることも事実である。

シミュレーション実験によって得られた運用方針の方向性は、阪神・淡路大震災後にまとめられた報告書で望ましいとされている方法と大きな相違は見られないが、これまでの定性的、経験的提案を超えて、一定の定量的な検証の上での結論であるところに大きな意義があると考えられる。

今後、より一層のモデルの改善と様々なシミュレーション実験を行って、地震時における消防力の効果的な運用方法について見当を行う予定である。

参考文献

- [1] 火災予防審議会・東京消防庁、地震火災に関する地域の防災性能評価手法の開発と活用方策, 2001. 3
- [2] 藤井啓, 糸井川栄一, 地震火災時における消防機関の情報収集活動による戦略的な消防運用に関する研究, 地域安全学会論文集, 地域安全学会, No. 7, 2005. 11
- [3] 太田裕, 小山真紀, 和藤幸弘, 震後余命特性曲線の試算—1995年兵庫県南部地震の場合—, 東濃地震科学研究所報告 Seq. No. 7 地震防災分野, 2001. 3
- [4] 大阪市消防局, 阪神・淡路大震災大阪市消防活動記録, (財)大阪市消防振興協会, 1998

- [5] 自治省消防庁災害対策本部, 阪神・淡路大震災について (第105報), 2000
- [6] 東京都防災会議, 東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書, 東京都, 1997

- [7] 佐藤貴茂・熊谷良雄, 震災時における消防機関の効率的な活動に関する研究: 消火活動と救助活動を対象として, 日本火災学会論文集 Vol. 53, No. 1, 2003. 6