

震災時の部隊応援に寄与する救助活動の時空間変化の分析手法

Analysis Method of Spatiotemporal Change in Rescue Activities That Contribute to Response Teams Management After an Earthquake

喜納 啓¹, 稲垣 景子², 佐土原 聡², 矢代 晴実³

Satoshi KINA¹, Keiko INAGAKI², Satoru SADOHARA² and Harumi YASHIRO³

¹横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府

Graduate of Urban Innovation, Yokohama National University

²横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院

Institute of Urban Innovation, Yokohama National University

³防衛大学校 建設環境工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, National Defense Academy

In the case of a large-scale disaster, it is necessary to plan an appropriate rescue operation strategy according to the extent of damage in the disaster area, while the damage information is complicated. In this research, we proposed a method to the rescue activities by firefighters for the people trapped under collapsed buildings by the earthquake in order to contribute to the drafting of support plan in the rescue activities after the earthquake. As a result of the analysis, from a spatiotemporal perspective, the area where the public supporters are lacking became clear, and it was possible to select the emergency traffic route in the time zone important for lifesaving immediately after the earthquake.

Keywords: Tokyo inland earthquake, people trapped under collapsed buildings, rescue activities, receiving support plan

1. はじめに

(1) 研究背景

阪神淡路大震災では、甚大な人的被害に対して被災地域の救助隊のみでは対応が困難であり、被災地域外から多数の救助隊が応援に向かう「広域応援」が実施され、人命救助に貢献した。ただし、大規模部隊の迅速な出動体制の整備、被災地でのロジスティクスの確保などの課題が明らかとなった¹。また、熊本地震における熊本市消防局の対応検証では「受援側と応援側の連携」が課題として挙げられており、応援部隊の進出拠点²に職員を配置できず、早い段階での部隊誘導や情報提供を行えなかったことなどが受援体制の課題として提起された²。

今後、発生が懸念される首都直下地震においても、甚大な人的被害に対して、被災地域内の救助隊の活動能力が不足することが懸念されており、応援部隊を適切に運用する体制の構築が重要である。現在、広域応援に関する体制の整備は進み、中央防災会議の首都直下地震における計画³では、約250箇所の救助活動拠点、約70箇所の航空機用救助活動拠点を予め明確にするなど応援部隊を迅速に派遣するための対策が検討されている。また計画では、被災地域内の救助隊を考慮した上で、被害想定死者数および自力脱出困難者数に応じて、応援部隊の派遣先・規模を検討すると記載している²。しかしながら、被災地域における人的被害量や消防力などを踏まえて、応援・受援体制をどのように構築すれば良いのかについては、時間的・空間的視点から十分に議論されていない。

(2) 先行研究と本研究の目的

広域応援に関する調査・研究として、三船ら⁴は、阪神淡路大震災時の神戸市の公園を対象に、自衛隊・警察・消防の利用実態を調査し、組織別に応急的公園利用の考え方を整理している。島田ら⁵は、既往研究および地域防災計画を基に、都市公園の防災的役割を整理しており、消防・警察・自衛隊などの応援部隊の活動拠点の規模について考察した。小玉ら⁶は、長野県における広域防災拠点計画の策定にあたり、進出拠点・救助活動拠点などの広域防災拠点³に必要な機能・規模を整理している。また山口ら⁷は、全国47都道府県の県庁などを対象として、震災直後の防災拠点の道路接続の優先度評価に関するアンケート調査を実施した⁴。調査結果より、消防・警察・自衛隊などは、道路接続の優先度評価が高く、且つ24時間以内に道路接続を確保する必要があると考える回答が80%以上であったことから、応援が必要になる消防署などを、震災後速やかに選定することは、道路啓開に関する戦略立案にも重要であると考えられる。

次に、震災時の救助活動に関する既往研究として、村上ら⁸は、住民により層崩壊している倒壊建物から自力脱出困難者を救助することは困難であるとし、消防隊員による救助活動のシミュレーションを実施することで、救助活動が難航する区域を明らかにした。ただし、救助活動に影響を与える交通障害などは考慮されていない。沖ら⁹は、地域住民による救助活動と広域避難行動を統合したシミュレーションを実施し、大規模地震時の物的被害（建物倒壊・火災延焼・道路閉塞）や広域避難行動

の影響を考慮した上で、地域住民による救助活動の有効性を示した。この研究は実市街地を対象に、大地震時の物的被害が救助活動に与える影響を精緻に再現しており、地域住民による救助活動のあり方を検討するのに有効であるが、市区町村など広域地域への適用はデータ構築が容易ではないと考えられる。また、中村ら¹⁰⁾は、リスクコミュニケーションを促進するため、地震災害における自治体間の災害対応力を評価する手法を提案した。住宅・土地調査統計、国勢調査など汎用性の高いデータを用いており、他の自治体でも容易に適用できると考えられるが、時間的・空間的な視点からの評価は行われていない。

図1は、熊本地震における警察の全救助活動¹¹⁾（111現場：生存128人、心肺停止32人）について示す。層崩壊を伴わない建物からの救助活動（52現場：生存77人、心肺停止0人）は、数分から数十分で終了しており、救助活動に特別な資機材や技術を使用しなかったと報告されている。一方で、層崩壊を伴う倒壊建物からの救助活動（48現場：生存48人、心肺停止22人）に関しては、技術面・安全面から地域住民による救助活動は難しいことから、救助技術を有する機関が担当することが望ましいことが示唆された。

以上、広域応援に関する既往研究では、救助活動拠点の考慮すべき事項・必要な機能を整理し、拠点施設の整備に貢献した。しかし、地震発生から時間経過とともに変化する被災地域内の救助活動状況を踏まえた部隊応援に関して検討している例は見当たらない。また、震災時の救助活動に関する既往研究では、自力脱出困難者に対する住民の救助活動を分析することで、人命救助における共助の効果を定量的に評価し、地域住民自身の救助活動の有効性を示した。ただし、層崩壊を伴う倒壊建物からの救助活動は消防などの救助技術を有する機関が担当することが望ましい。そして、震災時の応援・受援体制を具体的に検討するためには、地震による交通障害など救助活動の阻害要因を考慮した上で、時間的・空間的な観点から、消防などの「公助」の担い手が不足する地域を明らかにする手法が求められる。

よって本研究では、地震災害において層崩壊を伴う倒壊建物からの救助活動が必要とされる地域を対象に、建物現況、道路状況、消防署・出張所の立地、消防隊員数などの地域特性を踏まえて、時間的・空間的な視点から、震災後の被災地域における救助活動状況を分析する手法を提案する。提案手法は、自治体が保有する地震被害想定から、時間経過とともに変化する救助活動のシナリオを作成することで、地震被害の全体像や脆弱性・課題を明らかにし、震災時の部隊応援に関する地震防災戦略や地域防災計画の修正を行う際の基礎資料としての活用が期待できる。特に、応援部隊の誘導調整、消防署同士の連携、緊急交通路の道路啓開・交通規制の優先ルート選定に寄与することが期待される。

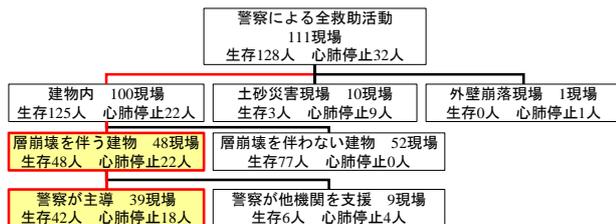


図1 熊本地震における警察の救助活動の分類¹¹⁾

2. 救助活動の時空間変化の分析手法の提案

(1) 分析手法の概要

本研究では、揺れにより倒壊した木造・非木造建物から発生する自力脱出困難者を対象に、消防隊員の救助活動を分析することで「公助」の担い手が不足する地域を明らかにする。

図2は、救助活動の分析手法の概要を示す。また、表1は、使用したGISソフトおよび地理空間データを示す。

提案手法は、他の自治体にも容易に適用できるように、多くの自治体が既に保有している地震被害想定、建物現況データ、政府統計データなどを活用することで、被災地域内の救助活動の時空間変化を分析できることを目指した。また本研究は、自治体が既に保有する地震被害想定などの情報を基に、管轄部隊のみでは対応が難しく応援を必要とする可能性が高い地域を時間的・空間的視点から分析する目的から、提案手法に想定地震のデータを入力しているが、具体的な地震を想定せず、一律の揺れを想定することで、道路ネットワークと脆弱な建物の分布、救助隊の初期分布に基づいて「地震災害時の救助活動」の困難度を相対的に評価することも可能である。

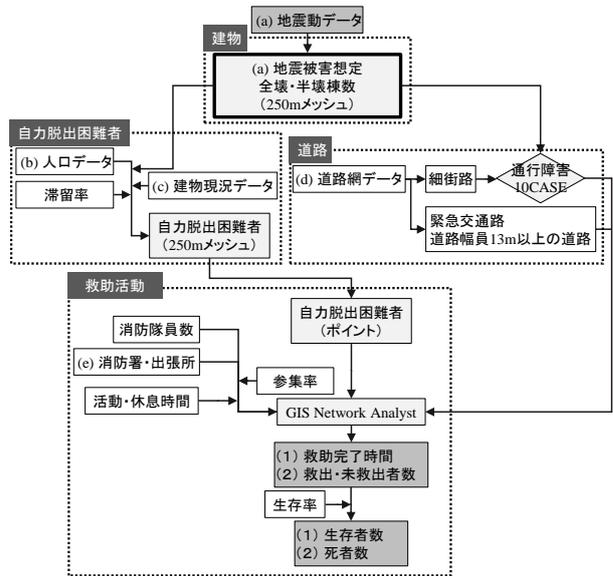


図2 救助活動の時空間変化の分析手法の概要

表1 使用したGISソフト・地理空間データ

項目	詳細
基本ソフト	ArcGIS 10.4.1 for Desktop
拡張ソフト	ArcGIS Network Analyst, Special Analyst
(a) 地震被害想定	神奈川県地震被害想定調査（平成27年）
(b) 人口データ	e-stat 統計GIS 平成27年国勢調査データ
(c) 建物現況データ	横浜市都市計画基礎調査データ（平成25年）
(d) 道路網データ	ArcGIS Geo Suite 道路網 2018
(e) 消防署・出張所	国土数値情報 消防署データ

(2) 自力脱出困難者の算定手順

自力脱出困難者数の算定手順について示す。はじめに、平成25年度都市計画基礎調査データ（建物現況）の住宅系建物の延床面積と平成27年国勢調査（人口）データを用いて、1人当たりの延床面積を計算した後、250mメッシュ単位で木造・非木造建物別に集計した延床面積と建物棟数に基づき、建物1棟・1階当たりの人口を算出した。そして、都心南部直下地震の被害想定¹²⁾における揺れによる全壊棟数を、神奈川県自力脱出困難者の算定式⁵⁾に適用して、揺れによる倒壊建物に伴う自力脱出困難者数を算定した。なお、神奈川県の手法は、木造建物の場合は計測震度に応じた崩壊率、非木造建物の場合は震度・建築年に応じた倒壊率を、全壊棟数に乗じて「崩壊（倒壊）棟数」に変換した上で、木造建物の場合は1棟あたりの屋内滞留人口、非木造建物の場合は1階当たりの滞在人数を乗じて自力脱出困難者数を算定している。また、本研究では、地震発生時刻を多くの住民が自宅に在宅している時間帯である朝5時として、多数の自力脱出困難者が発生する場合を想定した。朝5時に地震が発生した場合、自宅等での「家具転倒による自力脱出困難者」も発生することが予想されるが、本研究では、技術面・安全面から地域住民による救助活動が難しい「倒壊建物からの自力脱出困難者」のみを救助活動の分析対象とし、消防などによる「公助」の担い手が不足する地域を明らかにする。

(3) 救助部隊の移動に関する条件設定

提案手法では、消防隊員が、各消防署・出張所から、自力脱出困難者の救助現場まで向かう移動をポンプ車や救助車等の車両によるものとし、被災状況に応じた移動速度の低下を想定することで、地震発生後における救助活動のモデルを構築した。

図3は、地震発生後における緊急車両の移動速度の推定フローを示す。

倒壊建物による道路閉塞が緊急車両の移動に与える影響評価に関して、提案手法では、既往研究¹³⁾を参考に、多くの自治体が保有している250mメッシュ別道路リンク閉塞率（閉塞によって残存車道幅員が3m以下になったリンクの割合）を活用することで、メッシュ別の通行障害が生じる確率を求めた。その後、GIS上でPythonを用いて0から1の一様乱数を発生させ、通行障害が生じる確率より小さい場合はそのメッシュ内の細街路のみ道路閉塞の影響により通行障害が発生する⁶⁾とし、大きい場合には通行障害が発生しないと仮定した。なお、提案手法では、倒壊建物による閉塞の影響を受ける道路を細街路のみに限定した。これは近年、緊急交通路沿いの建物の耐震化が促進されている状況および道路幅員が13m以上の道路は倒壊建物による閉塞の影響を受けることが少ないと考えられるためである。

解析は、ArcGIS (10.4.1) のNetwork Analystのツールを応用し、消防署・出張所から全ての救助現場間の移動を巡回セールスマン問題として解くことで、救助部隊の経路を選択して移動時間を算出した。シミュレーションでは、救助部隊が、救助活動中でも付近の住民から救助要請を受け、救助活動終了後すぐ次の現場に移動する状況を想定し、救助部隊の移動経路・担当する救助現場を下記の手順で選択した。はじめに、道路ネットワークに沿った全ての救助現場と消防署・出張所間の最短経路のOD (Origin - Destination) コストマトリックスを作成する。

次に、この結果を基に、救助部隊の最適ルートに救助現場を1つずつ挿入して初期ルートを作成する。そして、タブー検索メタヒューリスティクスに基づき、救助部隊の移動経路ごとに救助現場の到着順序の再設定や、別の救助部隊の移動経路に救助現場を移動・交換することで、初期ルートを改善し、救助部隊の移動経路・担当する救助現場を決定する。その際、地震発生から救助部隊が各現場に到着するまでに要する時間が最小限になるように解析し、横浜市防災計画¹⁴⁾に記載されている震災直後の救助活動の方針（被害情報が錯綜する震災直後は消防署周辺から救助活動を開始）に沿うよう、消防署・出張所から時間距離が短い救助現場が優先されるように設定した。

提案手法では、細街路における通行障害の状況を、完全情報として救助部隊の現場までの移動経路を設定していることから、救助部隊の迂回などの行動は考慮できていない。ただし、移動速度のパラメータを選択する際、既往研究¹³⁾において、自力脱出困難者1人当たりにより要する救助現場までの移動時間の平均値が、熊本地震における覚知から現場到着までの平均時間と同程度になったパラメータを採用することで、救助現場の覚知から救助部隊の出動までに要する時間および捜索時間は、シミュレーションの移動時間に含まれていると仮定した。また、救助現場の発見・通報に要する時間については、阪神淡路大震災の教訓¹⁵⁾より、救助活動中でも付近の住民から救助要請を受け、救助活動終了後すぐ次の現場に移動する状況を想定した。

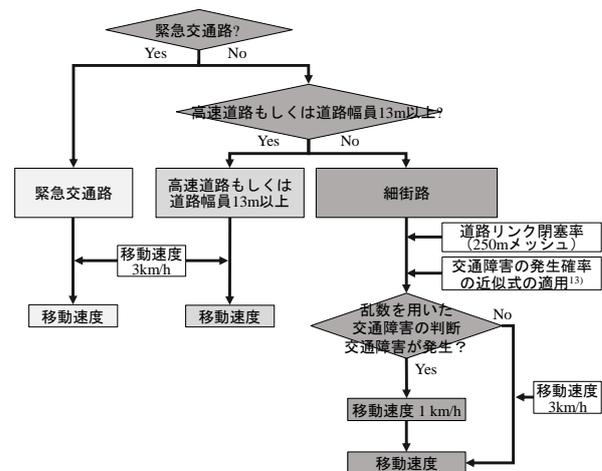


図3 緊急車両の移動速度の推定フロー

(4) 救助活動に関する条件設定

熊本地震による倒壊建物からの救助活動を分析した警察資料¹¹⁾および阪神淡路大震災の教訓資料¹⁵⁾より、倒壊した木造建物から発生する自力脱出困難者1人を救出するために必要な救助時間を96分、倒壊した非木造建物からの救助時間を木造の2倍（192分）に設定した。また、救助活動に従事した熊本県警察等による救助現場に関するアンケート調査では、活動人数が1現場あたり5人以下の場合、明らかに不足を感じていた結果を踏まえ、6人編成の救助部隊を運用するとした。そして、消防隊員の1日あたりの活動時間は、心身の疲労に伴う二次災害を防止する観点から、移動時間を含む救助活動を16時間、休息を8時間と設定した。

各消防署の隊員数は、横浜市消防年報¹⁶⁾を参考に、各

出張所に12人ずつ、消防署に残りの隊員を配置した。また、消防署の隊員の勤務体制を2部制とし、朝5時に地震が発生した時点で出勤していない消防隊員の参集率は、東京消防庁の消防署勤務職員の東北地方太平洋沖地震時の時間別平均参集率¹⁷⁾を参考に、地震発生から5時間後で50%、10時間で75%、24時間で100%と設定した。参集後、救助部隊は直ちに救助活動を行うとした。

図4は、消防による救助活動のフローについて示す。本研究では「自力脱出困難者が被災してから救助されるまでの時間」を、鉄田ら¹⁸⁾が、阪神淡路大震災の神戸市東灘区の救助活動記録を基に作成した地震発生からの経過時間と生存率の関係式⁷⁾に適用することで、救出された自力脱出困難者の生死を判定した。また、本研究では地震火災を考慮しておらず、消防署の全隊員が自力脱出困難者の救助活動に従事する状況を想定している。今後、提案手法に消火活動を組み込むことの必要性は論を待たないが、「消火活動に要する時間と必要な隊員数」が明らかとなれば、分析結果を編集し、消火活動を考慮した「救助完了時間」と「生存者数」を算定することは難しくないと考える。

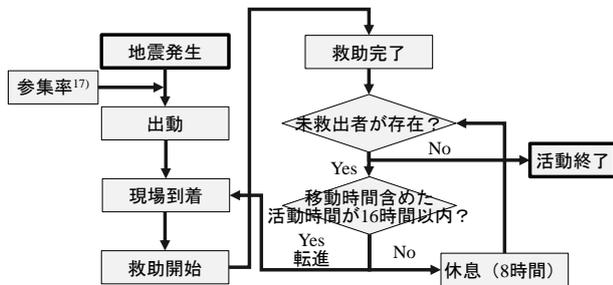


図4 消防による救助活動フロー

(5) 提案手法による解析結果について

図5は、提案手法による解析結果の出力画面について示す。本研究では、細街路における倒壊建物による道路閉塞に関して、10通りのケースを設定し、横浜市の18の行政区別に、被災地域内の救助活動を分析した。

解析結果を分析することで、自力脱出困難者の救助開始時間および救助完了時間、救助部隊の移動経路・移動時間・救助した自力脱出困難者数、管轄区域内の自力脱出困難者全員の救助完了時間が明らかとなり、時間的・空間的な視点から、震災後の被災地域における救助活動状況を分析することができる。なお、3章以降の分析では、自力脱出困難者数の救助完了時間は、10回のシミュレーションの平均値を用いることで評価する。

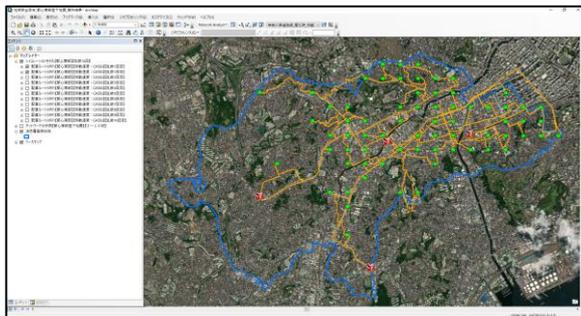


図5 提案手法による解析結果（南区）

3. ケーススタディにおける手法の有用性の検討

(1) 対象地域の特性

本研究では、神奈川県横浜市を対象地域として、震災後の被災地域における応援・受援体制を検討するにあたり、提案手法を活用することで、その有用性について検討する。

横浜市は、神奈川県の東部に位置し、面積は約 435km²であり、神奈川県の面積の約 18%を占めている。また、河川や海岸沿いの低地は沖積層であるため、地震時には地震動の増幅や、液状化現象が懸念される。平成 27 年国勢調査によると、総人口は約 372 万人であり、市としては全国 1 位の人口である。建物現況に関して、旧耐震の建物は約 27 万棟（約 41%）、新耐震の建物は約 39 万棟（約 59%）存在する。特に、旧耐震の木造建物棟数が多い地域として戸塚・港北・旭・鶴見区などが挙げられる。

さらに、道路状況に関して、平成 29 年 4 月 1 日現在、横浜市が管理する道路延長は 7618.9km であり、そのうち道路幅員 5.5m 未満の道路は約 48.6%と高く、救命・救助活動の妨げとなっている。また、主要道路の平日の混雑度（= 交通量 / 交通容量）は、全国平均の 0.64（平成 27 年度全国道路・街路交通情勢調査より算出）に対し、横浜市は 0.99 であり、東京 23 区や川崎市など全国の大都市の中で最も高い値を示している。平常時でも各箇所でも交通渋滞が生じている状況を踏まえると、災害時には一層の渋滞が予想され、緊急車両の救助現場までの移動に支障をきたす可能性が高い地域といえる。

(2) 想定地震

本研究では、神奈川県の地震被害想定において、地震発生時の切迫性が高く、広域応援などのシナリオ作成の対象である都心南部直下地震をケーススタディとして、提案手法を適用した。図 6 は、神奈川県地震被害想定¹²⁾における都心南部直下地震の震度分布を示す。

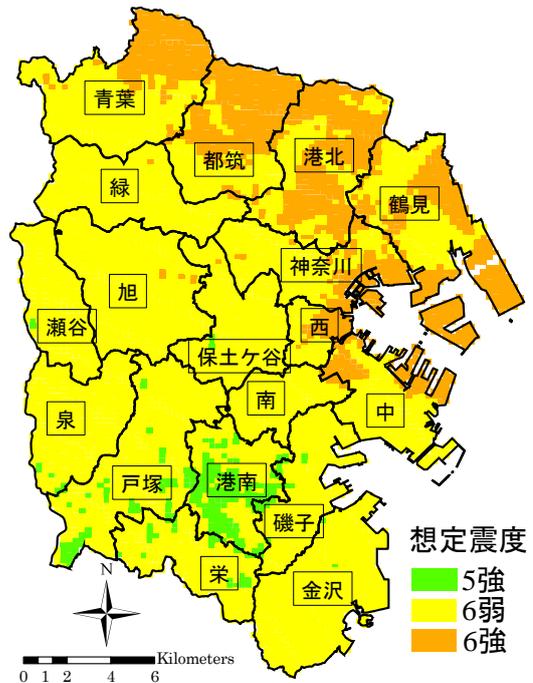


図6 都心南部直下地震の震度分布¹²⁾

(3) 自力脱出困難者数の算定結果

本研究では、救助技術を有する機関による救助活動が望ましい倒壊した木造・非木造建物から発生する自力脱出困難者を対象に、提案手法を用いて被災地域内の消防による救助活動の時空間変化を分析することで、公助の担い手が不足する地域を明らかにする。

図7は、自力脱出困難者数の算定結果を示す。神奈川県の手法は、木造建物には計測震度に応じた崩壊率、非木造建物には震度・建築年に応じた倒壊率を乗じた推定式を用いており、旧耐震の木造建物棟数が多く強い揺れが想定される地域は、自力脱出困難者が多数発生する。よって、旧耐震の木造建物棟数が多く且つ震度6弱～6強の強い揺れが想定される港北・鶴見区内では、揺れによる倒壊建物に伴う自力脱出困難者が多数発生する結果となった。

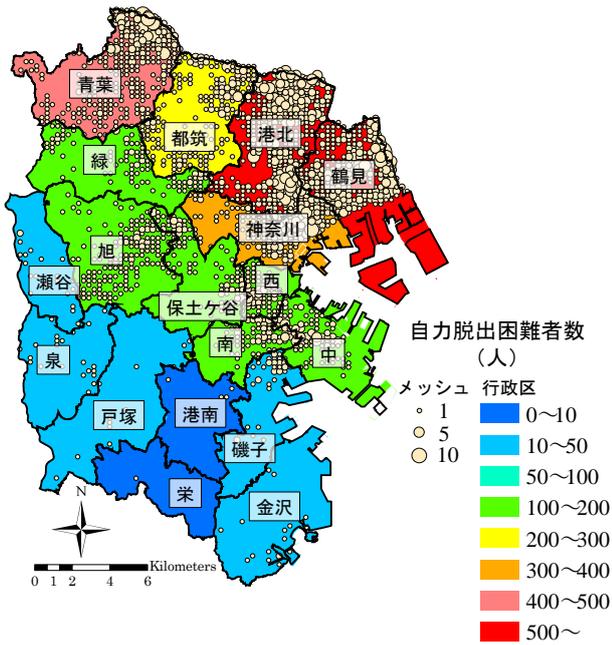


図7 自力脱出困難者数の算定結果

(4) 提案手法による被災地域内の救助活動の分析

本節では、提案手法を用いて、揺れによる倒壊建物に伴う自力脱出困難者の救助活動を分析する。

図8は、救助活動シミュレーションの出力結果の一例を示す。図8(a)は自力脱出困難者数、図8(b)~(c)は、地震発生からの時間経過に応じた救出活動が行われていない自力脱出困難者数の空間分布を示す。図8より、地震発生から24時間後の救助活動状況について着目すると、横浜市の南・中部では、ほとんどの自力脱出困難者の救助活動が実施されているのに対して、港北や青葉など北部では、多くの自力脱出困難者の救助活動が実施されていない状況であることが読み取れる。また、シミュレーションでは、地震発生当初、救助隊員が消防署・出張所周辺から救助活動を実施していることを確認した。これは、地震発生から救助部隊が各現場に到着するまでに要する時間が最小限になるように、巡回セールスマン問題として解析したことが要因であると推測する。このように、提案手法を活用することで、時間的・空間的な視点から、震災後の被災地域における救助活動状況の分析が可能となり、公助の担い手が不足する地域を明らかにすることができる。

表2は、救助活動の分析結果について示す。本研究では、計算負荷の理由から、10回のシミュレーションで被災地域内の救助活動を分析している。ただし、表2の行政区別の救助完了時間・生存者数の最大値・最小値・平均値・標準偏差より、被災地域の応援・受援体制を検討する上では、ケース別の通行障害による解析結果の変動が与える影響は小さいと考える。この要因として、提案手法では、250mメッシュ内で通行障害が発生すると判断された場合、メッシュ内の道路幅員13m未満の細街路の移動速度を1km/hと設定することで極度の渋滞状態を想定し、倒壊建物による街路閉塞の影響を考慮しており、救助部隊が到着できない現場は生じないものと想定しているためと推測する。したがって、個々の救助現場ではなく、市区町村単位で救助活動に要する時間を把握する場合や生存者数を算定する場合には、各試行における結果の変動は大きくないことが予想される。

表2より、地震発生から管轄区域内の自力脱出困難者

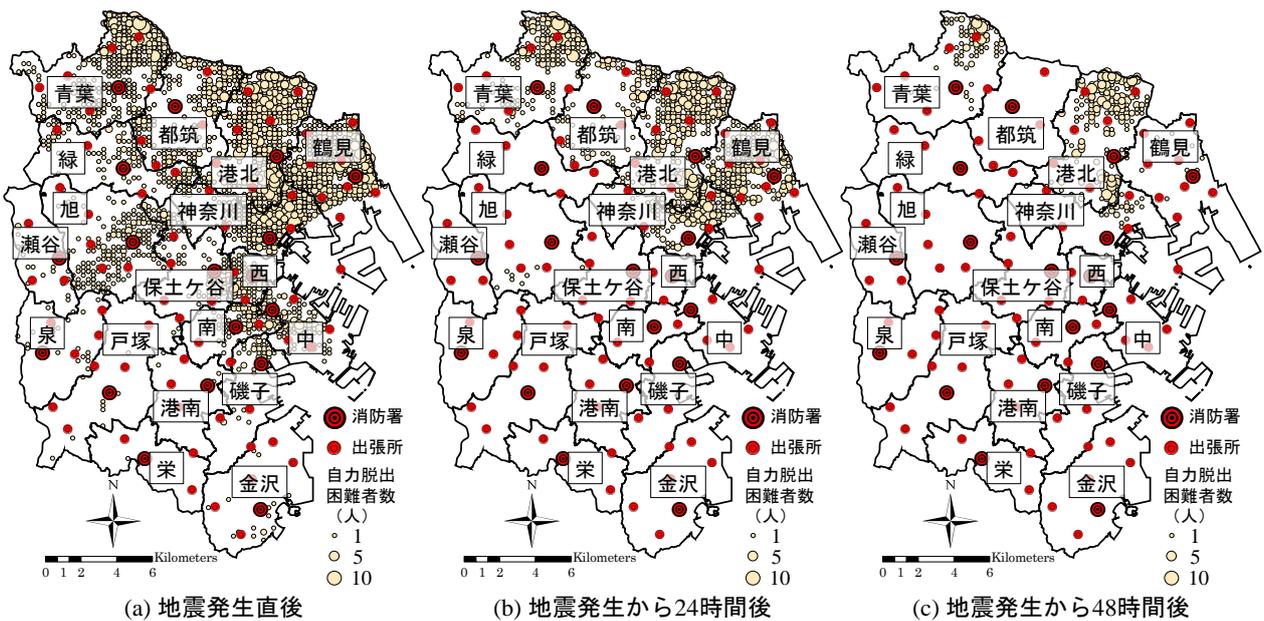


図8 救助活動状況の時空間変化

を全員救助するまでに要した時間（救助完了時間）の平均値は、港北が 84.2 時間、青葉が 62.4 時間、神奈川が 54.8 時間、鶴見が 52.3 時間、都筑が 41.4 時間の順で長い結果となった。一般的には、72 時間以内に救出することが望ましいとされているが、倒壊した木造建物の場合、崩壊部材が高密度に空間を埋めるため、24 時間以内の迅速な救助活動が必要との指摘もある。また、本研究では地震火災などは考慮しておらず、被災地域の救助活動は、算定した救助完了時間よりも長期化することが懸念される。上記を踏まえると、都心南部直下地震の際、横浜市内においては震度 6 強以上の揺れが予想される北部一帯は、救助隊の応援が特に必要になる可能性が高い。

図 9 は、地震発生からの時間経過に応じた未救出者数の平均値の推移について示す。図 9 より、鶴見は、横浜市内で 2 番目に自力脱出困難者数が多く発生するにも関わらず、地震発生から 26 時間時点で青葉、39 時間時点で神奈川より、未救出者数が下回ることが読み取れる。これは、人的被害量に対して消防力が比較的優位であることや、消防署周辺に人的被害が集中しているため救助隊の転進に伴う移動が少ないことが要因となり、青葉・神奈川と比較して救助活動が円滑に実施されるためである。

以上、提案手法による分析結果から、被災地域内の救助活動の進行状況が一様ではないことを考慮すると、震災直後の人的被害量のみを基準に応援部隊の派遣先を検討することは、限られた応援側の救助能力を有効活用する観点からは適切ではないことが予想される。よって、最大限の人命救助を実現するためには、地震発生から時間経過とともに変化する被災地域内の救助活動状況を踏まえた上で、応援・受援体制を検討する必要がある。

表 2 救助活動の分析結果

行政区	自力脱出困難者数 (人)	救助完了時間 (時間)				生存者数 (人)			
		最大	最小	平均	標準偏差	最大	最小	平均	標準偏差
港北	773	84.7	83.4	84.2	0.4	305.4	300.8	303.5	1.1
青葉	473	63.5	61.4	62.4	0.5	224.6	223.0	223.7	0.5
神奈川	353	55.5	54.3	54.8	0.3	189.2	187.9	188.6	0.4
鶴見	587	52.9	51.7	52.3	0.4	326.1	323.1	324.8	0.8
都筑	238	42.1	40.5	41.4	0.5	140.0	138.7	139.4	0.3
旭	176	28.8	26.7	27.5	0.7	132.4	131.8	132.1	0.2
保土ヶ谷	116	27.7	24.8	25.8	0.8	89.0	88.2	88.6	0.2
緑	112	23.5	19.8	21.5	1.1	87.0	86.3	86.6	0.2
西	103	20.8	19.5	20.0	0.5	80.5	80.1	80.3	0.1
南	109	19.7	18.0	18.9	0.6	85.6	85.2	85.5	0.1
中	124	18.5	16.9	17.8	0.6	98.6	98.3	98.4	0.1
磯子	45	13.6	12.1	12.8	0.5	38.0	37.9	37.9	0.0
瀬谷	22	8.1	7.7	7.9	0.1	19.8	19.7	19.8	0.0
泉	22	6.9	5.9	6.3	0.4	20.1	20.0	20.1	0.0
金沢	16	5.4	5.4	5.4	0.0	15.0	14.9	15.0	0.0
戸塚	12	3.6	3.6	3.6	0.0	11.3	11.3	11.3	0.0
港南	5	2.6	2.4	2.5	0.1	4.7	4.7	4.7	0.0
栄	1	2.4	2.3	2.3	0.0	0.9	0.9	0.9	0.0

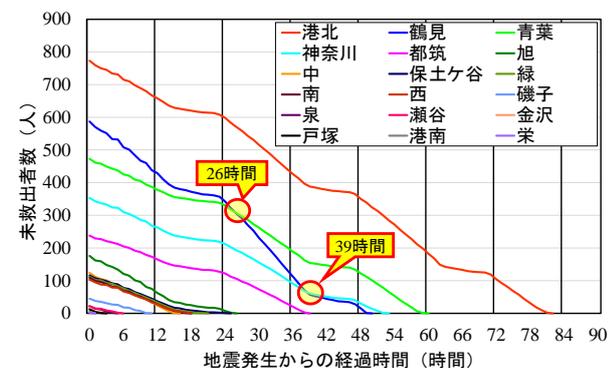


図 9 未救出者数の推移

(5) 応援部隊の派遣先・経路に関する分析

本節では、第 4 節の救助活動の分析結果を踏まえて、他の行政区と比較して救助活動が長期化することが予想される横浜市北部の行政区（港北・青葉・神奈川・鶴見・都筑）を対象に、応援部隊の派遣先・経路について分析・考察する。

図 10 は、中央防災会議の首都直下地震における各活動のタイムライン³⁾について示す。図 10 より、地震発生から 12 時間を目途に、応援部隊の活動拠点が設定されて救助活動が本格化する。また、地震発生から 24 時間を目途に、緊急輸送ルートの啓開および緊急交通路が指定され、48 時間以内には首都直下地震道路啓開計画¹⁹⁾で示される被災地内ルートの各方向上下 1 直線の啓開を目標としている。よって、本研究では地震発生から 12・24・48 時間後の 3 つの時間帯に焦点を当てた。

はじめに、地震発生から時間経過に応じた未救出者数の空間分布を考察するため、図 11 に未救出者数の分布、図 12 に未救出者が存在する 250m メッシュ数の推移を示す。表 2 および図 12 より、地震発生直後、港北は最も多くの自力困難者が広範囲で発生する。一方、青葉の自力脱出困難者数は、鶴見と比較して少ないものの、救助現場（未救出者が存在するメッシュ）が分散しており、応援部隊が各現場に到着するまで時間を要する可能性が高い。以上から、自力脱出困難者数だけでなく、各現場の位置関係を踏まえて応援体制を検討する必要がある。

そして、図 11 より、地震発生から 48 時間後では、青葉の北部一帯、港北の北部・南部一帯に未救出者が多く存在していることが読み取れる。この結果は、人的被害の空間分布と消防署・出張所の位置関係が深く影響しており、被害情報が錯綜する震災直後は消防署・出張所周辺から救助活動が実施されると想定¹⁴⁾すると、消防署から離れているこれらの地域では、地震発生から 48 時間以降も未救出者が存在する恐れがある。したがって、都心南部直下地震時における緊急交通路の交通規制・道路啓開における優先ルートを選定する際、人命救助の観点から港北の北部・南部、青葉の北部周辺にアクセスできる緊急交通路は優先度が高いことが予想される。特に、過去の震災の教訓^{11),15)}より、被災地域外から応援に向かう救助隊は土地勘が乏しく、活動現場に移動する際は地元消防本部が誘導のため部隊を割く状況が想定される。また、応援部隊は活動現場に関する具体的な無線指示を受けることができない状況も予想されることから、未救出者が集中して存在する地域に応援部隊を受け入れることが、効率的な救助活動を実施する上で望ましい。

次に、被災地域における人的被害量や消防力などを踏まえた応援部隊の派遣先について検討するため、図 13 に生存者数の推移について示す。図 13 の生存者数は、救出された自力脱出困難者のうち生きて救出された者と、未救出者のうち生存していると予想される者の合計値である。そして、特定の時刻における生存者数から、全ての自力脱出困難者の救助活動が完了した時点で生きて救出された者の最終的な人数を差し引くことで、未救出者のうち生存率の向上が期待される人数を算定した。この値を地域間で比較することで、最大限の人命確保を実現するための応援部隊の派遣先を、被災地域内の人的被害量および消防力を考慮した上で検討することができる。

図 14 は、地震直後（地震発生から 0 時間）および地震発生から「12 時間後」「24 時間後」「48 時間後」の未救出者のうち生存率の向上が期待される人数について示す。

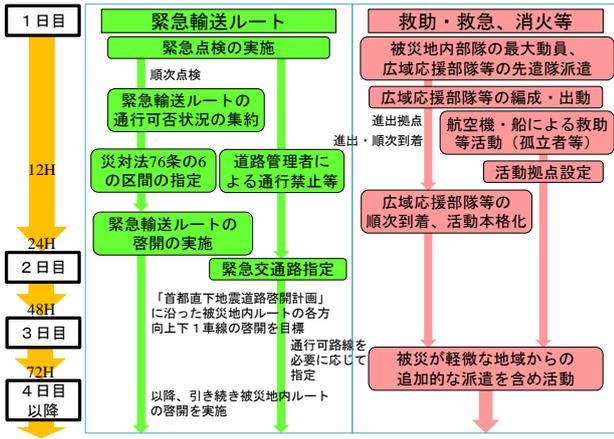


図10 首都直下地震における各活動のタイムライン³⁾

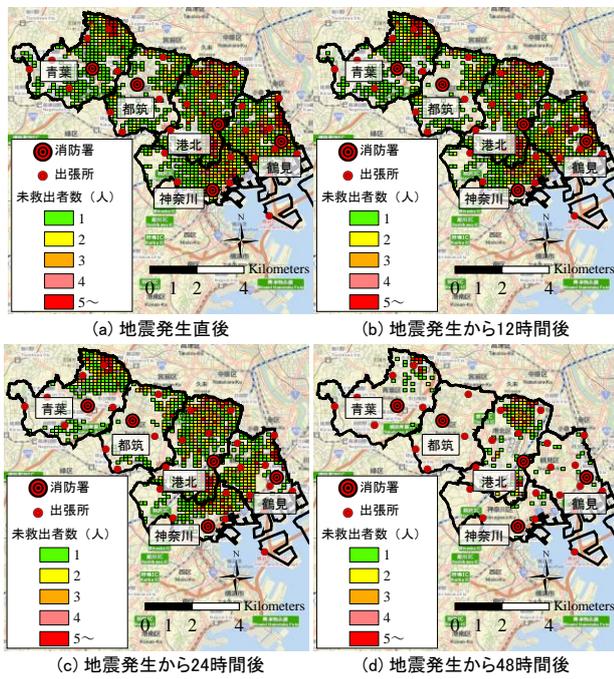


図11 未救出者数の分布

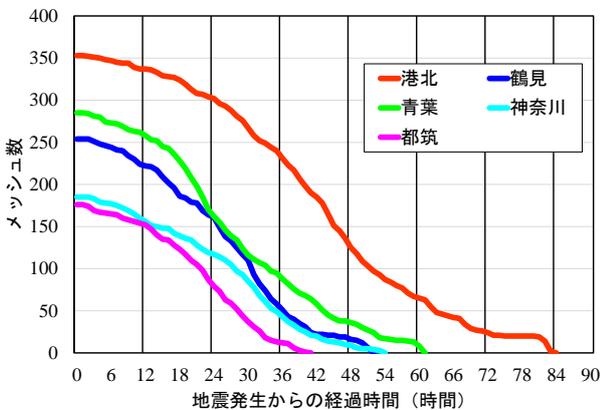


図12 未救出者が存在するメッシュ数の推移

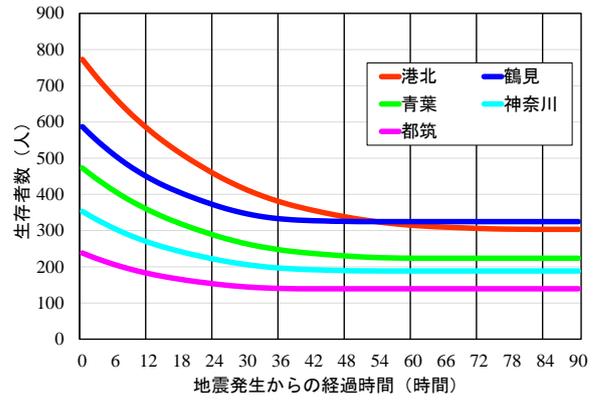


図13 生存者数の推移

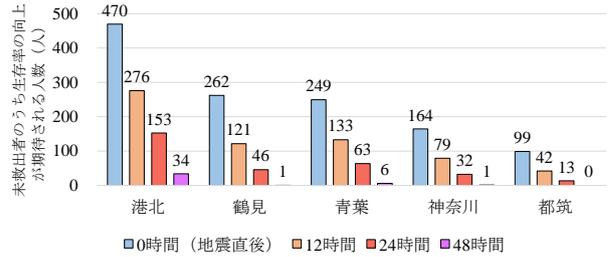


図14 未救出者のうち生存率の向上が期待される人数

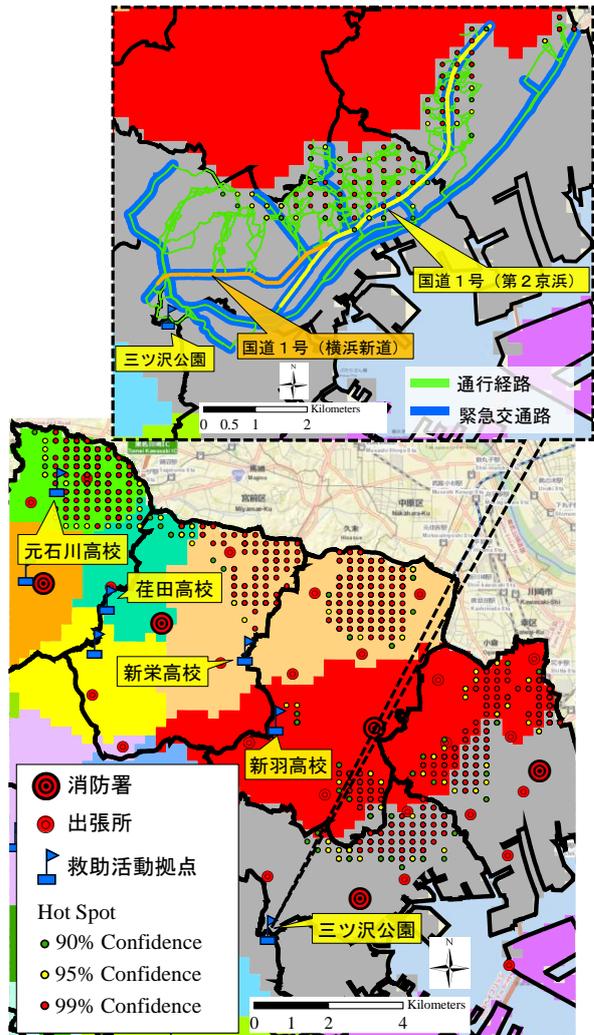


図15 応援部隊の派遣先・経路の分析

図14より、港北は地震発生からの時間経過に関わらず、他の区域と比較して大きく、応援部隊を派遣する優先順位が最も高い区域であると判断できる。一方、鶴見は、地震直後の未救出者のうち生存率の向上が期待される人数が港北に次いで大きいにも関わらず、地震発生から12時間後では青葉よりも小さくなる。これは、地震発生から12時間以内に救出された人数が、青葉は95人であるのに対し鶴見は158人と多く救出したこと、12時間以降も青葉と比べて鶴見における自力脱出困難者の救助活動が迅速に行われることが要因である。つまり、地震発生からの時間経過によっては、青葉と鶴見は応援部隊を派遣する優先順位が変動することが明らかとなった。上記の結果を踏まえると、被災地域における人的被害量や消防力などを踏まえて応援部隊の派遣先を検討する際、応援部隊の到着が遅れるほど地域間の救助活動の進行状況に差が生じることが予想されることから、提案手法を用いて、被災地域内の救助活動の時空間変化を想定し、応援部隊の配分や派遣先を決定することが、限られた応援側の救助能力を有効活用するためのソフト対策として期待できる。

最後に、応援部隊の派遣先・経路について考察するため、行政区別に、被災地域の救助隊により自力脱出困難者が救出されたものの死亡する確率を用いて、ArcGIS (10.4.1)の空間分析ツールである最適化ホットスポット分析⁸⁾を実施した。この分析におけるホットスポットは、死亡率が高い自力脱出困難者が、統計的に有意な値の空間クラスターを形成したことを示しており、被災地域内において公助の担い手が不足する地域を把握することに適していると判断した。また、地震による交通障害を考慮した上で、ArcGISのNetwork Analystツールを使用して、横浜市内の救助活動拠点から最も移動時間が短い250mメッシュの重心を結びつけて、メッシュを拠点別に分類した。そして、救助活動拠点として指定されている三ツ沢公園を対象に、ホットスポットに到達するまでの全ての使用経路を図示した。図15はこれらの分析結果を示しており、最も移動時間が短い救助活動拠点の分類でメッシュを色分けしている。

図15より、自力脱出困難者の死亡率のホットスポットは、自力困難者数が多く発生かつ消防署から離れている地域に集中している。ただし、鶴見のように自力脱出困難者数が比較的多い地域でも、消防署が近接している場合はホットスポットが形成されていない。また、港北のような人的被害状況と消防署・出張所の位置関係では、ホットスポットが互いに離れたところに形成されることが明らかとなった。

次に、図15の三ツ沢公園を対象としたホットスポットに到達するまでの使用経路に着目すると、国道1号（横浜新道・第2京浜）を使用することが、最寄りの救助活動拠点から、公助の担い手が不足する地域に向けて応援部隊を迅速に派遣するための重要な緊急交通路であることが明らかとなった。本研究では、細街路における倒壊建物による道路閉塞を交通障害として想定¹³⁾しており、横浜市のような旧耐震の木造棟数が多く、道路幅員5.5m未満の道路が半数を占めている地域では、緊急交通路を軸に救助現場へのアクセスを確保することが、応援部隊の迅速な派遣を実現させるために重要である。上記の結果を踏まえると、提案手法による分析結果は、震災直後の人命救助に重要な時間帯における緊急交通路の道路啓開・交通規制の優先ルートを選定する際に有用性が期待でき

る。

以上、本研究では、都心南部直下地震をケーススタディとして、震災後の被災地域における救助活動状況を分析する手法を提案・活用することで、公助の担い手が不足する地域を明らかにし、応援部隊の派遣先・経路について考察した。従来の地震被害予測では被害量が示されるのみで、被災地域における人的被害量や消防力・道路現況などを踏まえて応援部隊をどの地域に派遣するのが人命救助に有効なのかを検討するには、被災地域の救助活動の時空間変化を捉える必要がある。したがって、自治体が既に保有する地震被害想定などの情報を基に、提案手法を用いて、管轄部隊のみでは対応が難しく応援を必要とする可能性が高い地域を、時間的・空間的視点から明らかにすることで、応援部隊の誘導調整、近隣に位置する消防署同士の連携、緊急交通路の道路啓開・交通規制の優先ルート選定などに関する防災計画の基礎資料となることが期待できる。

4. 結論

本研究では、時間的・空間的な視点から、震災後の被災地域における救助活動状況を分析する手法を提案し、都心南部直下地震をケーススタディとして、公助の担い手が不足する地域を明らかにした。そして、得られた分析結果を基に、震災直後の人命救助に重要な時間帯における緊急交通路の道路啓開・交通規制の優先ルートを選定した。得られた成果を以下にまとめる。

1) 自治体が保有する地震被害想定などを、提案手法に入力することで、時間経過とともに変化する救助活動状況を分析することができた。特に、地震発生からの時間経過に応じた未救出者数の推移に着目すると、鶴見は、横浜市内で2番目に自力脱出困難者数が多く発生するにも関わらず、地震発生から26時間時点で青葉、39時間時点で神奈川より、未救出者数が下回ることが明らかとなった。これは、人的被害量に対して消防力が比較的優位であることや、消防署周辺に人的被害が集中しているため救助隊の転進に伴う移動が少ないことが要因となり、青葉・神奈川と比較して救助活動が円滑に実施されるためである。上記の分析結果より、被災地域の救助活動の進行状況が様々ではないことを考慮すると、震災直後の人的被害量のみを基準に応援部隊の派遣先を検討することは、限られた応援側の救助能力を有効活用する観点からは適切ではない。

2) 被災地域内の救助活動の分析結果より、地震発生からの時間経過によっては青葉と鶴見は応援部隊を派遣する優先順位が変動することが明らかとなった。上記の結果を踏まえると、被災地域における人的被害量や消防力などを踏まえて応援部隊の派遣先を検討する際、応援部隊の到着が遅れるほど地域間の救助活動の進行状況に差が生じることが予想されることから、提案手法を用いて被災地域内の救助活動の時空間変化を想定し、応援部隊の配分や派遣先を決定することが、限られた応援側の救助能力を有効活用するためのソフト対策として期待できる。

3) 救助活動拠点である三ツ沢公園を対象としたホットスポットに到達するまでの使用経路に着目すると、国道1号（横浜新道・第2京浜）を使用することが、最寄りの救助活動拠点から公助の担い手が不足する地域に向けて応援部隊を迅速に派遣するための重要な緊急交通路であ

補注表 1 拠点施設の定義³⁾

拠点	定義
進出拠点	広域応援部隊等が被災地に移動する際の目標となる拠点であって、各施設管理者の協力にて設定するもの
救助活動拠点	各部隊が被災地において部隊の指揮、宿営、資機材集積、燃料補給等を行う拠点として、被災地方公共団体があらかじめ想定し、発災後には速やかに確保すべきもの

(2) 文献 3 によれば、都心南部直下地震時における応援部隊の派遣先を選定する際、被災地域内の救助隊の勢力も考慮した上で、中央防災会議被害想定における死者数および自力脱出困難者数に応じて、1都3県（東京都、埼玉・千葉・神奈川県）に応援部隊を派遣することを想定している。

(3) 長野県は、広域防災拠点を、進出拠点・救助活動拠点・航空搬送拠点・広域物資輸送拠点の総称として扱っている。

(4) 山口⁷⁾は、全国の47都道府県の県庁、政令指定都市20市・中核市48市の115の自治体と、全国土木系教員名簿2016年版（大学・高専）に記載されている教員のうち専門に「防災」「減災」と入っている教員94名を対象に、震災直後の防災拠点の道路接続の重要度に関するアンケート調査を実施した。なお、アンケートでは、防災拠点の重要度評価だけでなく、拠点機能の必要な時期についても調査を実施している。

(5) 神奈川県の自力脱出者数の算定手法を下記に示す。

①神奈川県（木造）

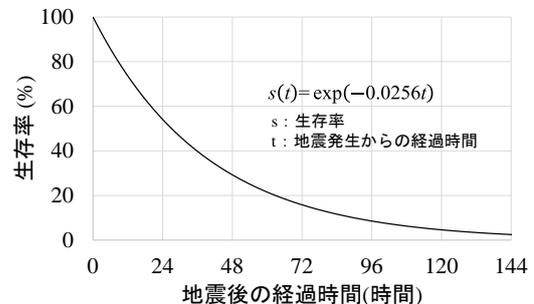
$$\begin{aligned} \text{自力脱出困難者数} &= 0.3 \times \text{崩壊建物数} \times \text{木造建物1棟あたりの屋内滞留人口} \\ \text{崩壊建物数} &= \text{全壊建物数} \times \text{崩壊率} \\ \text{崩壊率} &= 0.4 \times \text{計測震度} - 2.1 \end{aligned}$$

②神奈川県（非木造）

$$\begin{aligned} \text{自力脱出困難者数} &= 0.3 \times \text{倒壊建物数} \times \text{非木造建物1階当たりの滞在人数} \\ \text{倒壊建物数} &= \text{全壊建物数} \times \text{震度} \cdot \text{建築年に応じた倒壊率} \end{aligned}$$

(6) 本研究では、250mメッシュ内で通行障害が発生すると判断された場合、メッシュ内の道路幅員13m未満の細街路の移動速度を1km/hと設定することで、極度の渋滞状態を想定し、倒壊建物による街路閉塞の影響を考慮した。シミュレーションでは、通行障害が発生するメッシュ内の細街路を通行不可とせず、救助部隊が到着できない現場は生じないものとした。なお、通行障害の影響を受ける細街路の移動速度を1km/hに低下させることで、緊急交通路や道路幅員13m以上の道路などが救助部隊の移動経路として優先的に使用されることを確認できた。

(7) 文献 18 における地震発生からの経過時間と生存率の関係式のグラフを示す。なお、本研究では、シミュレーションで明らかにする「自力脱出困難者が被災してから救助されるまでの時間」を、下記の式に適用することで、救出された自力脱出困難者の生存率を求めた。



補注図 1 時間依存の生存率¹⁸⁾

(8) 最適化ホットスポット分析では、Getis-Ord Gi*統計を使用し、統計的に有意なホットスポット（平均値以上の集積）を特定する。また、ホットスポットの信頼度が90%以上では「事象は空間的にランダムに存在する」という帰無仮説を棄却できる。分析手法に関する詳細情報は、参考文献 20 を参照されたい。

ることが明らかとなった。横浜市のような旧耐震の木造棟数が多く、道路幅員5.5m未満の道路が半数を占めている地域では、緊急交通路を軸に救助現場へのアクセスを確保することが、応援部隊の迅速な派遣を実現させるために重要である。上記を踏まえると、提案手法による分析結果は、震災直後の人命救助に重要な時間帯における緊急交通路の道路啓開・交通規制の優先ルートを選定する際に有用性が期待できる。

本研究は、震災直後の被害情報が錯綜する状況に備え、自治体が既に保有する地震被害想定などの情報を基に提案手法を用いることで、受援側が応援を必要とする可能性が高い地域を把握できることを示した。分析結果は、応援部隊の誘導調整、近隣に位置する消防署同士の連携、緊急交通路の道路啓開・交通規制の優先ルート選定などに関する防災計画の基礎資料となることが期待できる。また、既往研究¹³⁾では、横浜市を対象地域として一律の揺れを想定して、行政区別に震災時の救助活動能力を考慮した地域評価を試みたところ、計測震度6.0（震度6強）では、横浜市内の全ての地域において生存率が高い時間帯（24時間以内）に「公助」が行き届かない可能性があることが明らかとなった。本研究でも、震度6強が想定される横浜市北部の行政区では、救助活動が長期化することが予想されるが、震度6弱以下の横浜市中南部の多くの行政区では、救助活動が24時間以内に完了している。したがって、震度6弱以下の行政区を管轄する消防と、震度6強以上の行政区を管轄する消防との連携体制の構築が、震災時の人命救助に重要であると考えられる。そして、「リアルタイム利用」に関する展望として、本提案手法の入力値を「計測震度別の一律の揺れによる全壊棟数・半壊棟数」とすることで、その解析結果（救助活動の困難度）を参考に、初動対応期に部隊応援の方針などの検討が可能となる。加えて、救助部隊の配置見直しや、道路ネットワーク・建物の脆弱性の改善が必要な地域を、救助活動面から明らかにできる可能性がある。

一方、今後の課題として、本研究では地震火災を考慮していないため、提案手法に消火活動を組み込むことの必要性は論を待たない。特に、港北や青葉は地震火災による危険性が高い地域と、本研究で明らかにした公助の担い手が不足する地域が空間的に重なる部分が存在するため、死者数が増加する恐れがある。また、本研究の被害想定において、鶴見は青葉よりも自力脱出困難者数が多く発生するにも関わらず、自力脱出困難者が存在するメッシュ数は少なかったことを踏まえると、地域間で異なる救助現場の空間的な広がりや検索時間の増減と関係することが予想される。今後、救助現場の空間的な広がりや検索時間の関係を明らかにして、土地勘に乏しい応援部隊による効率的な救助活動の在り方を検討することが求められる。そして、実効性のある応援・受援計画を立案するためには、隣接する消防署間の連携も踏まえた上で、被災地域外から向かう応援部隊の派遣先・配分を検討する必要がある。あわせて今後の課題としたい。

補注

(1) 文献 3 を参考に、本研究における進出拠点・救助活動拠点の定義を下記に示す。

謝辞

本研究で用いた建物現況データは横浜市建築局から提供して頂いた。また、本研究は公益財団法人横浜学術教育振興財団からの助成を受けた。関係各位に深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 総務省消防庁：平成 27 年版消防白書, 2015, <https://www.fdma.go.jp/publication/hakusho/h27/> (参照 2020-8-6)
- 2) 熊本市消防局総務部総務課：平成 28 年熊本地震熊本市消防局活動記録誌, 2018, https://www.city.kumamoto.jp/hpkiji/pub/detail.aspx?c_id=5&id=19060 (参照 2020-8-6).
- 3) 中央防災会議幹事会：首都直下地震における具体的な応急対策活動に関する計画, 2019, <http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/index.html> (参照 2020-8-6)
- 4) 三船康道, 蓑田ひろ子：阪神・淡路大震災における公的機関の応急的公園利用に関する考察, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 62, No. 492, pp. 157-162, 1997.
- 5) 島田雅也, 中林一樹：大都市における都市公園の防災的充足度の測定に関する手法論的研究—東京都世田谷区を事例として—, 地域安全学会論文集, No. 4, pp. 345-352, 2002.
- 6) 小玉乃理子, 秦康範, 越野修三, 阪本真由美, 宇田川真之, 国崎信江, 花原英徳, 星野渉, 斉藤健郎：広域防災拠点と受援対象業務に着目した広域受援計画の検討プロセス—長野県における広域受援計画策定に向けた検討過程—, 地域安全学会論文集, No. 34, pp. 103-113, 2019.
- 7) 山口裕通, 小泉奏子, 大澤脩司, 中山晶一朗：道路ネットワークの接続性強化に向けた防災拠点の重要度ランクの推定, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 74, No. 5, pp. I_303-I_314, 2018.
- 8) 村上ひとみ, 波多野雅之, 川瀬博：福岡市における想定地震に対する閉じ込め予測と救助活動シミュレーション—木造建物について—, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol. 31, pp. 14 01_1-1401_4, 2008.
- 9) 沖拓弥, 大佛俊泰：住民による救助活動を組み込んだ大地震時における木密地域の広域避難シミュレーション分析, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 81, No. 724, pp. 1345-1353, 2016.
- 10) 中村仁, 加藤孝明：地震災害における自治体間の相対的な地域災害対応力評価, 地域安全学会論文集, No. 14, pp. 47-55, 2011.
- 11) 警察庁：熊本地震における警察の救助活動に関する調査分析, 2017, <https://www.npa.go.jp/bureau/security/kumamotojishin/kumamotojishin2.html> (参照 2020-8-6)
- 12) 神奈川県地震被害想定調査委員会：神奈川県地震被害想定調査報告書, 2015, <http://www.pref.kanagawa.jp/docs/j8g/cnt/f5151/p15579.html> (参照 2020-8-6)
- 13) 喜納啓, 稲垣景子, 佐土原聡, 矢代晴実：地震災害時の救助活動能力を考慮した地域評価の試み, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 85, No. 775, pp. 1955-1963, 2020.
- 14) 横浜市総務局危機管理部防災企画課：横浜市防災計画, pp. 23 3, 2020, <http://www.city.yokohama.lg.jp/somu/org/kikikanri/keikaku/shinsai.html> (参照 2020-8-12)
- 15) 阪神・淡路大震災の教訓情報分析・活用調査委員会：阪神・淡路大震災教訓情報資料集, 2006, http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/data/index.html (参照 2020-8-12)
- 16) 横浜市消防局：平成 29 年年報, 2018, <https://www.city.yokohama.lg.jp/city-info/yokohamashi/org/shobo/sonota/nenpoh.html> (参照 2020-8-12)
- 17) 火災予防審議会：地震火災による人的被害の軽減方策, 2015, http://www.tfd.metro.tokyo.jp/kk/21k_jisin_tousin.html (参照 2020-8-12)
- 18) 楯田泰子, 高田至郎：震後救命活動に関わる道路システムの機能評価法, 土木学会論文集, No. 731, pp. 185-193, 2003.
- 19) 首都直下地震道路啓開計画検討協議会：首都直下地震道路啓開計画, 2016, <https://www.ktr.mlit.go.jp/road/bousai/index00000002.html> (参照 2020-6-19)
- 20) ESRI：最適化ホットスポット(Optimized Hot Spot Analysis), <https://desktop.arcgis.com/ja/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/optimized-hot-spot-analysis.htm> (参照 2020-7-22)

(原稿受付 2020.8.23)

(登載決定 2021.1.9)