

## 要 旨

我が国は、その位置、地形、地質、気象などの自然的条件から、地震、台風、豪雨、火山噴火などによる災害が発生しやすい国土となっている。世界全体に占める日本の災害発生割合は、世界全体の0.25%の国土面積と比較して非常に高いものとなっている。しかし、国内における自然災害による死者・行方不明者数は、昭和20年代から30年代前半の多くの犠牲者を出していた時期に比べ、近年は比較的少ない数に抑えられてきた。これは、各種災害を契機にした法律やインフラの整備等が奏功した結果であると言える。一方で、昭和34年(1959年)の伊勢湾台風や平成7年(1995年)兵庫県南部地震などのように、ひとたび自然現象としての巨大なハザードが都市を襲った場合には大きな災害が発生するリスクを日本の都市は抱えている。

この理由の一つとして都市部への人口の集中が挙げられる。平成12年国勢調査の結果では、全国3,230市町村の約30%にあたる976市町村に1,359の人口集中地区が設定されており、その面積は、新潟県の面積にほぼ等しい12,457km<sup>2</sup>で、国土総面積(377,873km<sup>2</sup>)の3.3%である。この人口集中地区に我が国の総人口の約6割強が集中しており、人口集中地区における人口密度は1km<sup>2</sup>当たり6,647人に及んでいる。

このように、都市に集中して住むことによって得られる便利さや快適さなどと引き換えに、我々は集中することによって生じる都市災害リスクと対峙していかなければならない。

本研究では、都市災害の中でも特に地震災害に着目している。我が国は、海洋プレートと大陸プレートそれぞれ2つずつの境界に位置しているため、プレートの沈み込みにより発生するプレート境界型の巨大地震、プレート運動に起因する内陸域の地殻内地震などが頻繁に発生しており、年間平均3,094件(1994年から2003年までの10年間)の震度1以上を観測する地震が発生し、平成7年から15年までの9年間で負傷者が1名以上発生した地震は51回も発生している。そのため地震災害による人的・物的被害を軽減するための各種対策が喫緊の課題であると言える。

人的・物的被害を軽減するためには、都市インフラの耐震化や不燃化、住民の防災意識の向上、出火機構の解明による出火率の低減、公的機関の緊急対応能力の向上など、多種多様な取り組みが必要となってくるものであり、単一分野の専門家によって解決できる問題ではなく、各種専門家の減災に対する想いと英知の集結が必要となってくる。本研究もこのような中に位置づけられるものであり、緊急対応を行う公的機関としての消防機関が成すべき減災活動の一助を目指している。

大震災時に消防機関に与えられる最初の使命は、地震発生直後の火災被害を初期段階でどれだけ抑えられるかということであり、これは同時にその後の震災消防活動の鍵を握ることにもなる。しかし、常備消防は、平常時の災害に対応するための人員や装備の配置がなされており、発生に不確実性の伴う地震災害などに十分対応するだけの整備拡充は、物的・経済的にも不可能である。そのため、日頃から限られた資機材を最大限に活用し、被害軽減が行われるような戦略的な計画が立てられ、訓練などが行われている。

地震時における火災は、確率的事象ゆえに必ずその発生が予想されるが、発生場所までは特定することはできない。そのため、消防隊を戦略的に指揮運用し効率的な消火活動を

行う必要がある。しかし、人員や消防車輛は戦略的に配置・展開することが可能であるが、施設である消防水利は事前に配置されていなければならない、同時多発火災による物的・人的被害を軽減するための事前対策の一つとして、消火用水である消防水利の実用性のある確保が必要不可欠なのである。なお、消防水利には消防法（昭和 23 年、法律第 186 号）第 20 条第 2 項の規定に基づき市町村に消防の目的で設置・維持管理が義務づけられている消火栓や防火水槽、もしくは所有者・管理者の承諾を得て消防長または消防署長が消防水利として指定するプールや池などがあり、配置や数量等の整備基準は「消防水利の基準（昭和 39 年 12 月消防庁告示第 7 号）」によって勧告されている。

本研究では、このような消防水利に焦点をあて、“消防水利の充足性”と“消防水利への到達可能性”の二つの視点から既存配置されている消防水利に対する大震災時の消防活動からみた有効性のある評価手法を確立し、実市街地における計算実験をとおして評価手法の適用性の実証的検証を行っていくことを研究目的としている。なお、本研究で評価対象としている消防水利とは、上水道施設に依存しない防火水槽やプール等のことであり、消火栓は含まない。

第 1 章では、本研究における背景として地震災害の発生し易い我が国の特性を地理的背景および過去の災害事例より簡潔にまとめた。また、阪神・淡路大震災の被害実態から、延焼火災の拡大要因となった市街地状況や消防活動をまとめ、消防水利に関連する問題点の抽出を行った。とくに、阪神・淡路大震災においては、地震動による水道施設被害によって多くの消火栓が使用不能となり、市街地大火の促進要因になったことが指摘されている。以上のような背景を踏まえ、大震災時に延焼火災を防ぐ方策の一つとしてリスク工学的アプローチによって消防水利のあり方を検討する必要性があることを提案した。

第 2 章では、消防水利に関する基礎的事項について調査を行い、その現況から課題を見出した。法的根拠をはじめ、時代の経過に伴う消防水利設置数の推移と消防水利行政の制度を中心とした整理を行い、全国の都道府県における消防水利の実態調査からは、消防水利配置傾向と建物火災被害との関係の分析を行った。その結果、都道府県の消防水利の整備実態と火災被害から、国内における火災被害の大小は消火栓の設置数に大きく依存しており、震災時に上水道システム等に依存する消火栓が使えなくなった場合に、阪神・淡路大震災で発生したような同時多発火災による延焼拡大の危険性を全国の自治体が持っていることが確認された。

人口の集中している政令指定都市を対象とした分析においても、全国的な傾向と同様に消防水利の消火栓依存率が高いことが確認された。さらに、全体的には全国平均を上回っているものの、札幌市、仙台市、川崎市および福岡市については、水利評価面積（本研究で設定した評価単位：可住地面積 - 田・畑面積）1 km<sup>2</sup>あたりの防火水槽設置数は全国平均を下回っていることも明らかとなった。

しかし、全国的に消火栓への依存傾向があるものの、水利評価面積あたりの防火水槽設置数の多い都道府県もあり、また同時にその格差もある。これらを見る限りでは、消火栓以外の消防水利で震災時の同時多発火災による延焼火災をどこまで阻止することができるのか判断することはできず、消防水利に対する総合的な評価手法を確立した上で震災時における消防水利対策の議論を進めていく必要があることが指摘できる。

また、全国 50 の消防局を対象に消防水利整備の進め方や現状での問題点に関するアンケートを実施するとともに、震災時を想定した消防水利対策の先進的な取り組みについて

事例を取り上げその解説を行った。消防水利対策は「用地確保」と「財政困難」という問題と直面していかなければならないことが改めて浮き彫りにされ、今後は消防水利の規格や設置基準を始め、柔軟な打開策も視野に入れた検討を行っていく必要があると言える。

第3章では、既存配置されている一定範囲内における消防水利の合計水量が、一定範囲内で発生する火災の消火活動に対して充足しているかを判断する指標の提案を行った。この指標が表すことが可能な範囲は一辺 250m の正方形区画（250m メッシュ）であり、予想される消火必要水量を 250m メッシュ内の既存水量で除することで、メッシュごとの充足率算出を行い、ケーススタディ地区として取り上げた東京都墨田区内において、充足率に基づく3分類表示を行った。

さらに、消防力の運用を行い火災に対する消火活動効果を計測することの行えるシミュレータの開発を行った。このシミュレータを活用した計算実験による充足率の検証では、概ねその妥当性が検証され、都市防災性能向上の視点から見ても、消防署管轄内におけるメッシュ間の充足性を比較検討するには有効な手法であることが確認できた。しかし、評価領域を一辺 250m の正方形区画としていることから、管内境界に河川等がありメッシュの大部分に河川敷等が含まれる場合などには、部分的に市街地があるにもかかわらず充足率の算定が行えず、他メッシュとの比較評価を行えないという問題点もある。

充足率に関する今後の課題として、メッシュ範囲の縮小などを行い、評価対象範囲の空白域を少なくする手法を考えていかなければならないことが言える。

第4章では、消防ポンプ自動車による消防水利への到達可能性評価手法を確立していく上での道路閉塞に関する基礎的資料を得るため、地震時の建物倒壊による道路閉塞実態の分析を行った。震災時においても消防ポンプ自動車による通行が可能である広幅員道路から消防水利までの到達可能性を考えた場合、建物倒壊等による道路閉塞の発生状況の解明が重要となってくる。これまで多くの研究者が各方面から震災時の道路閉塞に関する調査報告を行っているが、本研究においては、比較的入手しやすいデータを用いた簡便な道路閉塞推定手法の構築を目指した。そのための基礎資料作りに重点をおき、阪神・淡路大震災時における神戸市東灘区の航空写真判読から道路閉塞状況の読み取りを行い、道路閉塞の要因を道路側への建物倒壊のみとしたうえで、道路リンクごとに消防ポンプ自動車の通行可否の判定を行った。判定作業の結果を用いて道路閉塞の発生する要因分析を行い、道路幅員、建物全壊棟数密度（全壊棟数/ha）、建ぺい率から道路閉塞確率を求める道路閉塞確率換算テーブルの導出を行った。

道路閉塞状況については、 $3.5m \leq W$ （ $W$ ：道路幅員）の道路で約 20%、 $3.5m < W < 6m$  の道路で 14%の閉塞が確認され、逆に道路幅員が 12m を超える道路リンクは閉塞していないことが確認された（ $3.5m \leq W$  の道路については、消防ポンプ自動車の走行自体が困難であることから、道路側への建物倒壊が確認された道路を閉塞道路とし、参考までに掲載している）。建物全壊棟数密度が高くなると道路閉塞割合も高くなるが、道路が包含される町丁目の建物全壊棟数密度が7割を超えても、道路閉塞割合は約 25%と予想外に低くなっていた。これは、倒壊した建物全てが、必ずしも道路側へ倒れ道路閉塞を引き起こしている要因となっていないものであると推察される。

第5章では、個々の消防水利への到達可能性評価を、震災時においても消防ポンプ自動車の走行が保証される幅員 12mより広幅員の道路と接続する道路から消防水利までの経路を比較することによって行った。広幅員道路上のノードの抽出範囲は、原則として消防

水利から半径 210m の範囲内にあるものとした。これは消防ホース 15 本分でカバーできる範囲であり、消防水利の効果を及ぼせる範囲と同一となるようにし、消防水利の効果が及ぶ範囲を水利圏域と定義した。

また、広幅員道路上のノードから消防水利までのルートごとの到達可能確率を計算するにあたり、計算プログラムの作成を行った。計算結果を用いた消防水利の到達可能性の評価を行う場合、様々な視点からの到達可能性の見方があり、消防水利の持つ完全な到達可能確率を導くことは難しい。設定条件によってそれぞれの利点と欠点があり、前提条件をもとに算出を行えたとしても、その指標を使った序列により優劣を判断することには課題があった。そこで、「全ての到達可能ルートの中から消防水利までの最も高い到達可能確率」、「一つのノード(広幅員道路上)を起点としたルートごとの最大到達可能確率の平均」、「ルートごとの最大到達可能確率を用いた一カ所でも到達可能な確率」、「全てのルートの全ての到達可能確率」の 4 つの到達可能確率の算定を行い、それぞれの利点と欠点を検討し、最も到達可能性を表現することのできる指標の検討を行った。

結果としては、水利圏域内全体の到達性を平均的に表現することができる「一つのノード(広幅員道路)を起点としたルートごとの最大到達可能確率の平均」を本研究における到達可能性を表す指標とした。状況や情報によって消防水利へのアクセス経路の始点が異なることは想定できるが、アクセス経路の始点が決定されれば、地元地理に精通している消防隊は、そこからの最も通行しやすい道路リンクの選定を行えるということが、消防活動現場の実態を考え適切であるという判断を行った。これらの結果を踏まえ、地域特性の異なる二つの消防署管内の消火栓以外の消防水利に対する到達可能性の計算を行い、地域特性の違いによる到達可能状況の比較検討を行った。

第 6 章では、GIS を活用し、第 3 章と第 5 章から得られた消防水利評価の指標を用いて、様々な角度から実証的な分析を行った。空間解析によって、単一の指標では読み取ることのできない他指標との関係を視覚的に明らかにすることで、消防水利を利用する消防側の視点から具体的な重点対策地域の抽出を行った。

消防水利を中心とした半径 210m に設定した水利圏域を用い、「ルートごとの最大到達可能確率の平均」を圏域全体の密度値とした重複状況による分析では、単に消防水利の配置個数という観点だけではなく、各地点における到達可能性を考慮した消防水利からのカバー状況を視覚的に表現することが可能となり、到達性を考慮した消防水利の脆弱性を表現することが可能となった。これは、これまでにない視点による消防水利の実証的な評価手法である。

また、相関関係があまり高くはない「充足率」、「平均到達確率」、「延焼危険度」の 3 指標を活用し、それぞれの危険側評価値を基準として「危険評価メッシュ」の抽出を行い、安全側評価値を基準とした「安全評価メッシュ」の抽出を行った。「危険評価メッシュ」の抽出基準によって、震災時の消防活動を考慮した消防水利対策を行う上での優先順位付けが可能となった。

第 7 章では、開発した消防水利評価手法の検証と適応性を評価するために消防力運用シミュレータを用いた実市街地での計算実験を行った。第 7 章で使用したシミュレータは、これまでの継続的に開発を続けてきた延焼シミュレーションに消防活動効果を組み込んだ消防力運用システムに改良を加え、震災時の消火活動モデルを細緻化させたものである(以後「FIMaS2004」という)。第 4 章において算定した道路閉塞確率換算表を活用し、震災時

における道路閉塞を加味した場合における消火活動計算実験をとおして、120 分間の震災消防活動による火災被害領域内の建物建築面積を消火活動効果の指標として捉え、消防水利の実用性を評価するとともに、耐震補強等を行った場合の政策的対策の評価を行った。

消防力運用シミュレータの改良においては、特に消火活動効果の延焼被害軽減への反映に重点を置き、「延焼建物包囲・筒先投入モデル」をはじめ、過去 10 年間の延焼火災データの分析から「火面長に対する筒先担当範囲算定モデル」等の構築を行った。建物を対象として消火活動効果を評価する方法はこれまでの調査研究では見られないものである。

また、消防力運用シミュレータの目的・機能、計算内容の妥当性について、消防職員に対するヒアリングや同装置のデモンストレーションを重ね、現実の消防活動の考え方が相当程度反映された装置となった。さらに、市街地延焼拡大モデルを、建物を単位としたモデルとして作成することにあわせて、これに対する消火活動に建物概念を導入した点は、これまでの研究にはない斬新な視点である。従来の筒先による火面包囲というマクロな消火効果評価に代えて、建物構造と立地条件に基づき、優先的に筒先を配置するという考え方は、消火活動評価の新たな展開のきっかけとなった。

震災時を想定した消防機関による消火活動を考慮した上での、火災被害面積を判断基準とする消防水利の実証的評価では、「危険評価」として抽出された地域においては、震災時には道路閉塞による消防ポンプ自動車の到着遅延から延焼被害が拡大する傾向があることが定量的に明らかとなった。これによって、これまでの消防水利の評価手法の妥当性が証明された。

さらに、消防水利への到達可能性向上策検討のために実施した政策実験では、地域内の建物耐震補強等を行って地域全体の通行可能確率を向上させたとしても、消防水利到達性の面からは費用対効果において現実的ではないことが明らかとなった。また、地区内に消防水利を増加させるといった対策を行っても同様の結果であった。

しかし、木造建ぺい率や木造建物棟数といった延焼促進要因の多い市街地において、火災制圧が行えなかった事例を分析すると道路閉塞に起因する迂回により到着の遅延に大きな原因があることもわかり、全体的な対策として効果は見られないものの、ミクロな視点から捉えていくと消防水利への到達可能性を高めていくことの重要性が確認できた。

一方で、本計算実験をとおして新たな課題も浮き彫りになった。それは、震災時火災に対する制圧火災割合(制圧回数/試行回数)の低さである。計算実験の前提条件としては、同一町丁目内において 500 回の試行を行い、その都度出火建物 1 棟と道路閉塞の発生をランダムに設定し消防ポンプ自動車を 2 隊出場させ消火活動を行った。ここでいう制圧とは、1 回の試行ごとに出火した火災を消防隊によって消火することが可能であったものをいう。

建物倒壊危険度や延焼危険度によって脆弱性の指摘される市街地においては、制圧火災割合が 19%から 20%程度という愕然とする低さであった。これは、市街地そのものが持つ延焼危険性に大きく依存していること、加えて震災時には限られた台数の消防ポンプ自動車によってのみ消火活動が行われることが大きな原因であると思料される。「危険評価」として抽出されるような地域における制圧火災割合を向上させていくための総合的な対策を講じて行く必要がある。

消防水利に対する改善策を講じるだけでは改善率に限界があることは本計算実験で明らかとなった。市街地難燃化の促進や出火率の低減を始め、制圧火災割合を向上させるための出火情報の早期取得を始めとして、「危険評価」として抽出されるような地域に早期に

消防力を集結できるような消防戦術の再検討が喫緊の課題と言えよう。

以上のことから、本研究の主な成果をまとめると次のようになる。

都道府県および政令指定都市における消防水利の現状と問題点の把握  
消防水利の充足率評価手法の提案  
消防水利の到達可能性からみた評価手法の提案  
GISを活用した、消防水利活用視点からみた空間解析  
大大特プロジェクトにおけるシミュレータ開発  
(消防運用部分：放水モデルの提案・火面周長算定モデルの算出)  
延焼面積を尺度とした建物耐震改修効果等の費用対効果による定量的評価の実施

本研究では、震災時の市街地内における上水道システム等に依存しない消防水利の実証的評価を行ってきた。震災という不確実性要素を多く抱えるものと対峙し、その完全なる抜本策を見出してゼロリスクにすることは不可能である。消防水利に対する対策も同様である。しかし、我々は不確実要素の解明を進め、限られた資源を有効活用して被害軽減のための都市リスク管理を行っていかなければならない。その一助を担う目的で、これまで確立されていなかった既存の消防水利に対する必要消火水量と到達可能性を考慮した評価手法の提案を行ってきたが、残された課題は多い。

充足率の評価手法では、250m メッシュという特定の領域を用いての分析のために、管内境界に河川等がありメッシュの大部分に河川敷等が含まれる場合などには、部分的に市街地があるにもかかわらず充足率の算定が行えず、他メッシュとの比較評価を行えないという問題点があった。この点については、メッシュ範囲の縮小などを行い評価対象範囲の空白域を少なくする手法を構築していかなければならない。

道路閉塞算定に関しては、その目的の一つに簡便な道路閉塞換算式の構築があったことから、マクロな道路閉塞換算となっている。様々な分野で活用していくためにはその精度向上は必須条件であり、精緻化させたモデルの構築が必要である。その解決策の一つとして、本研究での道路閉塞要因は建物倒壊によるもののみから推定していることから、今後はブロック塀、電柱、液状化や駐車車両等々の他の要因も加味したモデルの構築が必要である。

消防力運用システムについては、震災時の消防活動という不明確な活動を対象に経験的なモデル構築を行った部分がある。今後は、経験的な運用モデルに対して数値解析等の結果による検証を行い、信頼性を高めていく必要がある。

細部における課題は残されていると言えるが、最も大切なことは、本研究における成果をどのようにして実社会に適應させていくかということである。また、過去の地震被害を見ても明らかのように、時代の経過とともに被害形態は変化をしてくれている。生活形態や都市構造といった時代の変化にどう対処していくかということを念頭に事前の対策を検討しておくことも重要である。