

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	大地震時の建物倒壊にともなう道路閉塞を考慮した拠点施設へのアクセシビリティに関する研究
Title(English)	
著者(和文)	岸本まき
Author(English)	Maki Kishimoto
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11492号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:大佛 俊泰,藤井 晴行,坂田 弘安,斎尾 直子,沖 拓弥
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11492号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学
環境・社会理工学院 建築学系
令和元年度 博士論文

大地震時の建物倒壊にともなう道路閉塞を考慮した
拠点施設へのアクセシビリティに関する研究

提出者 岸本 まき (東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系)
指導教員 大佛 俊泰 教授

目次

図表リスト	iii
第一章 序論	1
1. 研究背景と既往研究について	2
1.1 研究背景	2
1.2 既往研究について	3
2. 本研究の目的.....	5
3. 本研究の構成.....	6
第二章 緊急活動シミュレーションモデルの構築	8
1. 緊急活動シミュレーションモデルの概要	9
2. 建物倒壊シミュレーションモデル	12
2.1 Is 値に基づく建物倒壊確率モデル	12
2.2 実構造・建築年に基づく建物倒壊確率モデル	14
3. 道路閉塞シミュレーションモデル	16
3.1 建物倒壊による道路閉塞判定モデル	16
3.2 瓦礫流出確率に基づく道路閉塞確率モデル	17
4. 緊急車両移動モデル	18
5. 第二章のまとめ	20
第三章 特定緊急輸送道路を用いたアクセシビリティ評価と沿道建築物耐震化の効果.....	21
1. 隣接県からの物資輸送などを想定したアクセシビリティ評価方法.....	22
2. 使用データおよびシミュレーションの設定条件.....	23
2.1 使用データ	23
2.2 シミュレーションの設定条件	29
3. 特定緊急輸送道路のアクセシビリティ評価	32
3.1 道路閉塞率の空間分布.....	32
3.2 特定緊急輸送道路のアクセシビリティ評価	33
3.3 一般緊急輸送道路の役割	35
4. 第三章のまとめ	38
第四章 大地震発生時におけるアクセシビリティが脆弱な沿道区域の抽出方法.....	39
1. アクセシビリティ脆弱区域の抽出方法.....	40
2. 使用データおよびシミュレーションの設定条件.....	42
2.1 使用データ	42
2.2 シミュレーションの設定条件	48
3. 東京都内の緊急輸送道路を用いた災害拠点病院へのアクセシビリティ評価	49
3.1 道路閉塞の空間分布	49

3.2	リンク孤立率の空間分布	50
3.3	災害拠点病院ごとのネットワーク孤立率	51
3.4	二次医療圏ごとのネットワーク孤立率	54
4.	第四章のまとめ	57
第五章 緊急輸送道路以外の道路を用いたアクセシビリティ評価と市街地性状の関連分析		58
1.	緊急輸送道路以外の道路を用いたアクセシビリティ評価	59
2.	シミュレーションの設定条件	61
3.	物的被害とアクセシビリティ指標の空間分布	63
3.1	物的被害の空間分布	63
3.2	アクセシビリティ指標の空間分布	65
4.	アクセシビリティ指標と市街地性状の関連分析	67
4.1	市街地特性変数を用いた重回帰分析	67
4.2	物的被害モデルの推定結果	68
4.3	アクセシビリティ評価モデルの推定結果	71
4.4	地域到達確率と市街地性状の関連分析	74
5.	第五章のまとめ	77
第六章 結論		78
1.	本研究のまとめ	79
2.	結論	81
付録		82
付録 1	物的被害モデルの比較	83
1.1	物的被害モデルの比較の概要	83
1.2	使用データ	84
1.3	建物倒壊モデルの推定結果の比較	85
1.4	道路閉塞モデルの推定結果の比較	86
参考文献		88
関連する研究業績		91
	学術雑誌論文（査読あり）	91
	国際会議論文（査読あり）	91
	国内会議論文（査読なし）	91
	受賞歴	92
謝辞		93

図表リスト

図 1.3-1	本研究の全体像.....	7
図 2.1-1	緊急活動シミュレーションモデルの概要.....	9
図 2.1-2	建物倒壊による道路閉塞判定モデルで想定する道路閉塞の例 (写真提供：墨田区).....	10
図 2.1-3	瓦礫流出確率に基づく道路閉塞確率モデルで想定する道路閉塞の例 (写真提供：防災システム研究所).....	10
表 2.1-4	乱数生成の一例.....	11
図 2.2.1-1	Is 値と建物倒壊確率の関係 (被災度：倒壊).....	12
表 2.2.1-2	Is 値に基づく建物倒壊確率モデルにおける被災ランクの分類.....	13
図 2.2.2-1	木造建物の倒壊確率 (被災ランク：全壊).....	14
表 2.2.2-2	建物倒壊確率の回帰係数 (被災ランク：全壊).....	14
表 2.2.2-3	実構造・建築年に基づく建物倒壊確率モデルにおける被災ランクの定義.....	15
図 2.3.1-1	建物倒壊を考慮した有効幅員 $W_e(j)$ の推定の一例.....	16
図 2.3.1-2	緊急車両の移動における中央分離帯の考慮.....	16
図 2.3.2-1	道路閉塞の推定手順.....	17
表 2.4-1	Dijkstra 法および幅優先探索の概要.....	19
図 3.2.1-1	耐震化推進対象建築物データの概要.....	24
図 3.2.1-2	耐震化推進対象建築物データの概要.....	24
図 3.2.1-3	緊急輸送道路データの概要.....	25
表 3.2.1-4	大地震時における道路リンク j の通行速度.....	25
図 3.2.1-5	インターチェンジ付近における接道状況.....	25
図 3.2.1-6	東白鬚公園および汐入公園周辺の空間分布.....	26
図 3.2.1-7	大規模救出救助活動拠点の空間分布.....	27
表 3.2.1-8	大規模救出救助活動拠点一覧.....	28
図 3.2.2-1	特定緊急輸送道路上の進入地点の空間分布.....	29
表 3.2.2-2	特定緊急輸送道路上の進入地点一覧.....	30
表 3.2.2-3	シミュレーション実行時における進入地点および使用道路の想定.....	31
図 3.3.1-1	特定緊急輸送道路 (高速道路) における道路閉塞率の空間分布.....	32
図 3.3.1-2	特定緊急輸送道路 (高速以外) における道路閉塞率の空間分布.....	32
表 3.3.2-1	現状におけるアクセシビリティ指標の推定結果.....	33
表 3.3.2-2	耐震化シナリオ.....	33
図 3.3.2-3	特定緊急輸送道路を用いた大規模救出救助活動拠点へのアクセシビリティ 評価.....	34
表 3.3.3-1	現状におけるアクセシビリティ指標の推定結果 (特定緊急輸送道路全体の耐震化率：80.6%、 一般緊急輸送道路全体の耐震化率：75.0%).....	35
図 3.3.3-2	特定緊急輸送道路および一般緊急輸送道路を用いた 大規模救出救助活動拠点へのアクセシビリティ評価.....	36
表 3.3.3-3	現状から 10%耐震化した場合の到達可能率.....	

	(特定緊急輸送道路(高速道路)から進入した場合)	37
図 4.1.1-1	道路閉塞によって拠点施設へ到達不能な場合	40
図 4.1.1-2	孤立リンクの抽出方法	40
図 4.2.1-1	建物データおよび道路データの例	42
図 4.2.1-2	道路と沿道建築物集合の関係	42
表 4.2.1-3	大地震時における道路リンク j の通行速度	43
表 4.2.1-4	分析対象建物数, 道路リンク数, および, ノード数	43
図 4.2.1-5	災害拠点病院および二次医療圏の空間分布	44
図 4.2.1-6	災害拠点病院および二次医療圏の空間分布(拡大版)	45
表 4.2.1-7	災害拠点病院一覧	46
表 4.2.1-8	二次医療圏一覧	47
図 4.3.1-1	道路閉塞率の空間分布	49
図 4.3.1-2	道路閉塞率の累積度数分布	49
図 4.3.2-1	LI 値の空間分布	50
図 4.3.2-2	LI 値と道路閉塞率の差の累積度数分布	50
図 4.3.3-1	災害拠点病院ごとの NI 値の空間分布	51
図 4.3.3-2	東邦大学医療センター大森病院周辺の道路閉塞率および LI 値の空間分布	51
表 4.3.3-3	災害拠点病院ごとの NI 値一覧	52
図 4.3.4-1	閉塞リンクおよび孤立リンクの分布の例	54
図 4.3.4-2	到達可能な拠点施設数と NI 値の関係の例	54
図 4.3.4-3	二次医療圏ごとの NI 値の推移 (M : 二次医療圏内に存在する全拠点施設数, m : 到達可能な拠点施設数)	55
表 4.3.4-4	二次医療圏ごとの NI 値一覧 (M : 二次医療圏内に存在する全拠点施設数, m : 到達可能な拠点施設数)	56
図 5.2-1	アクセシビリティ指標の集計単位	61
図 5.2-2	湾岸エリアにおける道路分布	62
図 5.2-3	緊急輸送道路が密に整備されているエリアにおける道路分布	62
図 5.3.1-1	建物全壊率の空間分布(計 100 回のシミュレーションの平均値)	63
図 5.3.1-2	道路閉塞率の空間分布(歩行活動時: 有効幅員 W_e が 0m 未満) (計 100 回のシミュレーションの平均値)	63
図 5.3.1-3	道路閉塞率の空間分布(車両活動時: 有効幅員 W_e が 4.0m 未満) (計 100 回のシミュレーションの平均値)	64
図 5.3.2-1	地域到達率の空間分布(計 100 回のシミュレーションの平均値)	65
図 5.3.2-2	増加移動時間の空間分布(計 100 回のシミュレーションの平均値)	65
図 5.3.2-3	地域到達確率の空間分布(計 100 回のシミュレーションの平均値)	66
表 5.4.1-1	モデル式に用いる市街地特性変数一覧	67
表 5.4.2-1	建物全壊率の推定式における説明変数と推定パラメータ ($N=533$)	69
表 5.4.2-2	道路閉塞率(車両活動時: 有効幅員 W_e が 4.0m 未満)の推定式における説明変数と推定パラメータ ($N=533$)	69
表 5.4.2-3	道路閉塞率(歩行活動時: 有効幅員 W_e が 0m 未満)の推定式における説明変数と推定パラメータ ($N=532$)	70

図 5.4.2-4	建物全壊率の推定精度	70
図 5.4.2-5	道路閉塞率（車両活動時：有効幅員 W_e が 4.0m 未満）の推定精度	70
図 5.4.2-6	道路閉塞率（歩行活動時：有効幅員 W_e が 0m 未満）の推定精度	70
表 5.4.3-1	地域到達率の推定式における説明変数と推定パラメータ ($N=530$)	72
表 5.4.3-2	増加移動時間の推定式における説明変数と推定パラメータ ($N=533$)	72
表 5.4.3-3	地域到達確率の推定式における説明変数と推定パラメータ ($N=533$)	73
図 5.4.3-4	地域到達率の推定精度	73
図 5.4.3-5	地域到達確率の推定精度	73
図 5.4.3-6	増加移動時間の推定精度	73
図 5.4.4-1	k -means 法に基づくエリアの分類結果	74
表 5.4.4-2	各グループにおける市街地特性変数 l の平均値	75
図 5.4.4-3	地域到達確率と旧耐震木造建物率の関係	75
図 5.4.4-4	地域到達確率と沿道建築物数の関係	75
図 5.4.4-5	地域到達確率と狭隘道路率の関係	75
図 5.4.4-6	地域到達確率と広幅員道路率の関係	75
表 5.4.4-7	地域到達確率を 1 ポイント向上させるために必要な 市街地特性変数の改善値	76
図 5.4.4-8	緊急避難路の例（著者撮影）	76
図 5.4.4-9	緊急避難路を設置したことによる沿道建築物数の変化	76
表 7.1.1-1	緊急活動シミュレーションモデル一覧	83
図 7.1.1-2	緊急活動シミュレーションモデルの概要 （再掲：p. 9, 図 2.1-1（一部））	83
表 7.1.3-1	各建物倒壊シミュレーションによる推定結果 （計 100 回のシミュレーションに基づく平均値）	85
図 7.2.4-1	特定緊急輸送道路（高速以外）における道路閉塞率の空間分布 （再掲：図 3.3.1-2）	86
図 7.2.4-2	道路閉塞率の空間分布（再掲：図 4.3.1-1）	87

第一章
序論

1. 研究背景と既往研究について

1.1 研究背景

大地震発生時には、建物や電柱の倒壊、また、液状化などに起因する道路閉塞により、緊急車両が通行不能となる可能性がある。兵庫県南部地震(1995年)では、沿道建築物の倒壊によって主要幹線道路が閉塞し、緊急車両の通行のみならず、緊急支援物資の輸送や復旧・復興プロセスにおいても大きな障害となった¹⁾。

そのため、多くの地方公共団体では、大地震発生時に救急救命活動の生命線となる幹線道路を緊急輸送道路に指定し、沿道建築物の耐震化を推進することで、避難、救急消火活動、緊急物資の輸送、復旧復興活動を支える重要なインフラストラクチャとして機能させるための方策(機能確保の方策)について検討している^{2),3)}。例えば、東京都では、緊急輸送道路沿道建築物の耐震化を推進する条例⁴⁾を逸早く制定した。ここでは、緊急輸送道路(約2,000km)のうち特に沿道建築物の耐震化を図る必要があると認められる道路を特定緊急輸送道路(約1,000km)に指定し(これ以外は一般緊急輸送道路)、道路を閉塞させる危険性の高い建物(特定沿道建築物)の所有者・管理者に対して、耐震診断または耐震改修の実施状況などについての報告を義務付けている⁵⁾。さらに、耐震性が不十分な特定沿道建築物については、耐震改修等を実施するよう働きかけを行っている。

このように、各道路の担う交通機能に応じて、頑健性を差別化し、道路網を階層的に構成する「機能階層型道路ネットワーク^{注1)}」という概念は、都市内移動の円滑性を確保するための道路計画における基本的な考えとして、広く認識されている^{6),7)}。例えば、朝倉らは⁸⁾、階層性^{注2)}を持った道路網は、階層性の低い道路網に比較して、大地震時の道路閉塞下において、拠点施設などへのアクセシビリティが確保しやすくなることを明らかにしている。すなわち、大地震時の拠点施設へのアクセシビリティを確保し、円滑な災害時活動を実現するためにも、道路網の階層性を高めるような整備プログラムを推進することは、重要である。

多くの整備プログラムでは、その整備目標として、整備が完了した建物数・道路数が全体の建物数・道路数に占める割合(例えば、耐震化率や耐火率、道路の拡幅整備率など)を設定している。例えば、東京都耐震改修促進計画⁹⁾では、令和2年度までに、住宅の耐震化率を95%とすることを目標としている。しかし、建築物耐震化などの市街地整備事業の実施有無は、当該建築物の所有者の努力義務に留まっており、住民との合意形成や、事業として採算が取れない等の問題があるため、必ずしも順調に進んでいるとはいえない。また、耐震化率などの指標を用いて、大地震時の交通機能(アクセシビリティ)を直接評価することは困難であり、市街地整備を進める上で、それらをより明確に把握可能な指標を整備目標として設定することが求められる。

注1) 各道路が担う交通機能を、3種類(トラフィック機能、アクセス機能、滞留機能)に分類し、それらの機能分類に応じて、道路網を階層的に構成するという考え。トラフィック機能は、交通を円滑に流すための機能、アクセス機能は、沿道の土地・施設に出入りするための機能、滞留機能は、駐停車や滞留のための機能である。

注2) それぞれの道路が期待された役割(交通機能)を果たし、道路網が全体として機能するような性質。

1.2 既往研究について

大地震時における拠点施設などへのアクセシビリティ評価に関する研究は多く、レビュー論文としては、中山ら⁹⁾が詳しい。代表的なアクセシビリティ評価指標としては、連結信頼性¹⁰⁾やポテンシャル型アクセシビリティ¹¹⁾が挙げられる。

連結信頼性は、OD ペア間の到達可能性 (OD ペア間が少なくとも 1 つの利用可能な経路で結ばれているか) を取り扱う指標である。例えば、Uddin ら¹²⁾は、大地震時の河川氾濫による道路の冠水と建物倒壊に伴う道路閉塞を考慮して、緊急輸送道路を用いた県庁と市町村役場間の到達可能性について分析している。また、瀬戸ら¹³⁾、原田ら¹⁴⁾は、OD ペア間の到達可能性だけでなく、移動経路の頑健性も評価可能なアクセシビリティ評価指標を提案している点で優れている。具体的には、非重複経路本数が多い OD ペアほど頑強に連結され、アクセシビリティが高くなるという、 N -edge-connected network¹⁵⁾の概念を用いて、非重複経路を考慮したアクセシビリティ評価を行なっている。

ポテンシャル型アクセシビリティは、各地区から主要施設への近接性を評価する指標である。近藤ら¹⁶⁾は、道路の途絶リスクと周辺都市で享受可能なサービス機会数を考慮した新しい道路網評価指標を提案し、道路ネットワークと医療施設との関係性を評価している。これらの研究は、アクセシビリティの現状を評価する視点や指標を与えており、参考となる。

しかし、これらの指標を用いたアクセシビリティ評価では、OD ペア間の移動性が確保されない場合や大幅な迂回を要する場合において、それらの原因となるアクセシビリティが脆弱な沿道区域 (緊急車両の通行機能が確保困難となる沿道区域) を特定することは困難である。

大地震発生時におけるアクセシビリティが脆弱な沿道区域の特定方法については、複数の研究が存在する^{17), 18)}。大澤ら¹⁷⁾は、大地震時の建物倒壊に起因する道路閉塞や橋梁の損傷などを考慮した緊急車両の移動活動を記述可能なシミュレーションを構築し、緊急輸送道路を用いた重要拠点間の移動性を評価している。その上で、各道路区間が通行不能となる確率を算出し、アクセシビリティが脆弱となる道路区間の評価を行なっている。この研究は、アクセシビリティが脆弱な沿道区域を抽出可能な点で優れているが、その評価対象が重要拠点間の移動に関係する道路区間に限定されている点で課題が残る。原田ら¹⁸⁾は、緊急車両による重要拠点への移動に用いられる道路をメッシュごとに抽出し、それぞれについて連結信頼性を算出することで、広域な分析対象地域におけるアクセシビリティが脆弱な沿道区域の抽出を可能とした。しかし、計算負荷を抑えるため、単純な想定の下での検討しか行なっておらず、連結信頼性の算出においても、厳密な計算を行っていない。すなわち、複数の拠点への災害時活動など、複雑な条件下におけるアクセシビリティ評価には、この手法は不向きである。

一方、道路ネットワークの耐震化の推進方法について検討した研究も存在する¹⁹⁾⁻²¹⁾。Nagae et al.¹⁹⁾は道路ネットワークの耐震化戦略を最適化問題として定式化し、災害によって増加する交通不便益の期待値と耐震化費用の和である社会的費用が最小になるような耐震化戦略を求めている。喜多・近田²⁰⁾はゲーム理論を用いて、道路構造物の耐震レベル向上による効用と道路ネットワーク全体の効用が同時に最大となるように、道路構造物の耐震補強の優先順位を設定する手法を提案している。南ら²¹⁾は、災害時に重要な拠点となりうる都市施設への輸送ルートの確保を目的として、災害時の輸送機能低下を小さく抑えるための道路整備計画法を立案している。

これらの研究は、道路構造物の耐震化に着目した優れた研究として興味深いのが、個々の沿

道建築物を分析対象とした議論は行なっていない。これに対して、中里ら²²⁾は、緊急輸送道路沿道建築物に着目し、実地調査から得られた各建物の実構造や前面道路の幅員、周辺状況などをハザードマップと重ね合わせることで、耐震化優先度の高いエリアと建物について検討している。ただし、定性的な評価に留まっており、沿道建築物の耐震化が緊急輸送道路のアクセシビリティに及ぼす影響の定量的評価には至っていない。

また、建物の耐震化以外の市街地整備事業による減災効果を評価する研究も、多く行われている(例えば^{23),24)}。例えば、沖ら²³⁾は、大地震発生後の多様な人的活動を記述可能なシミュレーションモデルを構築し、複数の市街地整備事業による物的被害および人的被害の軽減効果を定量的に評価している。しかし、計算負荷が高い詳細なシミュレーションを、広域な対象地域において実行することは困難である。そのため、広域な対象地域における減災効果の評価には不向きである。また、久貝ら²⁴⁾は、道路網の防災機能を向上させる上で重要な市街地性状を理解するため、パーコレーション理論と重回帰分析に基づき、被災リスクと市街地性状(旧耐震建物率など)の関連を分析する手法を提案している。しかし、道路網の防災機能と市街地性状の関連についての概観が明らかになったものの、実市街地における評価は行っておらず、課題が残る。

2. 本研究の目的

大地震時における、道路網の交通機能を確保することは、円滑な災害時活動の実現、ひいては、人的被害の軽減にもつながる。しかし、前節で概観した通り、大地震時におけるアクセシビリティ評価およびアクセシビリティの改善方策に関する研究は多く存在するものの、実市街地における道路網の交通機能評価、および、市街地整備事業に関する検討に適用する上では、課題が残る。大地震時における道路網の交通機能を評価する上で重要な視点を以下に整理する。

I. アクセシビリティ評価指標

「大地震発生時におけるアクセシビリティ」という包括的な概念を、どのような視点から定量的に評価すべきかが問われるが、本研究では、広域的な移動に伴う拠点施設までの到達可能性と、移動時における効率性（到達までの移動時間）の視点から検討する。

II. 道路の交通機能を考慮したアクセシビリティ評価

前述したように、道路によって求められる交通機能は異なる。例えば、大地震時の緊急活動における長距離移動に用いられる緊急輸送道路では、緊急車両のトラフィック機能を確保する必要がある。一方、拠点施設へのラストワンマイル（交通結節点^{注3}から目的地点までの人や物の移動）では、救急隊員による歩行活動が可能であれば、そのアクセス機能は確保されていると考えられる。すなわち、道路の担う交通機能ごとに、どのような緊急活動が行われるかを考慮したアクセシビリティ評価を行う必要がある。

III. 市街地整備事業によるアクセシビリティ改善効果の把握

前述したように、地方自治体は、防災・減災を目的に、道路の交通機能に応じた市街地整備事業を推進している。このように、道路の機能分類ごとに、市街地整備事業によるアクセシビリティ改善効果について議論する必要がある。

以上の視点を踏まえ、本研究は、道路の交通機能に着目し、大地震時における拠点施設へのアクセシビリティ、および、市街地整備事業がアクセシビリティに及ぼす影響を定量的に評価する手法を確立することを目的とする。

^{注3} 人や物の輸送において、複数あるいは異種の交通手段の接続が行われる場所、複数の交通モード間の不連続点²⁵⁾。

3. 本研究の構成

本研究では、道路の交通機能に着目し、大地震時における拠点施設へのアクセシビリティおよび市街地整備事業がアクセシビリティに及ぼす影響を、定量的に評価する(図 1.3-1)。なお、交通機能に基づいて道路を分類する際、平常時の移動を想定した機能分類(主要幹線, 幹線, 補助幹線, 区画道路)ではなく、災害時の移動を想定した機能分類(緊急輸送道路(特定緊急輸送道路, 一般緊急輸送道路), その他の道路)に基づいて、議論を進める。

第二章では、大地震時の建物倒壊に起因する道路閉塞下における、緊急車両の都市内移動を記述するシミュレーションモデルを構築する。具体的には、建物倒壊を記述する「建物倒壊シミュレーションモデル」、建物倒壊に起因する道路閉塞を記述する「道路閉塞シミュレーションモデル」、および、緊急車両の空間移動を記述する「緊急車両移動モデル」を構築し、これらを組み合わせることで、緊急車両の拠点施設への空間移動を記述する。

第三章では、特定緊急輸送道路を用いた拠点施設へのアクセシビリティと特定沿道建築物の耐震化推進の程度との関係について分析する。これにより、特定沿道建築物の耐震化推進に関する検討を行う上で、アクセシビリティに基づいた議論を行うことの有用性を示す。まず、緊急活動シミュレーションモデルを用いて、特定緊急輸送道路を用いた、東京都隣接県から東京都が指定する大規模救出救助活動拠点へのアクセシビリティ評価を行う。次に、特定沿道建築物の耐震化推進によるアクセシビリティの改善効果を定量的に評価する。

第四章では、大地震時において拠点施設へのアクセシビリティが脆弱となる沿道区域を抽出する方法、および、それらの沿道区域におけるアクセシビリティを改善するための方策について検討する。これにより、耐震化率からは明確に把握することは困難であった、拠点施設へのアクセシビリティが脆弱となる沿道区域を把握することが可能となり、ひいては、整備施策に関する具体的な議論が可能となることを示す。まず、大地震時の物的被害下において、道路網から孤立する道路に着目することで、拠点施設へのアクセシビリティが脆弱な沿道区域を抽出する方法を提案する。次に、緊急活動シミュレーションモデルを実行し、東京都内の緊急輸送道路を用いた災害拠点病院へのアクセシビリティ評価を行う。

第五章では、大地震発生時における緊急輸送道路以外の道路(その他の道路)を用いたアクセシビリティ評価、および、市街地性状との関連分析を行う。これにより、各地方公共団体が入手可能な GIS データを用いて、アクセシビリティを簡易的に推定可能な手法を提案する。まず、緊急活動時の移動経路を評価するアクセシビリティ指標を提案する。次に、東京都全域を対象に、緊急活動シミュレーションモデルを実行し、アクセシビリティ指標を推定する。さらに、重回帰分析を用いて、アクセシビリティ指標と市街地性状との関連を明らかにするとともに、アクセシビリティを効果的に改善するための手法について、定量的に検討する。

第六章では、本研究の成果を総括するとともに、今後の課題と展開について整理する。

第一章 序論

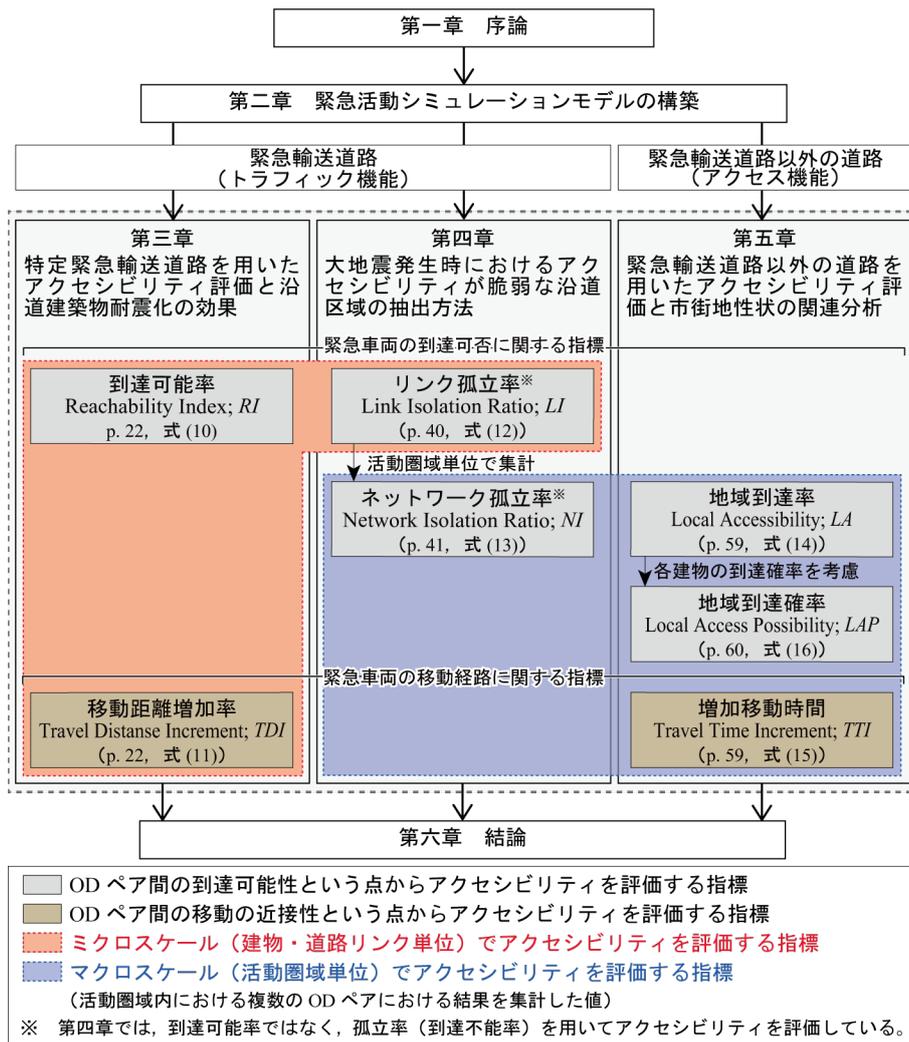


図 1.3-1 本研究の全体像

第二章

緊急活動シミュレーションモデルの構築

1. 緊急活動シミュレーションモデルの概要

本研究では、大地震時の建物倒壊に起因する道路閉塞を考慮した、緊急車両の拠点施設への空間移動を記述するシミュレーションモデルを構築する（図 2.1-1）。

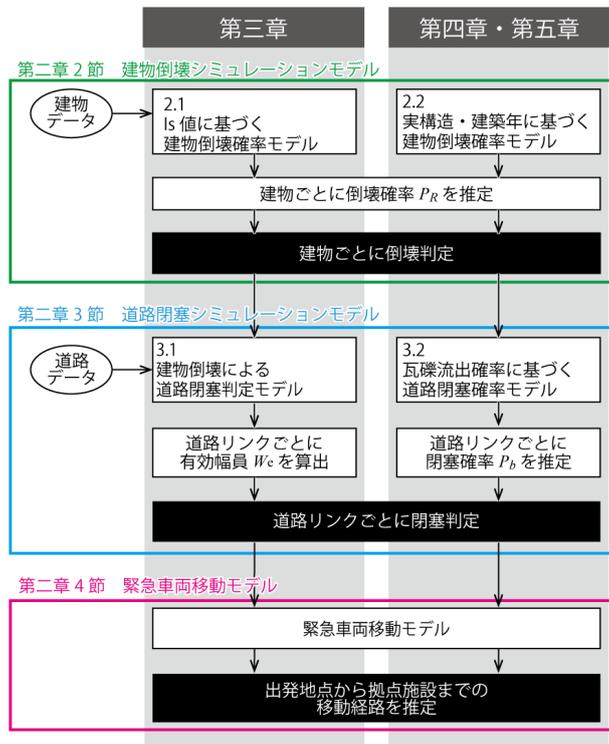


図 2.1-1 緊急活動シミュレーションモデルの概要

本シミュレーションモデルは、以下に示す3つのモデルから構成される。

(a) 建物倒壊シミュレーションモデル（p. 12～15, 2節）

建物倒壊シミュレーションモデルでは、『Is値に基づく建物倒壊確率モデル²⁶⁾』および『実構造・建築年に基づく建物倒壊確率モデル²⁷⁾』を用いて、建物倒壊を記述する。いずれも、兵庫県南部地震の実被害データに基づいて構築されたモデルである。Is値に基づく建物倒壊確率モデルでは、構造耐震指標（Is値）を用いて、実構造・建築年に基づく建物倒壊確率モデルでは、実構造および建築年を用いて、建物ごとの倒壊確率を推定する。また、地震動の周期によって、建物の倒壊確率は異なる（例えば、短周期地震動では、低層建物および中層建物が倒れやすく、長周期地震動では、高層建物が倒れやすい）。

なお、建物倒壊や道路閉塞の推定に利用可能なシミュレーションモデルは少なく、物的被害に関係するすべての要因を考慮可能な理論モデルは存在しない。例えば、本研究で用いる建物倒壊確率モデルは、比較的短周期な地震動であった、兵庫県南部地震の実被害データに基づいて構築されているため、地震波による建物の倒壊確率の違いを考慮する事ができない（長周期地震動の場合には、低層・中層の建物は、安全側、高層建物は、危険側の評価となる）。物理的な知見を反映した、より精緻な物的被害モデルの開発が期待される。

(b) 道路閉塞シミュレーションモデル (p. 16~17, 3 節)

道路閉塞シミュレーションモデルは、『建物倒壊による道路閉塞判定モデル』および『瓦礫流出確率に基づく道路閉塞確率モデル²⁸⁾』を用いて、建物倒壊に起因する道路閉塞を記述する。建物倒壊による道路閉塞判定モデルでは、建物が道路側に完全に倒壊することによって、瓦礫流出確率に基づく道路閉塞確率モデルでは、倒壊建物の瓦礫が道路に流出することによって、道路閉塞が発生する確率を推定する (図 2.1-2, 図 2.1-3)。



図 2.1-2

建物倒壊による道路閉塞判定モデル
で想定する道路閉塞の例
(写真提供：墨田区)



図 2.1-3

瓦礫流出確率に基づく道路閉塞確率モデル
で想定する道路閉塞の例
(写真提供：防災システム研究所)

(c) 緊急車両移動モデル (p. 18~19, 4 節)

緊急車両移動モデルは、緊急車両の空間移動を記述する。本モデルでは、消防活動や救急活動などの緊急活動を想定し、出発地点から目的地点 (拠点施設) までの緊急車両の移動をモデル化する。

以上のように、建物倒壊シミュレーションモデルおよび道路閉塞シミュレーションモデルについては、複数のモデルが提案されている。第三章から第五章では、各章で使用可能な GIS データに適したモデルを選択した上で、緊急活動シミュレーションモデルを実行する。いずれの章でも、建物倒壊および道路閉塞を推定する上で、複数のモデルを用いることはないので、これらのモデルの違いが、シミュレーション結果に影響を与えることはないと考えられる。

なお、本シミュレーションモデルを、各地方自治体における防災まちづくりなどの企画・立案の現場に適用するためには、それぞれの評価対象に応じた、適切なシナリオを設定する必要がある。例えば、シミュレーションを実行する上で、どのような地震 (首都直下地震や南海トラフ地震など) を想定するか、また、緊急車両や救急隊員が道路リンクを通行するために必要な有効幅員などを、どのように設定すべきかなどについては、議論が必要である。

本シミュレーションモデルでは、シミュレーション開始時に、各建物・道路リンクに、作成する物的被害ケース数の乱数を割り振っている (表 2.1-4)。例えば、シミュレーションの試行回数が K 回の場合、まず建物 A に K 個の乱数を与え、以降の建物についても、同様に乱数を割り振っていく。そのため、物的被害ケース数が、乱数シークエンスの長さと同じでなければ、建物・道路リンクごとに偏った乱数が与えられることはない。今回、擬似乱数列生成器として用いたメルセンヌ・ツイスタ²⁹⁾は、 $2^{19,937}-1$ という長い周期が証明されている

第二章 緊急活動シミュレーションモデルの構築

ため、乱数生成器の初期化は行っていない。なお、本研究では、緊急活動シミュレーション実行時の計算負荷を考慮し、計算対象となる OD ペア数が比較的少ない第三章では、計 1,000 ケース、OD ペア数が比較的多い第四章および第五章では、計 100 ケースの物的被害ケースを作成した。

表 2.1-4 乱数生成の一例
(x_N は、 N 番目に生成された乱数を表す。)

建物 ID	物的被害ケース No.					
	1	2	3	4	5	K
1	$x_1,$	$x_2,$	$x_3,$	$x_4,$	$x_5,$..., x_K
2	$x_{K+1},$	$x_{K+2},$	$x_{K+3},$	$x_{K+4},$	$x_{K+5},$..., x_{2K}
3	$x_{2K+1},$	$x_{2K+2},$	$x_{2K+3},$	$x_{2K+4},$	$x_{2K+5},$..., x_{3K}

2. 建物倒壊シミュレーションモデル

2.1 Is 値に基づく建物倒壊確率モデル

建築物の耐震性能を評価する場合、鉄筋コンクリート造（RC造）、鉄骨造（S造）および鉄骨鉄筋コンクリート造（SRC造）については、構造耐震指標（Is値）が、木造建物については、構造耐震指標（Iw値）が用いられる。Is値は、建物の形状・バランス、経年劣化、また、地震力に対する強度・靱性を考慮し、当該建物各階のX・Y両方向について算出される値である。一般に、Is値が0.6以上の建物は、十分な耐震性能を備えていると言われている³⁰⁾。

兵庫県南部地震(1995年)の実被害データに基づくRC造建物の被害率曲線²⁶⁾を用いて、各建物のIs値からそれぞれ被災ランクRにおける倒壊確率 P_R を推定し（式(1)～(3)、図2.2.1-1）、一様乱数をもとに倒壊有無を判定する。なお、被災度の定義は、構造的被災度を表す文献³¹⁾に準ずる（表2.2.1-2）。

$$P_R(i) = \Phi\left(\frac{\ln(PGV(i)) - \lambda_f(Is(i))}{\zeta_f(Is(i))}\right) \quad (1)$$

$$\lambda_f(i) = \ln\left(PGV_0 \cdot \frac{Is(i)}{Is_1}\right) \quad (2)$$

$$\zeta_f(i) = \zeta_{f0} \quad (3)$$

ここで、 Φ は、標準正規分布の累積確率分布関数、 λ および ζ は、 $\ln(V)$ の平均値と標準偏差である。 $PGV(i)$ は建物*i*の地表面での最大速度（cm/s）、 $Is(i)$ は建物*i*のIs値である。 Is_1 、 ζ_{f0} 、および、 PGV_0 は、実際の被害率曲線に適合する様に決められたパラメータであり、 $Is_1=0.4$ 、 $\zeta_{f0}=0.6$ 、 $PGV_0=250\text{cm/s}$ （倒壊）、 200cm/s （大破）、 150cm/s （中破）、 100cm/s （小破）、 50cm/s （軽微）とされている。

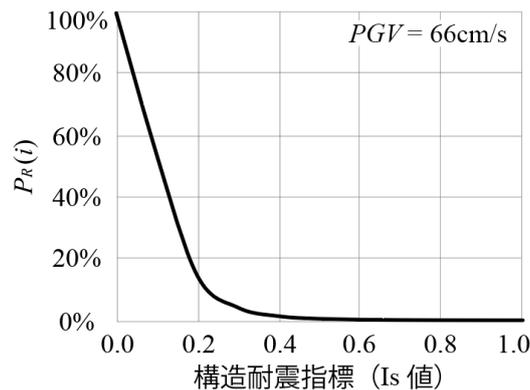


図 2.2.1-1 Is 値と建物倒壊確率の関係（被災度：倒壊）

表 2.2.1-2 Is 値に基づく建物倒壊確率モデルにおける被災ランクの分類³¹⁾

ランク	被害状況
被害軽微 (I)	柱・耐力壁・二次壁の損傷が軽微かもしくはほとんど損傷のないもの
小破 (II)	柱・耐力壁の損傷は、軽微であるが、RC 二次壁・階段室の周りに、せん断ひび割れが見られるもの。
中破 (III)	柱に典型的なせん断ひび割れ・曲げひび割れ、耐力壁にひび割れが見られ、RC 二次壁・非構造体に大きな損傷が見られるもの。
大破 (IV)	柱のせん断ひび割れ・曲げひび割れによって鉄筋が座屈し、耐力壁に大きなせん断ひび割れが生じて耐力に著しい低下が見られるもの。
崩壊 (V)	柱・耐力壁が大破壊し、建物全体又は建物の一部が崩壊に至ったもの。

2.2 実構造・建築年に基づく建物倒壊確率モデル

実構造・建築年に基づく建物倒壊確率モデルでは、兵庫県南部地震(1995年)の実被害データに基づく建物被害関数²⁷⁾を用いて、建物*i*に地表面最大速度*PGV*の揺れが生じた際、被災ランク*R*以上の被害が発生する確率 $P_R(PGV)$ を推定する(式(4)、図2.2.2-1)。

$$P_R(i) = \Phi[(\ln PGV(i) - \lambda)/\xi] \quad (4)$$

ここで、 $PGV(i)$ は、建物*i*の地表面最大速度、 Φ は、標準正規分布の累積確率分布関数、 λ および ξ は、回帰係数であり、実構造(木造・RC造・S造・軽量S造)、建築年代(木造5区分、その他の構造は3区分)、被災ランク(全壊・半壊)ごとに与えられる³²⁾(表2.2.2-2)。なお、本モデルでは、神戸市が実施した調査の判定基準に基づいて定義された被災ランク(全壊・半壊)を用いている(表2.2.2-3)³³⁾。

その上で、建物ごとに推定した倒壊確率 $P_R(i)$ と一様乱数を比較することで、倒壊有無を判定する。

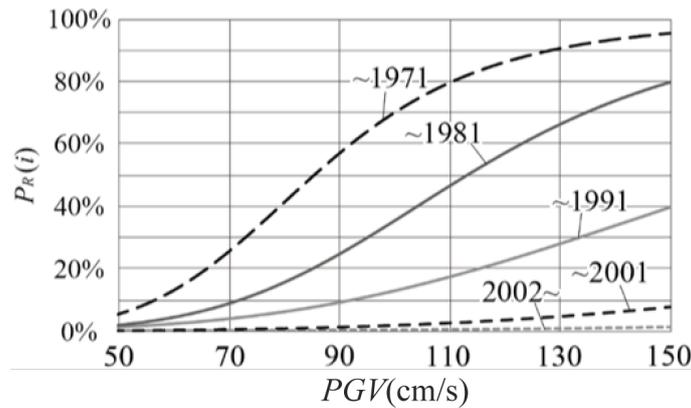


図 2.2.2-1 木造建物の倒壊確率 (被災ランク：全壊)

表 2.2.2-2 建物倒壊確率の回帰係数 (被災ランク：全壊)³²⁾

		全壊	
		λ	ξ
木造	1111~1971	4.45	0.342
	1972~1981	4.73	0.378
	1982~1991	5.12	0.496
	1992~2001	5.68	0.496
	2002~	6.13	0.496
RC造	1111~1971	5.12	0.646
	1972~1981	5.33	0.575
	1982~	6.00	0.789
鉄骨造	1111~1971	4.64	0.619
	1972~1981	4.97	0.490
	1982~	5.64	0.731

表 2.2.2-3 実構造・建築年に基づく建物倒壊確率モデルにおける被災ランクの定義³³⁾

ランク	被害状況
① 全壊	<p>住家が滅失したもので、具体的には、以下に示すいずれかの条件を満たす住家を指す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 住家の損壊消失もしくは流出した部分の床面積がその住家延べ面積の70%以上に達した程度のもの ・ 住家の主要構造部の損害額がその住家の延べ床面積の70%以上に達した程度のもの ・ 住家の主要構造部の被害額がその住家の時価の50%程度に達した程度のもの
② 半壊	<p>住家の損傷が甚だしいが、補修すれば元どおりに再利用できる程度のもので、具体的には、以下に示すいずれかの条件を満たす住家を指す。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 損壊部分が、その住家の延べ床面積の20%以上70%未満のもの ・ 住家の主要構造部の被害額がその住家の時価の20%以上50%未満のもの
③ 一部破損	全壊及び半壊に至らないもので、補修を要する程度のもの

3. 道路閉塞シミュレーションモデル

3.1 建物倒壊による道路閉塞判定モデル

沿道建築物の倒壊状況をもとに、倒壊建物前面の道路リンク^{注4}の有効幅員 $W_e(j)$ を算出する（式(5)，図 2.3.1-1）。算出した有効幅員 $W_e(j)$ をもとに、緊急車両の通行可否を判定する。

$$W_e(j) = sb(i, j) + w(j) - h(i) \quad (5)$$

ここで、 $sb(i, j)$ は建物 i の前面道路リンク j の道路境界線からのセットバック距離（m）， $w(j)$ は道路リンク j の道路幅員（m）， $h(i)$ は建物 i の建物高さ（m）である。

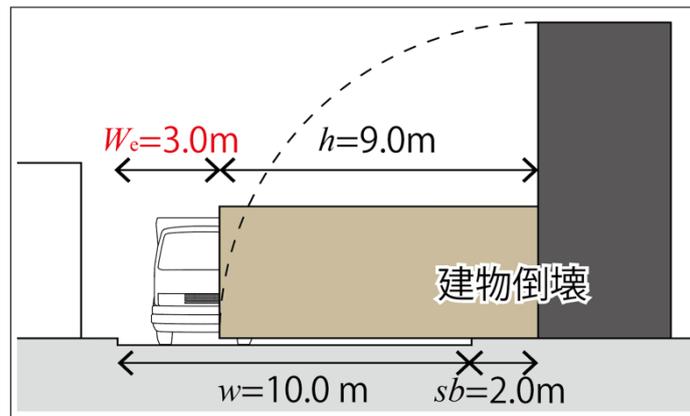


図 2.3.1-1 建物倒壊を考慮した有効幅員 $W_e(j)$ の推定の一例

このとき、中央分離帯が設置されている道路リンクでは、緊急車両は交差点でのみ反対車線に移動して通行（逆走）できるものとする（図 2.3.1-2）。

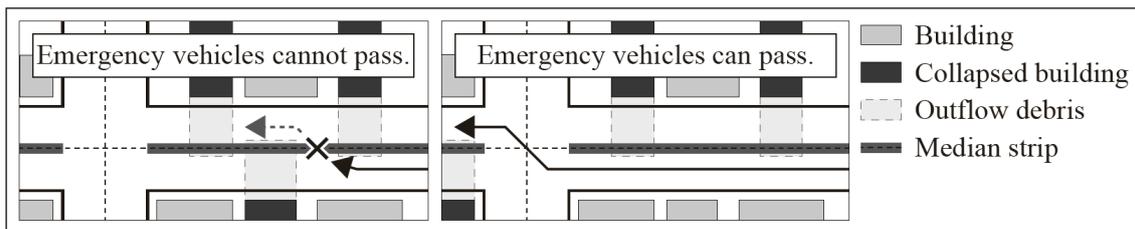


図 2.3.1-2 緊急車両の移動における中央分離帯の考慮

^{注4} 本研究では、交差点間を繋ぐ道路を 1 本の道路リンクと定義する。

3.2 瓦礫流出確率に基づく道路閉塞確率モデル

さらに、国土交通省の提案する瓦礫流出確率モデル²⁸⁾を用いて、道路リンク j の閉塞状況を推定する。全壊した沿道建築物による瓦礫の飛散状況から、各道路リンクの閉塞確率 P_b を推定する(式(6), 式(7))。

$$f_i(j) = Dc(i)(1.1753 \cdot Sc(i) - 0.0514) \cdot \exp\left(\frac{-W_e(j)}{2.58Cr(i)^{0.379} + 0.210Fl(i)^{2.23} + 4.90Sc(i)^{12}}\right) \quad (6)$$

$$P_b(j) = 1 - \prod_{i \in G(j)} (1 - f_i(j)) \quad (7)$$

ここで、 $f_i(j)$ は、倒壊建物 i の前面道路 j が通行可能である確率であり、 $Dc(i)$ は、建物 i の倒壊の有無を表すダミー変数(全壊:1, 非全壊:0)、 $Sc(i)$ は、建物 i の建蔽率、 $W_e(j)$ は、道路リンク j の有効幅員、 $Cr(i)$ は、所属する地区内の平均倒壊割合、 $Fl(i)$ は、建物 i の階数、 $G(j)$ は、道路リンク j の沿道建築物集合である。

その上で、道路リンクごとに推定した閉塞確率 $P_b(j)$ と一様乱数を比較することで、閉塞有無を判定する(図2.3.2-1)。

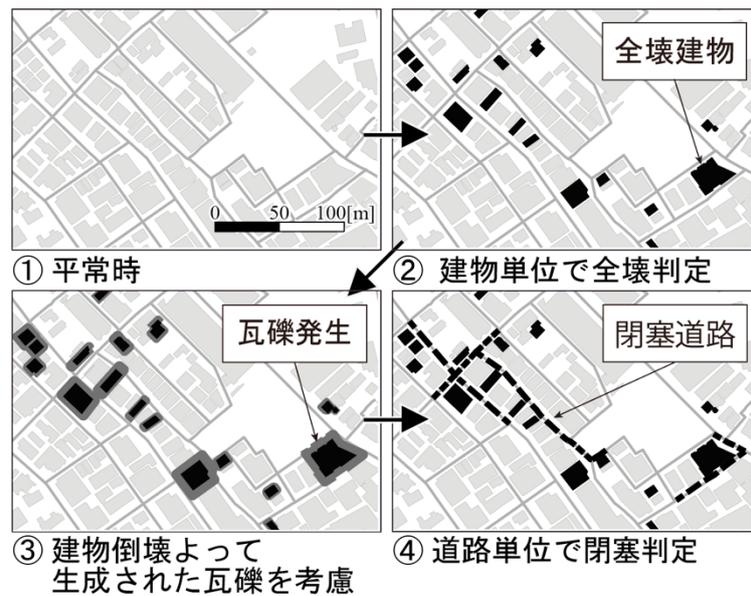


図 2.3.2-1 道路閉塞の推定手順

4. 緊急車両移動モデル

本節では、消防活動や救急活動などの緊急活動を想定し、出発地点から目的地点（拠点施設）までの緊急車両の移動をモデル化する。具体的には、道路リンクの閉塞状況を考慮した上で、グラフ探索アルゴリズムを用いて、緊急車両の拠点施設への到達可否および移動経路を推定する。災害時活動を円滑に行う上で、正確かつ迅速に道路リンクの閉塞箇所を把握することは極めて重要である^{34), 35)}。ただし、本研究では、建物と道路リンクの関係に焦点を当てて議論することとし、道路リンクの閉塞箇所は、すべて把握していると想定する。つまり、本モデルでは、想定外の閉塞道路に遭遇した緊急車両の迂回行動は記述しないため、所要移動時間および所要移動距離が短く（危険側）に推定される傾向がある。しかし、本研究では、それらの値ではなく、拠点や沿道区域間の相対的な関係に着目して分析を進めるため、分析結果に影響はないと考える。

- **車両活動のみを想定する場合**（第三章および第四章）

災害時における出発地点 o から目的地点 d までの所要移動時間 $T'(o, d)$ が最小となる経路を、Dijkstra 法³⁶⁾を用いて推定する（式(8)）。なお、目的地点へ到達可能な経路が存在しない場合には、到達不能であるとする。

$$T'(o, i) = {}_a t'(o, d) \quad (8)$$

ここで、 ${}_a t'(o, d)$ は、出発地点 o から目的地点 d までの車両活動による最小所要移動時間である。

- **車両活動および歩行活動を想定する場合**（第五章）

救急車や消防車による車両活動だけでなく、救急隊員による歩行活動も想定した出発地点 o から目的地点 d までの移動経路を推定する。緊急活動時において、緊急車両の乗降を頻繁に行うことは考えがたい。そのため、以下に示す条件①、②のいずれかに該当する場合、車両移動から歩行移動への活動種類の変更が、1回のみ可能であると想定する。

- ① 車両による移動のみでは、出発地点 o から目的地点 d へ到達することが困難な場合
- ② 緊急車両のみを用いて移動するよりも、歩行移動をした方が、目的地点 d に早く到達できる場合。

以上を踏まえて、災害時における出発地点 o から目的地点 d までの所要移動時間 $T'(o, d)$ が最小となる経路を、Dijkstra 法³⁶⁾を用いて推定する（式(9)）。なお、目的地点へ到達可能な経路が存在しない場合には、到達不能であるとする。

$$T'(o, i) = {}_a t'(o, n) + {}_b t'(n, d) \quad (9)$$

ここで、 ${}_a t'(o, n)$ は、出発地点 o から交差点 n までの車両活動による最小所要移動時間、 ${}_b t'(n, d)$ は交差点 n から目的地点 d までの歩行活動による最小所要移動時間、交差点 n は地域内の任意の交差点である。この時、各道路リンクの通行速度は、有効幅員および活動の種類（歩行移動か車両移動）に応じて設定する。

また、出発地点から目的地点までの所要移動時間などの情報は扱わず、到達可否に関する情報のみを取得する場合、Dijkstra法に変わって、グラフ探索アルゴリズムの1つである幅優先探索³⁷⁾を用いることで、計算負荷を大幅に軽減することが可能となる(表2.4-1)。なお、本論文では、第三章・第四章では、移動経路の情報が必要なため、Dijkstra法を、移動経路の情報が必要ではない第四章では、幅優先探索を用いる。

表 2.4-1 Dijkstra法および幅優先探索の概要

Dijkstra法 ³⁶⁾	幅優先探索 ³⁷⁾
<p>■ 概要 グラフ内の任意のノードから他のノードへの最短移動コストおよび最短移動経路を算出可能なグラフ探索アルゴリズム。</p> <p>■ 利点 到達可否だけでなく、移動経路および所要移動時間が推定可能である。</p> <p>■ 欠点 幅優先探索に比べ、計算負荷が高い。</p>	<p>■ 概要 グラフ内の任意のノードから他のノードへの移動可否を判定可能なグラフ探索アルゴリズム。</p> <p>■ 利点 Dijkstra法に比べ、計算負荷が低い。</p> <p>■ 欠点 移動経路および所要移動時間は推定不能。</p>

5. 第二章のまとめ

本章では、大地震時の建物倒壊に起因する道路閉塞を考慮した、緊急車両による拠点施設への空間移動を記述するシミュレーションモデルを構築した。本モデルは、建物倒壊を記述する「建物倒壊シミュレーションモデル」、建物倒壊に起因する道路閉塞を記述する「道路閉塞シミュレーションモデル」、および、緊急車両の空間移動を記述する「緊急車両移動モデル」から構成される。建物倒壊および道路閉塞を推定するシミュレーションモデルは、複数のモデルが提案されている。そのため、緊急活動シミュレーションモデルを実行する際、使用可能な建物・道路データの有する属性情報に応じて、適切なモデルを選択する必要がある。

建物倒壊シミュレーションモデルでは、兵庫県南部地震の実被害データに基づく建物被害関数（ I_s 値に基づく建物倒壊確率モデル、もしくは、実構造・建築年に基づく建物倒壊モデル）を用いて、各建物の倒壊確率を推定し、一様乱数をもとに倒壊有無を判定した。

道路閉塞シミュレーションモデルでは、沿道建築物の倒壊状況をもとに、各道路リンクの通行可否を推定した。「建物倒壊による道路閉塞判定モデル」では、倒壊建物前面の道路リンクの有効幅員を算出し、各道路リンクの閉塞有無（緊急車両の通行可否）を判定した。「瓦礫流出確率に基づく道路閉塞確率モデル」では、倒壊した沿道建築物による瓦礫の飛散状況から、各道路リンクの閉塞確率を推定し、一様乱数をもとに閉塞有無を判定した。

緊急車両移動モデルでは、消防活動や救急活動などの緊急活動を想定し、出発地点から目的地点（拠点施設）までの緊急車両の移動をモデル化した。具体的には、道路リンクの閉塞状況を考慮した上で、グラフ探索アルゴリズムを用いて、出発地点から目的地点までの到達可否および移動経路を推定した。

第三章

特定緊急輸送道路を用いたアクセシビリティ評価と沿道建築物耐震化の効果

1. 隣接県からの物資輸送などを想定したアクセシビリティ評価方法

本章では、特定緊急輸送道路を用いた拠点施設へのアクセシビリティと特定沿道建築物の耐震化推進の程度との関係について分析する。まず、第二章で構築した緊急活動シミュレーションモデルを用いて、大地震発生時における、特定緊急輸送道路を用いた、東京都隣接県から東京都が指定する大規模救出救助活動拠点への到達可否および移動経路を推定する。次に、拠点施設までの到達可能性と移動時における効率性の視点から、アクセシビリティ評価を行う。さらに、沿道建築物の耐震化推進によるアクセシビリティの改善効果を定量的に評価する。

本章では、拠点施設へのアクセシビリティを、到達可能率 (Reachability Index ; RI , 式(10)) と移動距離増加率 (Travel Distance Increment ; TDI , 式(11)) という2つの指標を用いて評価する。到達可能率は、「進入地点から目的地点 (拠点施設) まで到達可能である割合」、移動距離増加率は、「平常時と比較した際の、進入地点から目的地点までの移動距離の増加率」と定義する。本章では、緊急車両が主要道路を優先的に利用するように、道路種別ごとの通行速度を設定し、移動経路を推定した。しかし、これらの値は、実際の通行速度に則して設定されていない。そのため、移動の効率性を評価する上では、直感的に理解が容易な、移動距離の視点から評価を行った。

$$RI(o, d) = \frac{\sum_{k \in K} \delta(k, o, d)}{K} \quad (10)$$

$$TDI(o, d) = \frac{\sum_{k \in K} D'(k, o, d)/D(k, o, d)}{K} \quad (11)$$

ここで、 K は、シミュレーションの試行回数、 $\delta(k, o, d)$ は、 k 回目の試行における出発地点 o から目的地点 d への到達可否を表すダミー変数 (1:到達可能, 0:到達不能)、 $D(k, o, d)$ は、 k 回目の試行における平常時の出発地点 o から目的地点 d への所要移動距離 (km)、 $D'(k, o, d)$ は、 k 回目の試行における災害時の出発地点 o から目的地点 d への所要移動距離 (km) である。

2. 使用データおよびシミュレーションの設定条件

2.1 使用データ

本章では、特定緊急輸送道路を用いた拠点施設へのアクセシビリティ評価を目的とするため、特定緊急輸送道路の沿道建築物（以下、特定沿道建築物）を対象にシミュレーションを実行する。

(a) 建物データ

第一章で述べたように、東京都では、図 3.2.1-1(a)に示した条件に一致する建物を、特定緊急輸送道路を閉塞させる危険性の高い建物とみなし、特定沿道建築物として指定している。さらに、それらの所有者・管理者に対して、耐震診断または耐震改修の実施状況などについての報告を義務付けている⁵⁾。そのため、平成 27 年 9 月時点では、特定沿道建築物（4,845 棟）のうち、約 93%の建物（4,506 棟）について耐震診断が実施され、詳細な属性情報（建物高さ、建築年月日、セットバック距離、前面道路幅員、対建物^{注5}、耐震状況、Is 値）が得られている^{注6, 38)}。

建物がどのように全壊するかは、破壊箇所が大きく依存する。一般に、耐震診断結果一覧表には、当該建物の各階・各方向（X・Y 方向）ごとに得られた Is 値が記載される。しかし、本データでは、各建築物に 1 つの Is 値しか得られていない。そこで、最も安全側の評価を行うため、各建物は、この Is 値に従って、1 階部分で破壊が発生し、道路に向かって全壊すると仮定した（図 3.2.1-2）。また、一部の特定沿道建築物および一般緊急輸送道路の沿道建築物（以下、一般沿道建築物）については、Is 値が得られていない。さらに、木造建物については、調査時に Is 値ではなく、Iw 値が得られているはずだが、本データでは欠損値として扱われている。これらの建物の Is 値は、特定沿道建築物の Is 値の平均値（Is 値は一律 0.27、全壊確率は一律 5.6%）に等しいと仮定した。

上記のデータのうち、Is 値が 0.6 未満の建物（以下、耐震化促進対象建築物、3,582 棟）を対象に倒壊判定を実施し、シミュレーションを実施する（図 3.2.1-1(b)）。

^{注5} 道路を挟んで向かいあって建っており、同時に全壊することで道路閉塞につながる対となる建築物。

^{注6} 令和元年 6 月時点では、特定緊急輸送道路沿道の耐震診断を義務化した旧耐震建築物（4,838 棟）のうち、97.7%について耐震診断が実施されている。

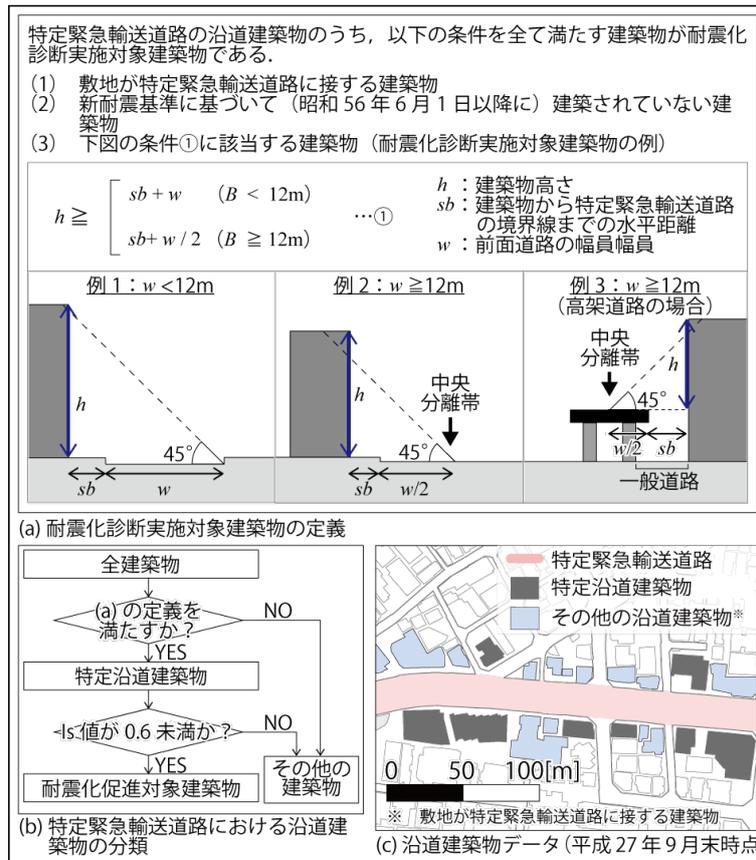


図 3.2.1-1 耐震化推進対象建築物データの概要

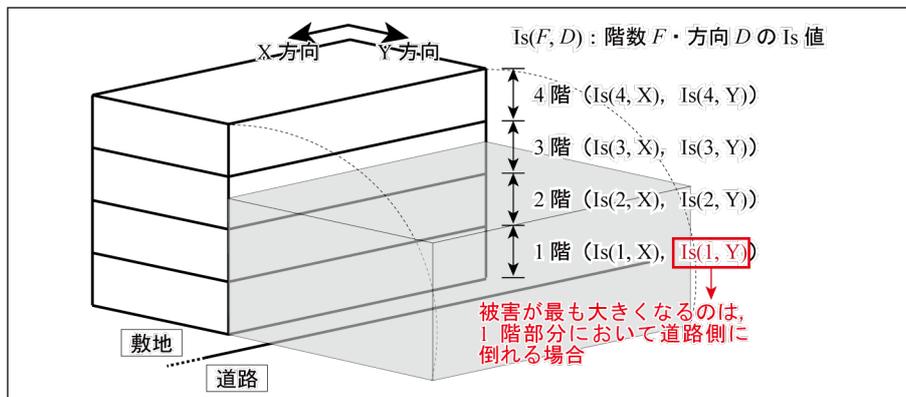


図 3.2.1-2 耐震化推進対象建築物データの概要

(b) 道路データ

緊急輸送道路については、国土交通省が公開している道路ネットワークデータ³⁹⁾をベースとして、不足する道路リンクデータを補完することで、道路データを作成した(図3.2.1-3)。本章では、緊急輸送道路を、①特定緊急輸送道路(高速道路)、②特定緊急輸送道路(高速以外)、③一般緊急輸送道路の3種類に分類した。そのうえで、緊急車両が特定緊急輸送道路を優先的に利用するように、実際の速度規定に関係なく、道路種別(①~③)ごとに各道路リンクの通行速度を設定した(表3.2.1-4)。特定緊急輸送道路(高速道路)と特定緊急輸送道路(高速以外)および一般緊急輸送道路は、現況を反映できるように、インターチェンジのみで接続する道路ネットワークとした(図3.2.1-5)。

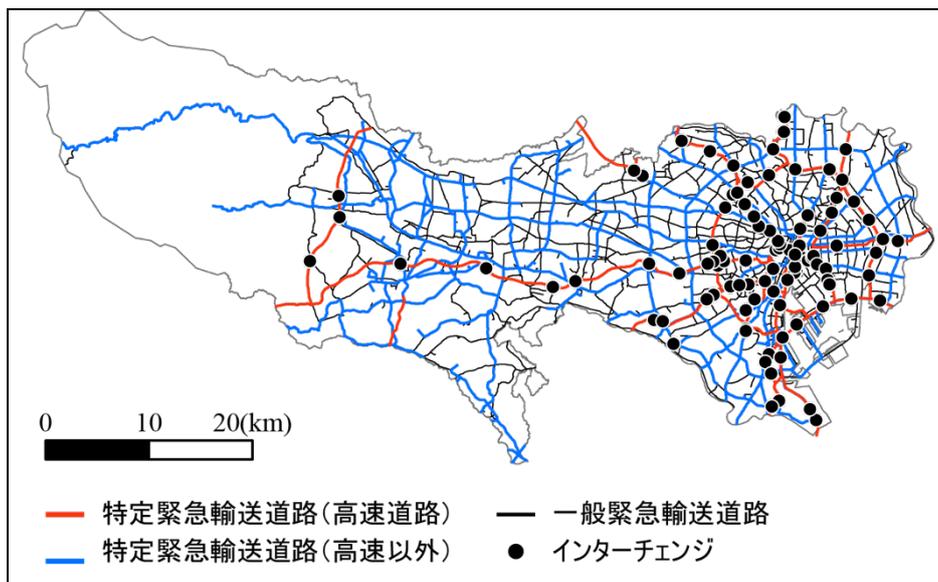


図 3.2.1-3 緊急輸送道路データの概要

表 3.2.1-4 大地震時における道路リンク j の通行速度

道路リンク j の道路種別	車両移動時
① 特定緊急輸送道路(高速道路)	60.0 km/h
② 特定緊急輸送道路(高速以外)	30.0 km/h
③ 一般緊急輸送道路	10.0 km/h

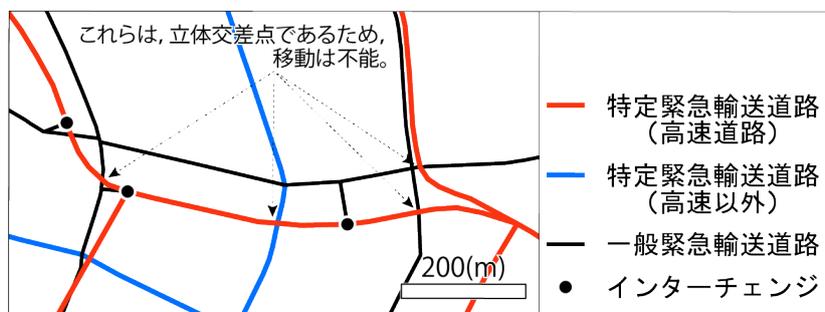


図 3.2.1-5 インターチェンジ付近における接道状況

(c) 拠点施設データ

拠点施設の例として用いる大規模救出救助活動拠点は、大規模災害発生直後、広域支援・救助部隊などが円滑に被災者の救出及び救助などを行えるよう、ベースキャンプとして活用する拠点である。東京都は、平成26年時点で、計59箇所（屋外施設33箇所を含む）の大規模救出救助活動拠点を指定している⁴⁰⁾（図3.2.1-7、表3.2.1-8）。この中で、東白鬚公園と汐入公園は、1つの拠点（白鬚東地区及び汐入公園）として指定されているが、本章では、別々の拠点として扱い（図3.2.1-6）、計58箇所の大規模救出救助活動拠点についてアクセシビリティ評価を行う。

本章では特定緊急輸送道路における沿道建築物の耐震化に焦点を当てて検討するため、特定緊急輸送道路と大規模救出救助活動拠点との接続箇所についての考察（進入の可能性）については吟味していない。最寄りの特定緊急輸送道路から進入が可能であると仮定して、特定緊急輸送道路上に目的地点を設定した。

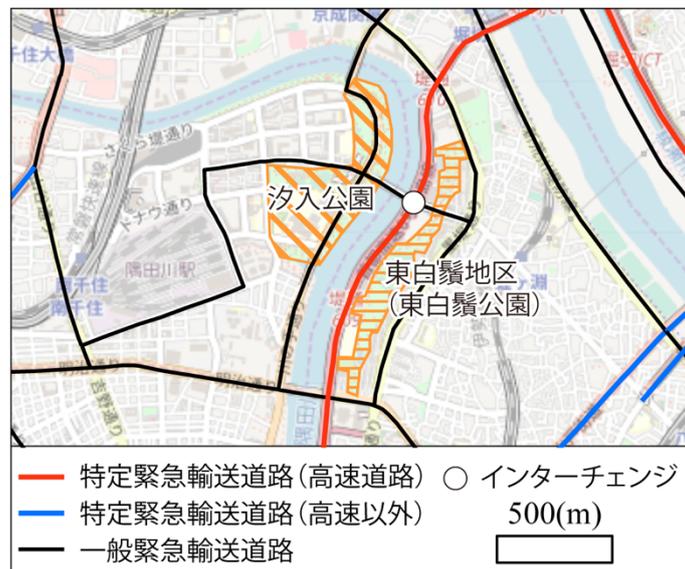


図 3.2.1-6 東白鬚公園および汐入公園周辺の空間分布*

*東京都地域防災計画⁴⁰⁾では、東白鬚公園と汐入公園を1つの拠点（白鬚東地区及び汐入公園）として指定しているが、本章では、独立した拠点として扱う。

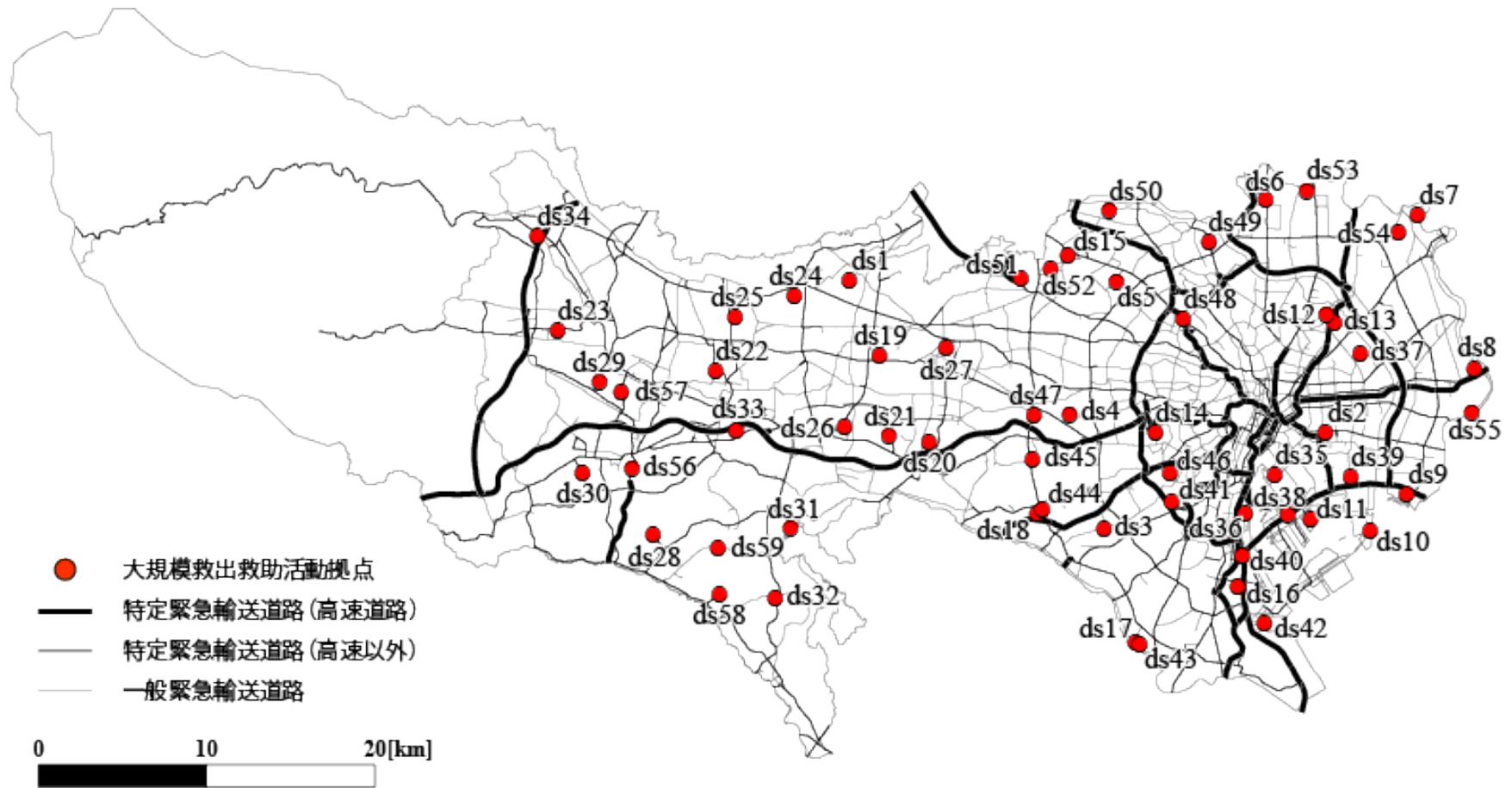


図 3.2.1-7 大規模救出救助活動拠点の空間分布
 (図中●のラベルは、大規模救出救助活動拠点の No.を示す (表 3.2.1-8).)

表 3.2.1-8 大規模救出救助活動拠点一覧

No.	拠点名	No.	拠点名
ds1	柳泉園クリーンポート	ds31	多摩市立陸上競技場
ds2	東京都立木場公園	ds32	町田市立野津田公園
ds3	東京都立駒沢オリンピック公園	ds33	日野市多摩川グラウンド
ds4	東京都立和田堀公園	ds34	青梅市市民球技場
ds5	東京都立城北中央公園	ds35	中央清掃工場
ds6	東京都立舎人公園	ds36	港清掃工場
ds7	東京都立水元公園	ds37	墨田清掃工場
ds8	東京都立篠崎公園	ds38	有明清掃工場
ds9	東京都立葛西臨海公園	ds39	新江東清掃工場
ds10	若洲海浜公園	ds40	品川清掃工場
ds11	東京ビッグサイト	ds41	目黒清掃工場
ds12	白鬚東地区及び汐入公園	ds42	大田清掃工場
ds13	白鬚東地区及び汐入公園	ds43	多摩川清掃工場
ds14	東京都立代々木公園	ds44	世田谷清掃工場
ds15	東京都立光が丘公園	ds45	千歳清掃工場
ds16	東京都立大井ふ頭中央海浜公園	ds46	渋谷清掃工場
ds17	ガス橋緑地少年野球場	ds47	杉並清掃工場
ds18	東京都立砧公園	ds48	豊島清掃工場
ds19	東京都立小金井公園	ds49	北清掃工場
ds20	東京都立神代植物公園	ds50	板橋清掃工場
ds21	東京都立武蔵野の森公園	ds51	練馬清掃工場
ds22	東京都立川地域防災センター	ds52	光が丘清掃工場
ds23	東京都立秋留台公園	ds53	足立清掃工場
ds24	東京都立東村山中央公園	ds54	葛飾清掃工場
ds25	東京都立東大和南公園	ds55	江戸川清掃工場
ds26	東京都立府中の森公園	ds56	北野清掃工場
ds27	東京都立武蔵野中央公園	ds57	昭島市清掃センター
ds28	八王子市立上柚木公園	ds58	町田リサイクル文化センター
ds29	八王子市立滝が原運動場	ds59	多摩清掃工場
ds30	八王子市立藤森公園		

2.2 シミュレーションの設定条件

本研究では、具体的な想定地震は設定せず、東京湾北部地震および都心南部直下地震の被害想定結果を参考に、すべての地点において計測震度 6.2 の揺れを想定した。すなわち、震源位置や地盤性状の影響を考慮せず、各拠点施設へのアクセシビリティを相対的に評価することを目的とした。さらに、童ら⁴¹⁾の手法を用いて地表面最大速度 (PGV) に換算した値 (66 cm/s) を、シミュレーションにおける地震強度とした。

Is 値に基づく建物倒壊確率モデル (p. 12, 第二章 2.1 節) を用いて、建築物単位で全壊判定を行った。なお、本研究では、簡単のため、構造種別による被害曲線の違いは考慮せず、すべての建築物は、RC 造建築物の被害曲線に従って倒壊すると仮定した上で、建物ごとの全壊確率を推定した。その上で、すべての道路リンクに中央分離帯が設置されているという仮定の下、建物倒壊による道路閉塞判定モデル (p. 16, 第二章 3.1 節) を用いて、東京都内の緊急輸送道路の閉塞状況を推定した。一般に、道路の有効幅員が 4.0m 以上であれば、緊急車両の通行が可能であると考えられる。しかし、本章では、隣接県からの大規模な移動を想定しているため、より安全側の評価となるように、緊急車両が通行するためには有効幅員は 6.0m 以上必要である (6.0m 未満は道路閉塞) と想定する。

首都直下地震道路啓開計画⁴²⁾を参考に、緊急車両は、計 14 箇所の進入地点から特定緊急輸送道路を用いて東京都内に進入すると想定した (図 3.2.2-1, 表 3.2.2-2)。緊急車両による移動のみを想定し、大規模救出救助活動拠点への到達可否および所要移動距離を推定した (p. 18, 第二章 4 節)。

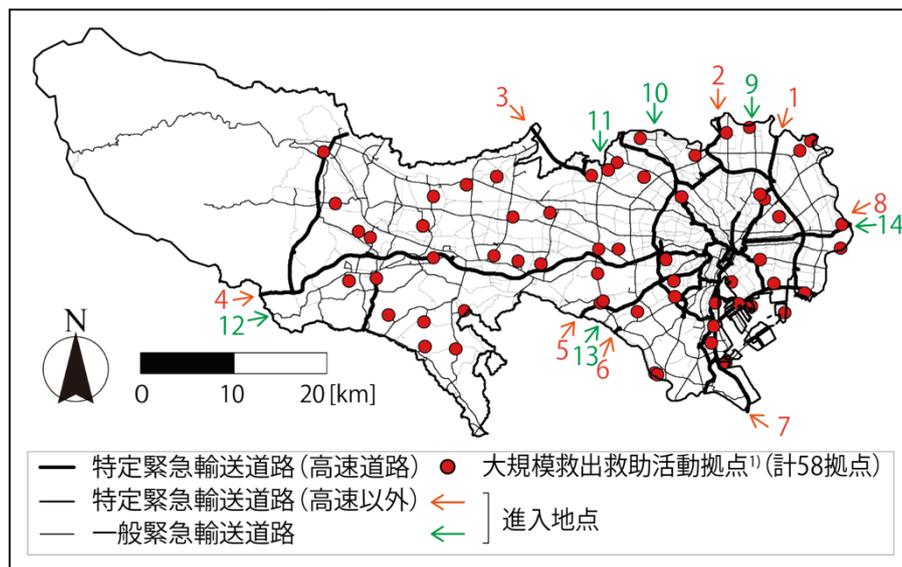


図 3.2.2-1 特定緊急輸送道路上の進入地点の空間分布

表 3.2.2-2 特定緊急輸送道路上の進入地点一覧*
(*首都直下地震道路啓開計画⁴²⁾を参考に設定)

高速道路		高速道路以外	
1	常磐自動車道	9	国道4号(日光街道ほか)
2	東北自動車道	10	国道17号(中山道・白山通りほか)
3	関越自動車道	11	国道20号(甲州街道ほか)
4	中央自動車道	12	国道246号(青山通り・玉川通り)
5	東名高速道路	13	目白通り
6	第三京浜道路	14	千葉県側からの一般道路によるアクセス道路
7	東京湾アクアライン		(国道14号, 東京都内における京葉道路の
8	京葉道路		高速以外部分)

緊急車両は、特定緊急輸送道路(高速道路)を優先的に利用すると考えられる。しかし、大地震発生直後には、高速道路は安全確認を行う必要があり即座には使用できない可能性がある⁴³⁾。そこで、地上レベルでの移動、すなわち、特定緊急輸送道路(高速以外)のみを利用した場合についても検討する。すなわち、本章では、次の2つのケースについて検討する(表3.2.2-3)。

①特定緊急輸送道路(高速道路)から進入する場合

走行可能なすべての特定緊急輸送道路(高速道路, 高速以外)を利用した走行を想定する。例えば、高速道路の閉塞箇所に遭遇した際には、一旦、高速道路から降り、高速以外を走行して閉塞箇所を回避し、再び、高速道路に戻るといった移動も想定する。なお、3.3節では、特定緊急輸送道路だけでなく、一般緊急輸送道路も利用可能であると想定して、シミュレーションを実行する。

②特定緊急輸送道路(高速以外)から進入する場合

大地震発生直後は安全確認のために高速道路は封鎖され、緊急車両といえども通行できない場合も想定される。そこで、特定緊急輸送道路(高速以外)から進入する場合には、特定緊急輸送道路(高速以外)のみを利用した走行を想定する(表3.2.2-3)。なお、3.3節では、特定緊急輸送道路だけでなく、一般緊急輸送道路も利用可能であると想定して、シミュレーションを実行する。

以上の準備の下で、緊急活動シミュレーションを、進入地点と目的地点(大規模救助救出拠点)のすべての組み合わせについて、それぞれ1,000回実行し、アクセシビリティ指標(到達可能率および移動距離増加率)を算出した。本章では、特定沿道建築物の耐震化推進に関する検討を行う上で、アクセシビリティに基づいた議論を行う有用性を示すことを目的とするため、個々の沿道建築物の影響や、個々の拠点施設へのアクセシビリティなど、個別的で局所的な特性ではなく、すべての進入地点からすべての拠点施設へのアクセシビリティの平均値を用いて議論することとする。

表 3.2.2-3 シミュレーション実行時における進入地点および使用道路の想定

	想定する使用道路		
	特定緊急輸送道路 (高速道路)	特定緊急輸送道路 (高速以外)	一般緊急輸送道路
3.2 節 特定緊急輸送道路のアクセシビリティ評価			
① 特定緊急輸送道路 (高速道路) から進入 (進入地点①～⑧)	○ (使用可能)	○ (使用可能)	× (使用不能)
② 特定緊急輸送道路 (高速以外) から進入 (進入地点⑨～⑭)	× (使用不能)	○ (使用可能)	× (使用不能)
3.3 節 一般緊急輸送道路の役割			
① 特定緊急輸送道路 (高速道路) から進入 (進入地点①～⑧)	○ (使用可能)	○ (使用可能)	○ (使用可能)
② 特定緊急輸送道路 (高速以外) から進入 (進入地点⑨～⑭)	× (使用不能)	○ (使用可能)	○ (使用可能)

3. 特定緊急輸送道路のアクセシビリティ評価

3.1 道路閉塞率の空間分布

特定緊急輸送道路および一般緊急輸送道路における道路閉塞率（計 1,000 回のシミュレーションのうち、各道路リンクが閉塞した回数の割合）の空間分布を図 3.3.1-1 および図 3.3.1-2 に示してある。特定緊急輸送道路（高速道路）では、東京都全域において道路閉塞率は高くない（図 3.3.1-1）。一方、特定緊急輸送道路（高速以外）および一般緊急輸送道路では、道路閉塞率に地域的な偏りが見られる（図 3.3.1-2）。杉並区、荒川区、世田谷区の一部では道路閉塞率が 50% を超える道路リンクが存在することが分かる。

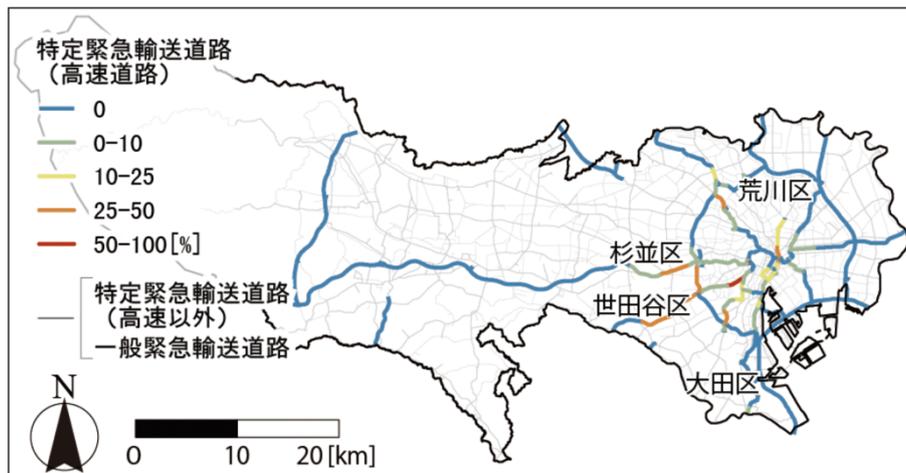


図 3.3.1-1 特定緊急輸送道路（高速道路）における道路閉塞率の空間分布

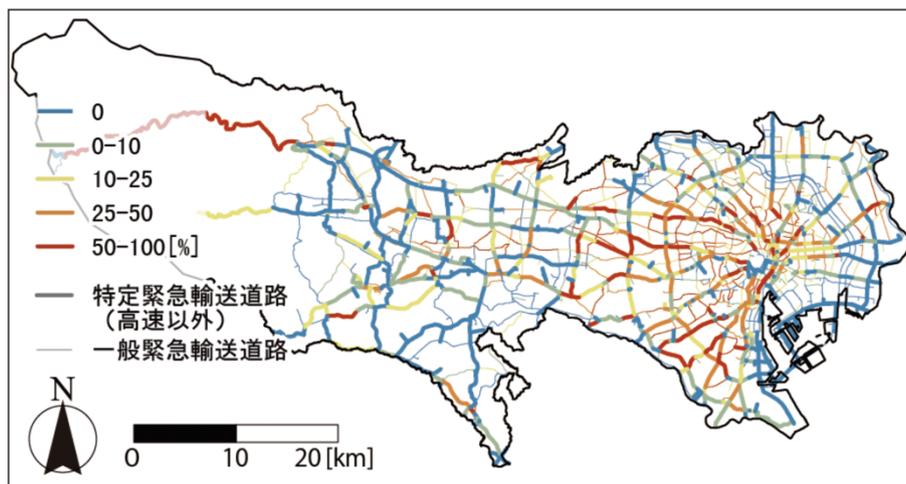


図 3.3.1-2 特定緊急輸送道路（高速以外）における道路閉塞率の空間分布

3.2 特定緊急輸送道路のアクセシビリティ評価

特定緊急輸送道路のアクセシビリティについて明確に把握するため、まず、特定緊急輸送道路のみの利用を想定した緊急活動シミュレーションを実行した。現状（平成27年9月末時点）における特定緊急輸送道路全体の耐震化率は80.6%である（表3.3.2-1）。このときの到達可能率は、特定緊急輸送道路（高速道路）から進入した場合70.4%であり、約3割の拠点施設に到達できない可能性がある。また、特定緊急輸送道路（高速以外）から進入した場合には、到達可能率は27.3%と非常に低い。また、移動距離増加率は、それぞれ1.25、1.27である。特定緊急輸送道路（高速以外）の方が特定緊急輸送道路（高速道路）よりも特定沿道建築物の倒壊の影響を受けやすく、閉塞しやすい性向が現れている。

表 3.3.2-1 現状におけるアクセシビリティ指標の推定結果
（特定緊急輸送道路全体の耐震化率：80.6%）

	到達可能率	移動距離増加率
① 特定緊急輸送道路（高速道路）から進入	70.4%	1.25
② 特定緊急輸送道路（高速以外）から進入	27.3%	1.27

次に、耐震化が進捗した場合における、アクセシビリティの変化（耐震化の効果）について検討する。このとき、どのように耐震化が進捗するか（どの建物がどのように耐震化されるか）を予見することは容易ではない。そこで、ここでは以下の極端な3つの耐震化シナリオを想定し、これらのシナリオの相対的な関係をもとに、実際の推移について検討することとした（表3.3.2-2）。

表 3.3.2-2 耐震化シナリオ

耐震化シナリオ1: Is値が小さい順	(Is値が小さい建物から順に耐震化された場合)
耐震化シナリオ2: ランダム	(ランダムに耐震化された場合)
耐震化シナリオ3: Is値が大きい順	(Is値が大きい建物から順に耐震化された場合)

シミュレーションでは、切りの良い5.0%刻みの耐震化率（85%、90%、95%、100%）の他に、現状からの改善効果を理解しやすくするために、Is値が0.2以下の建物（358棟：全特定沿道建築物の約2%）、Is値が0.3以下の建物（985棟：全特定沿道建築物の約5%）を耐震化した場合についても計算を行っている。

沿道建築物の耐震化効果は、耐震化シナリオによって大きく異なる（図3.3.2-3）。Is値の小さい順に耐震化が進めば、たとえ2.0%の建物が耐震化されるだけでも、特定緊急輸送道路（高速道路）による到達可能率は92.6%まで、移動距離増加率は1.11まで大きく改善されることがわかる（図3.3.2-3(a), (b)）。また、特定緊急輸送道路（高速以外）の場合は、それぞれ63.2%、1.16まで改善される（図3.3.2-3(c), (d)）。すなわち、Is値が小さい脆弱な特定沿道建築物が道路閉塞率の高低を支配しているため、これらを優先的に耐震化することの効果は非常に高いことがわかる。一方、Is値が大きい順に耐震化が進んだ場合には、たとえ全体の耐震化率が98.0%（約18%の建物の耐震化）まで進捗したとしても、その効果は限定的である（前述したIs値が0.2以下の建物の耐震化効果と同程度）。

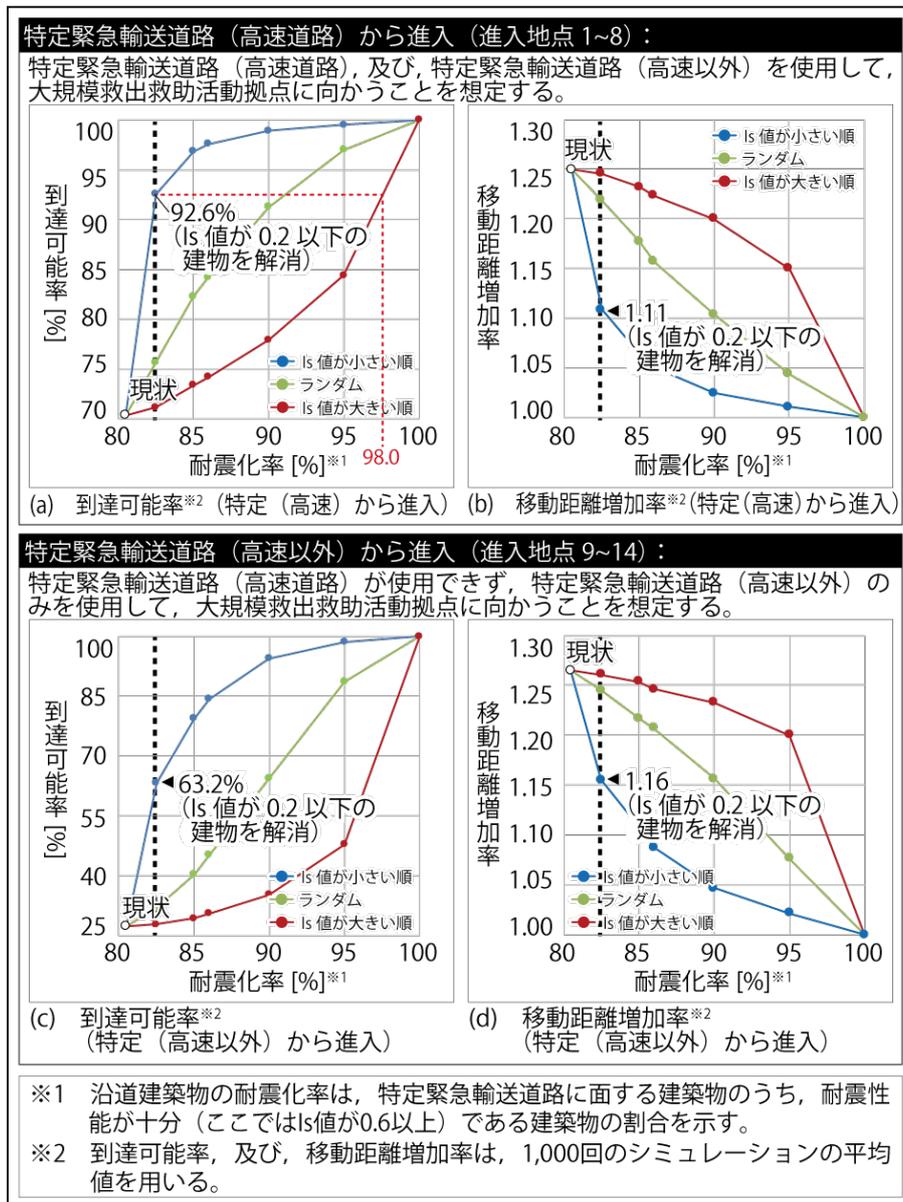


図 3.3.2-3 特定緊急輸送道路を用いた大規模救出救助活動拠点へのアクセシビリティ評価

しかし, 実際には, Is 値が小さい脆弱な建物の耐震改修は容易ではなく多額の費用も要することから, Is 値が大きい建物よりも Is 値が小さい建物の方が, 耐震化の速度は遅い可能性もある。すなわち, 建物の耐震化がランダムに進行した場合の結果と Is 値が大きい順に進行した場合の結果の間で現実的な推移があるとすれば, 特定沿道建築物の耐震化率の高さだけを目標に整備を促進しても, そのアクセシビリティ改善効果は, 限定的である。特定緊急輸送道路の頑健なアクセシビリティを意識した戦略的な耐震化推進が求められる。

3.3 一般緊急輸送道路の役割

特定緊急輸送道路（高速道路，高速以外）と一般緊急輸送道路の両者を使用して緊急活動シミュレーションを実行した。

現状の耐震化率（特定緊急輸送道路 80.6%，一般緊急輸送道路 75.0%）における到達可能率は，特定緊急輸送道路（高速道路）から進入した場合は 97.3%，特定緊急輸送道路（高速以外）から進入した場合には 95.3%である（表 3.3.3-1）。特定緊急輸送道路のみを使用した場合の到達可能率と比較すると，特定緊急輸送道路（高速道路）から進入した場合は 26.9 ポイント，特定緊急輸送道路（高速以外）から進入した場合には 68.0 ポイント，それぞれ大きく向上している。すなわち，一般緊急輸送道路は特定緊急輸送道路のアクセシビリティの確保を図る上で，非常に重要な補助的な役割を担っていることがわかる。

表 3.3.3-1 現状におけるアクセシビリティ指標の推定結果
 （特定緊急輸送道路全体の耐震化率：80.6%，
 一般緊急輸送道路全体の耐震化率：75.0%）

① 特定緊急輸送道路（高速道路）から進入

	3.1 節 ^{*1}	3.2 節 ^{*2}	差 (3.2 節-3.1 節)
到達可能率	70.4%	97.3%	+ 26.9 ポイント
移動距離増加率	1.25	1.13	- 0.12

② 特定緊急輸送道路（高速以外）から進入

	3.1 節 ^{*1}	3.2 節 ^{*2}	差 (3.2 節-3.1 節)
到達可能率	27.3%	95.3%	+ 68.0 ポイント
移動距離増加率	1.27	1.20	- 0.07

*1 特定緊急輸送道路のみを利用して拠点施設へ移動する。

*2 特定緊急輸送道路および一般緊急輸送道路を利用して移動する。

次に，一般緊急輸送道路の沿道建築物はランダムに耐震化されると仮定し，現状の耐震化率 75%から 5%刻みで 85%まで，すなわち，75%，80%，85%の 3つの一般緊急輸送道路の耐震化率について検討した。その結果を，それぞれ図 3.3.3-2 の一点鎖線，点線，実線に示した。また，特定緊急輸送道路，もしくは，一般緊急輸送道路の沿道建築物を，現状から 10%耐震化した場合の到達可能率を表 3.3.3-3 に示した。

沿道建築物を現状からランダムに 10%耐震化した場合の到達可能率は，特定緊急輸送道路の場合，98.2%（表 3.3.3-3㉓），一般緊急輸送道路の場合，97.7%（表 3.3.3-3㉔）である。一般緊急輸送道路を耐震化することによるアクセシビリティ向上効果は，相対的に小さいことが分かる。これは，一般緊急輸送道路は，緊急車両の移動上，特定緊急輸送道路の補助的な役割を果たす道路であり，それらを耐震化しても，間接的なアクセシビリティ向上効果（迂回経路の確保など）しか得られないためである。一方，一般緊急輸送道路をランダムに 10%耐震化した場合の到達可能率は，特定沿道建築物を I_s 値が大きい順に 10%耐震化した場合よりも大きく，一定のアクセシビリティ向上効果が見込まれる（表 3.3.3-3㉕，㉖）。すなわち，特定沿道建築物の耐震化が思うように進捗しない現状下では，一般緊急輸送道路の耐震化促進は，アクセシビリティの確保を図る上で重要である。特定沿道建築物のみでなく，一般緊急輸送道路の沿道建築物についても，耐震化の進捗状況を同様に注視し，耐震化を積極的に進めることが重要である。

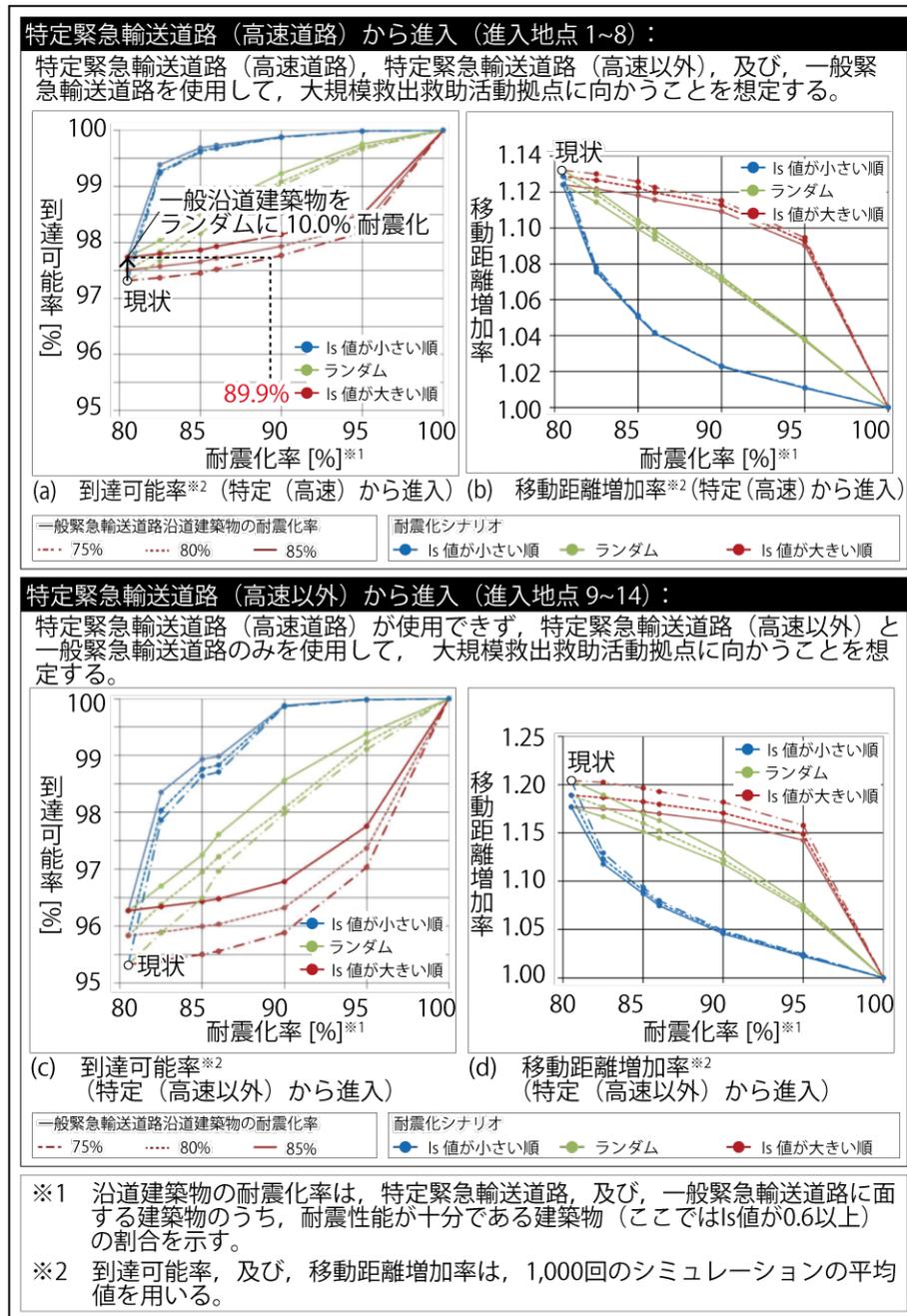


図 3.3.3-2 特定緊急輸送道路および一般緊急輸送道路を用いた大規模救出救助活動拠点へのアクセシビリティ評価

表 3.3.3-3 現状から 10%耐震化した場合の到達可能率
(特定緊急輸送道路(高速道路)から進入した場合)

		到達可能率	現状との差
現状の耐震化率 ・ 特定緊急輸送道路 80.6% ・ 一般緊急輸送道路 75.0%		㉞97.3%	
特定沿道建築物を現状から 10.0%耐震化 ・ 特定緊急輸送道路 90.0% ・ 一般緊急輸送道路 75.0%	耐震化シナリオ 1 Is 値が小さい順	㉟99.6%	+2.3 ポイント
	耐震化シナリオ 2 ランダム	㉡98.2%	+0.9 ポイント
	耐震化シナリオ 3 Is 値が大きい順	㉢97.5%	+0.2 ポイント
一般沿道建築物を現状から 10.0%耐震化 ・ 特定緊急輸送道路 80.6% ・ 一般緊急輸送道路 85.0%		㉣97.7%	+0.4 ポイント

4. 第三章のまとめ

本章では、特定緊急輸送道路沿道建築物の耐震化とアクセシビリティの関係について分析した。具体的には、まず、緊急活動シミュレーションモデル（第二章）を用いて、地表面最大速度（PGV）66 cm/s の揺れを想定し、特定緊急輸送道路を用いた、東京都隣接県から東京都内の大規模救出救助活動拠点への到達可否および所要移動距離を推定した。次に、目的地点（拠点施設）までの到達可能性と移動時における効率性（迂回時間など）の視点から、大規模救出救助活動拠点へのアクセシビリティおよび沿道建築物の耐震化推進によるアクセシビリティの改善効果を定量的に評価した。

その結果、現状（平成 27 年 9 月現在）の耐震化率における到達可能率は、高速道路から進入した場合、70.4%であり、約 3 割の大規模救出救助活動拠点に到達できない可能性があることを示した。また、特定緊急輸送道路（高速以外）から進入した場合には、到達可能率は 27.3%と非常に低い。

また、極端な 3 種類の耐震化シナリオを想定し、特定緊急輸送道路沿道建築物の耐震化によるアクセシビリティ向上に果たす効果を定量的に評価した。沿道建築物の耐震化により、アクセシビリティは改善されるが、特に、耐震性能の低い沿道建築物を優先的に整備することの効果は大きい。具体的には、 I_s 値が 0.2 以下の建物（358 棟：全体の約 2%）を耐震化するだけでも、高速道路から進入した場合の到達可能率は 92.6%まで改善することを示した。一方、 I_s 値が大きい順に耐震化が進んだ場合には、たとえ全体の耐震化率が 98.0%（約 18%の建物の耐震化）まで進捗したとしても、その効果は限定的であることを示した。

さらに、一般緊急輸送道路と特定緊急輸送道路を用いたアクセシビリティ評価を行い、一般緊急輸送道路は特定緊急輸送道路の機能確保にとって重要な補助的役割を果たすことを示した。また、一般緊急輸送道路の沿道建築物の耐震化は、特定緊急輸送道路には劣るものの、一定のアクセシビリティ向上効果があることを示した。すなわち、特定沿道建築物の耐震化が思うように進捗しない現状下では、一般緊急輸送道路の沿道建築物についても、耐震化を積極的に進めることが重要である。なお、本章では、一般沿道建築物の I_s 値については、特定沿道建築物の平均値を用いて分析したが、より詳細な分析のためには、一般沿道建築物についても耐震診断を実施し、その結果をもとに耐震化推進のための施策について検討することが望ましい。

本章では大規模救出救助活動拠点へのアクセシビリティをもとに検討したが、災害時における重要な防災拠点施設（役所、拠点病院、避難所など）へのアクセシビリティを評価することも必要であり、そのためには一般緊急輸送道路を含めた地域内の主要道路を用いた分析も必要である。緊急輸送道路のアクセシビリティは、道路ネットワークの性状や脆弱な沿道建築物の空間分布に大きく依存しており、進入地点や拠点施設ごとの局所的な特性（拠点施設の緊急輸送道路との接続の仕方や拠点付近の脆弱建物の集中など）に関する、より具体的な分析が必要である。これらの事項については、第四章および第五章において、議論を行う。

第四章

大地震発生時におけるアクセシビリティが脆弱な沿道区域の抽出方法

1. アクセシビリティ脆弱区域の抽出方法

本章では、大地震時の物的被害下において、拠点施設へのアクセシビリティが脆弱な沿道区域（通行機能が確保されない沿道区域）の抽出方法を提案する。従来のアクセシビリティ指標では、特定の2拠点間の移動性のみを評価対象とするため、拠点間の移動可否や所要移動時間などの情報しか得られていない。そのため、どの道路閉塞がアクセシビリティ低減の原因であるかを特定することは、困難である（図4.1.1-1）。

本章では、分析対象地域内の全地点から、拠点施設への移動経路を推定することで、拠点施設へ到達不能となる道路リンク（以下、孤立リンク）を面的に把握する（図4.1.1-2）。なお、本研究では、拠点施設へ到達可能な経路が存在しない場合を、「拠点施設へ到達不能である」と表現する。これにより、緊急車両の通行機能が阻害される可能性の高い沿道区域をミクروسケール（建物・道路リンク単位）に特定することが可能になり、ひいては、路線単位（例えば、補助154号線など）で耐震化を推進した場合のアクセシビリティ向上効果についての議論が可能となる。

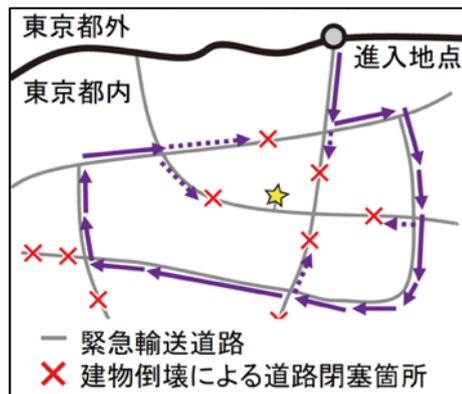


図 4.1.1-1

道路閉塞によって拠点施設へ到達不能な場合

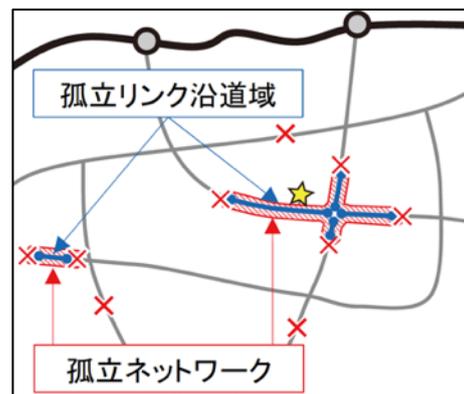


図 4.1.1-2

孤立リンクの抽出方法

以上を踏まえて、拠点施設へのアクセシビリティを評価する指標（リンク孤立率、および、ネットワーク孤立率）を提案する。

(a) リンク孤立率

リンク孤立率（以下、LI値；Link Isolation ratio）は、「全シミュレーション試行（ K 回）の内、道路リンク j が目的地点（拠点施設） d へ到達不能となる回数の割合」である（式(12)）。なお、LI値は、ODペア間の到達可能性を評価する到達可能率（p.22, 第三章1節 式(10)）を道路リンク単位で推定し、1から引いた値と同義である。

$$LI(j, d) = 1 - \frac{\sum_{k \in K} \delta(k, j, d)}{K} \quad (12)$$

ここで、 K はシミュレーションの試行回数、 $\delta(k, j, d)$ は k 回目の試行における道路リンク j から目的地点 d への到達可否を表すダミー変数（1:到達可能、0:到達不能）である。

この指標を用いれば、分析対象地域内における緊急車両の通行機能が阻害される可能性の高い沿道区域を道路リンク単位かつ面的に把握可能となる。

(b) ネットワーク孤立率

LI 値は、目的地点へのアクセシビリティを道路リンク単位で評価する指標であり、分析対象地域全体のアクセシビリティを把握するには不向きである。そこで、目的地点へのアクセシビリティを地域単位で評価可能な指標として、ネットワーク孤立率（以下、NI 値；Network Isolation ratio）を提案する。NI 値は、「目的地点 d へ到達不能となる道路リンクの総延長が、道路網の総延長に占める割合の平均値」である（式(13)）。

$$NI(d) = \frac{\sum_k^K \left(\sum_{j \in {}_bR_A} l(k, j, d) / \sum_{j \in {}_bR_A} L(j) \right)}{K} \quad (13)$$

ここで、 K はシミュレーションの試行回数、 ${}_bR_A$ は地域 A 内の道路リンク集合、 $l(k, j, d)$ は k 回目の試行における道路リンク j の目的地点 d へ到達不能となる箇所長さ (m)、 $L(j)$ は道路リンク j のリンク長 (m) である。なお、各道路リンクにおける到達判定は、以下の3パターンに分類可能である。

- ① 道路リンク j の全ての沿道区域に到達可能な場合： $l(k, j, d) = 0$
- ② 道路リンク j の一部の沿道区域に到達不能な場合： $0 < l(k, j, d) < L(j)$
- ③ 道路リンク j の全ての沿道区域に到達不能な場合： $l(k, j, d) = L(j)$

LI 値は、到達不能となった回数のみを基に、アクセシビリティ指標を算出するため、②と③を区別しない。一方、NI 値は、活動圏域内において到達不能となる沿道区域が占める割合を評価するため、②と③を区別した上で、道路リンク内で到達不能となる長さを精緻に計算し、長さを基にアクセシビリティ指標を算出する。

2. 使用データおよびシミュレーションの設定条件

2.1 使用データ

(a) 建物データ

建物については、東京都都市計画 GIS データの一部である土地・建物利用現況調査（東京都区部（平成 23 年度）⁴⁴⁾および多摩・島しょ地域（平成 24 年度）⁴⁵⁾）を用いる（総建物数 2,766,079 棟）（図 4.2.1-1）。このデータは、階数や建築面積、建物用途等の属性情報を有している。さらに、建物の形状（建物の下層と上層の床面積の違い）を考慮して、延べ床面積を算定することが可能である。しかし、構造耐震指標（Is 値）や実構造・建築年に関する属性情報は、有していない。そのため、本章では、町丁目単位で得られている実構造別・建築年別の建物割合クロス集計表を元に、各建物の詳細な属性を推定する。さらに、本研究で考慮困難であった要因の中には、GIS データの属性情報を精緻化することで、考慮可能となる要因も存在する（例えば、各道路リンクにおける中央分離帯の有無や各建物における耐震・改修の有無など）。より実践的な議論を可能とするため、GIS データにおける属性情報の精緻化が求められる。なお、本章では、薄井らの建物敷地の接道に関する研究⁴⁶⁾を参考に、道路境界線から 4.0m 未満に存在する建物を沿道建築物と見なす（図 4.2.1-2）。



図 4.2.1-1 建物データおよび道路データの例

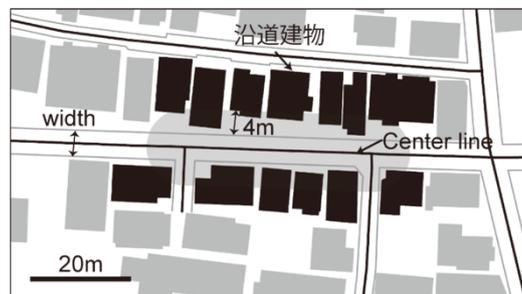


図 4.2.1-2 道路と沿道建築物集合の関係⁴¹⁾

(b) 道路データ

道路については、緊急輸送道路などの主要道路だけでなく、細街路も含まれている GIS データを利用する（総リンク数 615,743 本、総ノード数 457,755 個）（図 4.2.1-1）。なお、この道路データは、高速道路を含まないことに注意する。このデータは、道路リンク間の接続関係だけでなく、道路長さや道路幅員などの属性情報を有する点で優れている。しかし、道路リンクごとの通行速度や道路種別、中央分離帯の有無に関する属性情報は得られていない。そこで、国土交通省が公開している道路ネットワークデータ³⁹⁾を参考に、緊急輸送道路に関する属性（特定緊急輸送道路、一般緊急輸送道路、その他の道路）を付与した。また、道路交通法や道路構造令を参照し、各道路リンクの通行速度を設定した^{7),47)}（表 4.2.1-3）。なお、東日本大震災前後の一般車両の走行実績⁴⁸⁾を参考に、災害時の通行速度は、平常時の半分になると想定した。

表 4.2.1-3 大地震時における道路リンク j の通行速度

道路リンク j の有効幅員 W_e	車両移動時	歩行移動時
$12.0 \text{ m} \leq W_e$	30.0 km/h (60.0 km/h)*	5.0 km/h
$6.0 \text{ m} \leq W_e < 12.0 \text{ m}$	20.0 km/h (40.0 km/h)*	5.0 km/h
$W_e < 6.0 \text{ m}$	10.0 km/h (20.0 km/h)*	5.0 km/h

*括弧内は、平常時における通行速度を示している。

表 4.2.1-4 分析対象建物数、道路リンク数、および、ノード数

	建物数 (棟)	リンク数 (本)	ノード数 (個)
緊急輸送道路 (第四章で使用)	102,087*	26,954	26,158
合計	2,766,079	615,743	457,755

*緊急輸送道路の沿道建築物数

(c) 拠点施設（災害拠点病院）のデータ

拠点施設の例として用いる災害拠点病院（計 80 箇所）は、災害時における東京都の医療救護活動（傷病者の受け入れおよび医療救護班の派遣など）の拠点となる病院である⁴⁰⁾（図 4.2.1-5、図 4.2.1-6、表 4.2.1-7）。一般に、災害時における医療体制は、二次医療圏（病院等における入院に係る医療を提供可能な地域単位）単位で整備され、各災害拠点病院は、当該圏内において医療救護活動を行う（図 4.2.1-5、表 4.2.1-8）。災害拠点病院については、東京都が公表している災害拠点病院一覧⁴⁹⁾を元に GIS データを作成し、その立地状況を仔細に確認した上で、周辺の緊急輸送道路との接続関係を設定した。

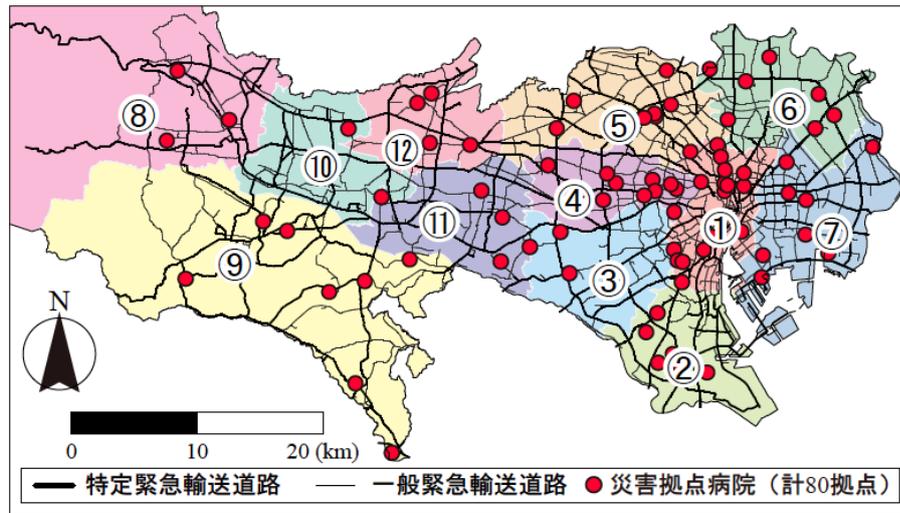


図 4.2.1-5 災害拠点病院および二次医療圏の空間分布
(図中の丸数字は、二次医療圏の No.を示す (表 4.2.1-8).)

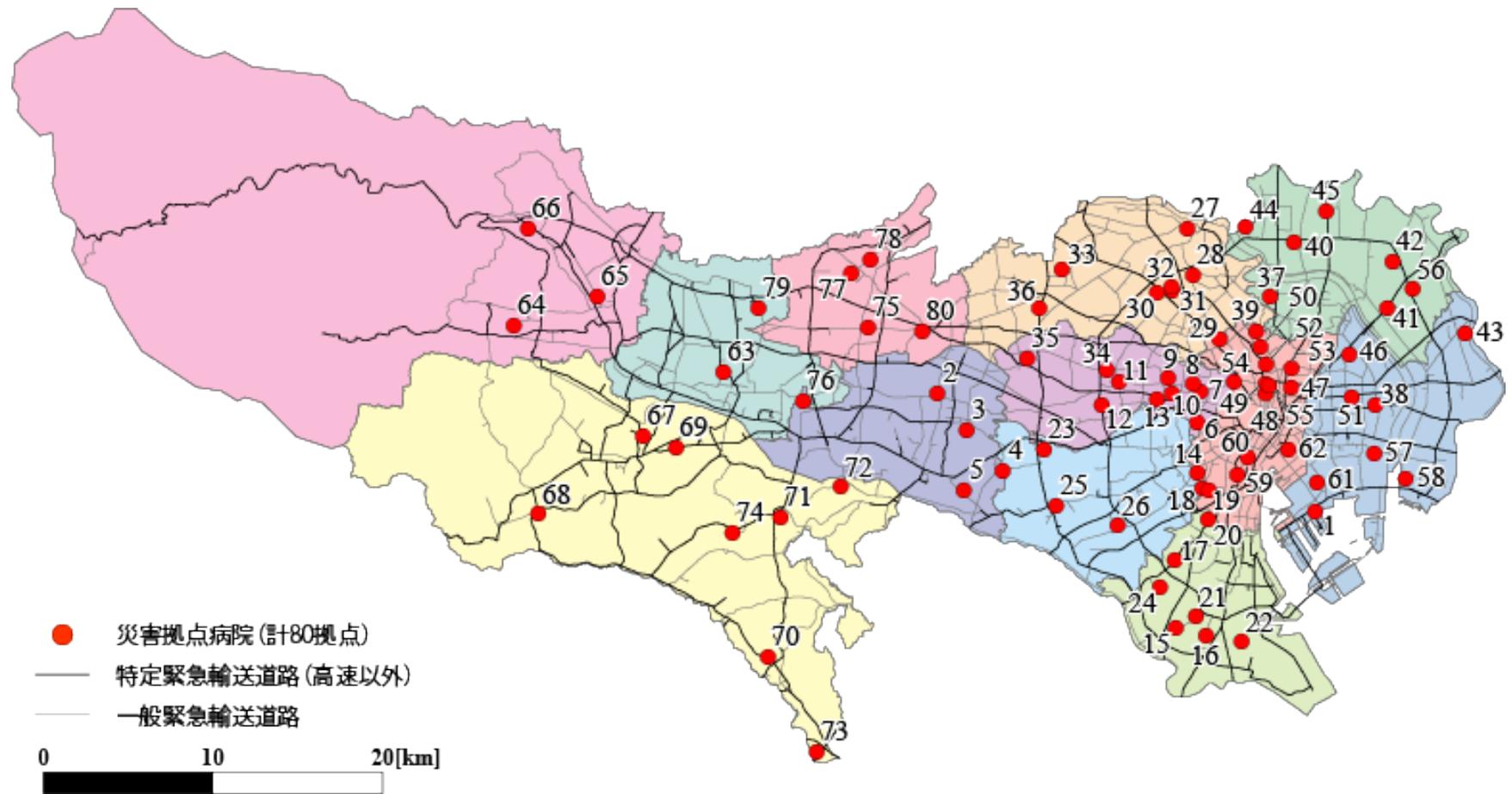


図 4.2.1-6 災害拠点病院および二次医療圏の空間分布 (拡大版)
(図中●のラベルは、災害拠点病院の No.を示す (表 4.2.1-7).)

表 4.2.1-7 災害拠点病院一覧

No.	病院名	No.	病院名
1	がん研究会有明病院	41	平成立石病院
2	武蔵野赤十字病院	42	東京都保健医療公社東部地域病院
3	杏林大学医学部付属病院	43	江戸川病院
4	至誠会第二病院	44	博慈会記念総合病院
5	東京慈恵会医科大学附属第三病院	45	苑田第一病院
6	慶応義塾大学病院	46	東京曳舟病院
7	東京女子医科大学病院	47	三井記念病院
8	国立国際医療研究センター病院	48	日本大学病院
9	東京山手メディカルセンター	49	順天堂大学医学部附属順天堂医院
10	東京都保健医療公社大久保病院	50	日本医科大学付属病院
11	新渡戸記念中野総合病院	51	東京都立墨東病院
12	立正佼成会附属佼成病院	52	東京大学医学部付属病院
13	東京医科大学病院	53	永寿総合病院
14	日本赤十字社医療センター	54	東京新宿メディカルセンター
15	池上総合病院	55	東京医科歯科大学医学部附属病院
16	東邦大学医療センター大森病院	56	東京慈恵会医科大学葛飾医療センター
17	昭和大学病院	57	順天堂大学医学部附属 順天堂江東高齢者医療センター
18	東京都立広尾病院	58	東京臨海病院
19	北里大学北里研究所病院	59	東京都済生会中央病院
20	N T T東日本関東病院	60	東京慈恵会医科大学附属病院
21	大森赤十字病院	61	昭和大学江東豊洲病院
22	東京労災病院	62	聖路加国際病院
23	東京都立松沢病院	63	国立病院機構災害医療センター
24	東京都保健医療公社荏原病院	64	公立阿伎留医療センター
25	公立学校共済組合関東中央病院	65	公立福生病院
26	国立病院機構東京医療センター	66	青梅市立総合病院
27	東京北医療センター	67	東海大学八王子病院
28	帝京大学医学部附属病院	68	東京医科大学八王子医療センター
29	東京都立大塚病院	69	日野市立病院
30	東京都健康長寿医療センター	70	町田市民病院
31	東京都保健医療公社豊島病院	71	日本医科大学多摩永山病院
32	日本大学医学部附属板橋病院	72	稲城市立病院
33	練馬光が丘病院	73	南町田病院
34	東京警察病院	74	東京都保健医療公社多摩南部地域病院
35	荻窪病院	75	公立昭和病院
36	順天堂大学医学部附属練馬病院	76	東京都立多摩・小児総合医療センター
37	東京女子医科大学東医療センター	77	東京都保健医療公社 多摩北部医療センター
38	江東病院	78	国立病院機構東京病院
39	東京都立駒込病院	79	東大和病院
40	西新井病院	80	佐々総合病院

表 4.2.1-8 二次医療圏一覧

No.	名称	市区町村（災害拠点病院 No.（表 4.2.1-6 に対応））
①	区中央部保健医療圏	千代田区，中央区，港区，文京区，台東区 (19, 39, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 55, 59, 60, 62)
②	区南部保健医療圏	品川区，大田区 (15, 16, 17, 20, 21, 22, 24)
③	区西南部保健医療圏	目黒区，世田谷区，渋谷区 (4, 14, 18, 23, 25, 26)
④	区西部保健医療圏	新宿区，中野区，杉並区 (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 34, 35, 54)
⑤	区西北部保健医療圏	豊島区，北区，板橋区，練馬区 (27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 36)
⑥	区東北部保健医療圏	荒川区，足立区，葛飾区 (37, 40, 41, 42, 44, 45, 56)
⑦	区東部保健医療圏	墨田区，江東区，江戸川区 (1, 38, 43, 46, 51, 57, 58, 61)
⑧	西多摩保健医療圏	青梅市，瑞穂町，日の出町，檜原町，奥多摩町，福生市， 羽村市，あきる野市 (64, 65, 66)
⑨	南多摩保健医療圏	八王子市，町田市，日野市，多摩市，稲城市 (67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74)
⑩	北多摩西部保健医療圏	立川市，昭島市，国分寺市，国立市，東大和市，武蔵村 山市 (63, 79)
⑪	北多摩南部保健医療圏	武蔵野市，三鷹市，府中市，調布市，小金井市，狛江市 (2, 3, 5, 76)
⑫	北多摩北部保健医療圏	小平市，東村山市，清瀬市，東久留米市，西東京市 (75, 77, 78, 80)

2.2 シミュレーションの設定条件

本章では、第三章と同様に、具体的な想定地震は設定せず、東京湾北部地震および都心南部直下地震の被害想定結果を参考に、すべての地点において計測震度 6.2 の揺れを想定した。すなわち、震源位置や地盤性状の影響を考慮せず、各災害拠点病院へのアクセシビリティを相対的に評価することを目的とした。さらに、童ら⁴⁾の手法を用いて地表面最大速度 (PGV) に換算した値 (66 cm/s) を、シミュレーションにおける地震強度とした。

本章では、通行機能の確保が特に急務である緊急輸送道路のみの使用を想定して、緊急活動シミュレーションを実行した^{注7)}。具体的には、実構造・建築年に基づく建物倒壊確率モデル (第二章 2.2 節, p. 14) を用いて、建物単位で全壊判定を行った。その上で、瓦礫流出確率に基づく道路閉塞確率モデル (p. 17, 第二章 3.2 節) を用いて、東京都内の緊急輸送道路の閉塞状況を推定した。第三章では、隣接県からの大規模な移動を想定しているため、より安全側の評価となるように、有効幅員を 6.0m に設定したが、本章では、比較的狭い活動圏域内における、より実質的な活動についてアクセシビリティを評価するため、道路リンクの有効幅員が 4.0m 未満となった場合に、緊急車両の通行が不能である (閉塞) と想定した。このとき、緊急輸送道路における中央分離帯の存在は考慮しない。さらに、緊急車両のみによる移動を想定し、各災害拠点病院への到達可否を推定した (p. 18, 第二章 4 節)。

以上の準備の下で、緊急活動シミュレーションを $K=100$ 回実行し、アクセシビリティ指標を算出した。以降の分析では、LI 値は、「全シミュレーション試行 (K 回) の内、道路リンク j から二次医療圏 A 内の災害拠点病院へ到達不能となる (孤立する) 回数の割合」を、NI 値は、「二次医療圏 A における孤立リンクの総延長 (l_A) が、二次医療圏 A 内の道路網の総延長 (L_A) に占める割合 (l_A/L_A)」を示している。

^{注7)}道路リンクの頑健性は、それぞれが担う交通機能によって異なる (一般に、下位階層の道路リンクほど、頑健性が低い。そのため、全ての道路リンクを対象に、アクセシビリティ評価を行うと、上位階層におけるアクセシビリティ脆弱区域を把握することが困難となる。つまり、アクセシビリティが脆弱な沿道区域を抽出する際には、同等の通行機能が求められる道路リンク集合を対象にアクセシビリティ評価を行う必要がある。

3. 東京都内の緊急輸送道路を用いた災害拠点病院へのアクセシビリティ評価

3.1 道路閉塞の空間分布

緊急輸送道路における道路閉塞率（計 100 回のシミュレーションのうち、各道路リンクが閉塞した回数の割合）の空間分布を図 4.3.1-1 に示してある。荒川区や台東区、23 区西部（Area I）において、道路閉塞率の高い道路リンクが存在するものの、道路閉塞率が 10.0% を超える道路リンクは、全体の 5.9% に留まる（図 4.3.1-2）。緊急輸送道路は、広幅員道路を中心に指定されているため、道路閉塞率は低い傾向にある。

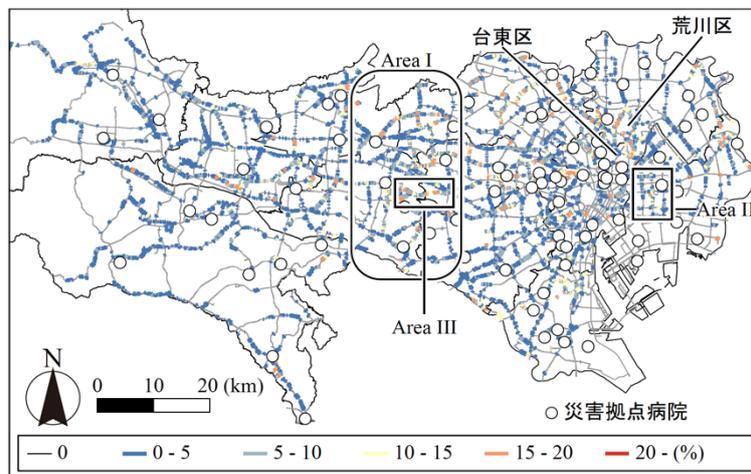


図 4.3.1-1 道路閉塞率の空間分布

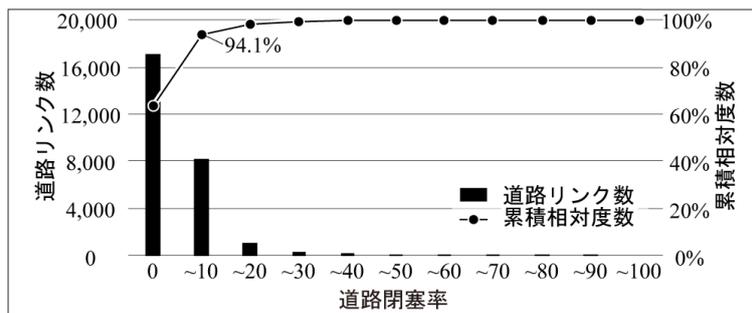


図 4.3.1-2 道路閉塞率の累積度数分布

3.2 リンク孤立率の空間分布

緊急輸送道路のリンク孤立率（以下、LI 値）（p. 40, 式(12)）の空間分布を図 4.3.2-1 に示してある。なお、道路閉塞率と LI 値の空間分布は、凡例の目盛間隔が異なる（図 4.3.1-1, 図 4.3.2-1）。道路リンクごとの LI 値は、各道路リンクから二次医療圏内の災害拠点病院へ到達不能となる割合を示している。例えば、赤色で示された道路リンクにおいては、80%から 100%の確率で、いずれの災害拠点病院へも到達できないことを示している。つまり、LI 値の空間分布をみると、道路閉塞率の空間分布のみからは読み取ることが困難である、災害拠点病院へのアクセシビリティが脆弱な沿道区域を把握することができる。

例えば、緊急輸送道路が密に整備されている区間では（図 4.3.2-1, Area II）、緊急車両が道路閉塞に遭遇した場合も、複数の迂回経路が存在するため、LI 値が広域に悪化することはない。一方、緊急輸送道路の整備が疎である区間では（図 4.3.2-1, Area III）、道路閉塞に遭遇した際に、迂回経路が存在しないため、広い範囲で孤立リンクが発生する傾向が見てとれる。

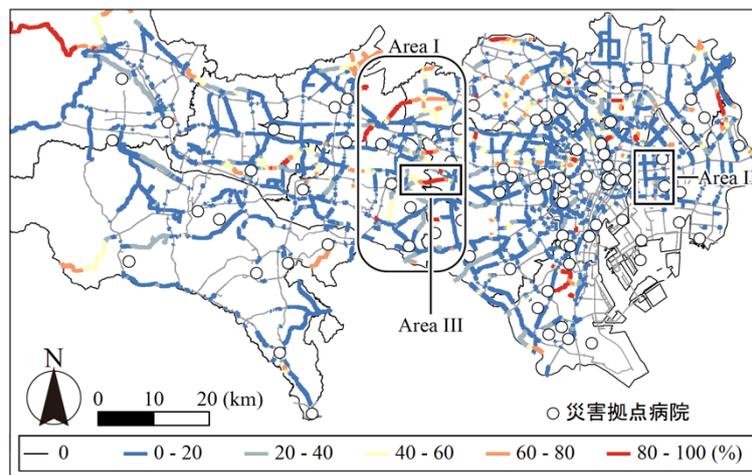


図 4.3.2-1 LI 値の空間分布

次に、道路閉塞率と LI 値の関係を図 4.3.2-2 に示してある。LI 値は、全体の 50.1%の道路リンクで道路閉塞率よりも高い値を示し（全体の 40.9%の道路リンクでは、道路閉塞率と LI 値が同じ値を示す）、全体の 15.3%の道路リンクで、15.0 ポイント以上の差が生じている。各道路リンクが孤立するか否か値は、自身の閉塞状況だけでなく、周辺の道路リンクの閉塞状況からも影響を受けるため、LI 値は、道路閉塞率よりも高い値を示す傾向にあることがわかる。

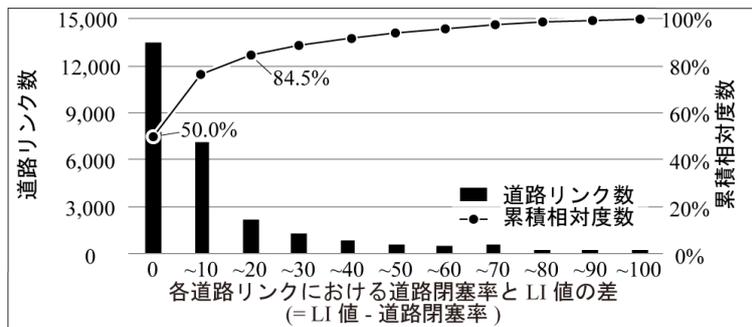


図 4.3.2-2 LI 値と道路閉塞率の差の累積度数分布

3.3 災害拠点病院ごとのネットワーク孤立率

災害拠点病院ごとのネットワーク孤立率（以下、NI 値）を図 4.3.3-1、表 4.3.3-3 に示してある。NI 値は、48 箇所（全体の 86.3%）の災害拠点病院において、40.0%以下の低い値を示すが、7 箇所（全体の 8.8%）の災害拠点病院では、50.0%を上回る値を示す。

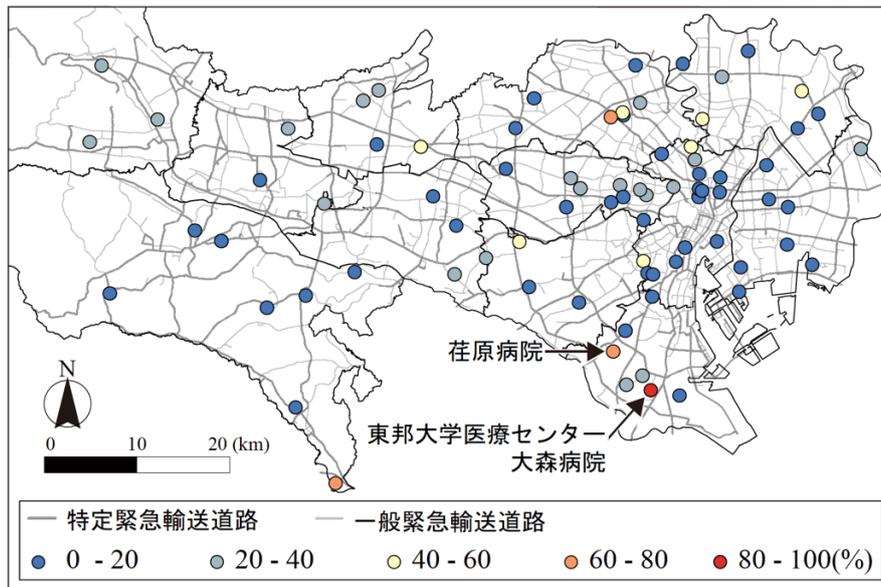


図 4.3.3-1 災害拠点病院ごとの NI 値の空間分布

NI 値が特に高い値を示す災害拠点病院は、複数の移動経路を選択可能な（3 本以上の道路リンクが接続する）交差点との距離が長い（図 4.3.3-2）。そのため、災害拠点病院周辺で閉塞道路に遭遇した場合、迂回経路が存在せず、災害拠点病院へ到達不能となる可能性が高い。これらの災害拠点病院のアクセシビリティを改善するためには、災害拠点病院周辺において沿道建築物の耐震化を重点的に促進することが重要であると考えられる。

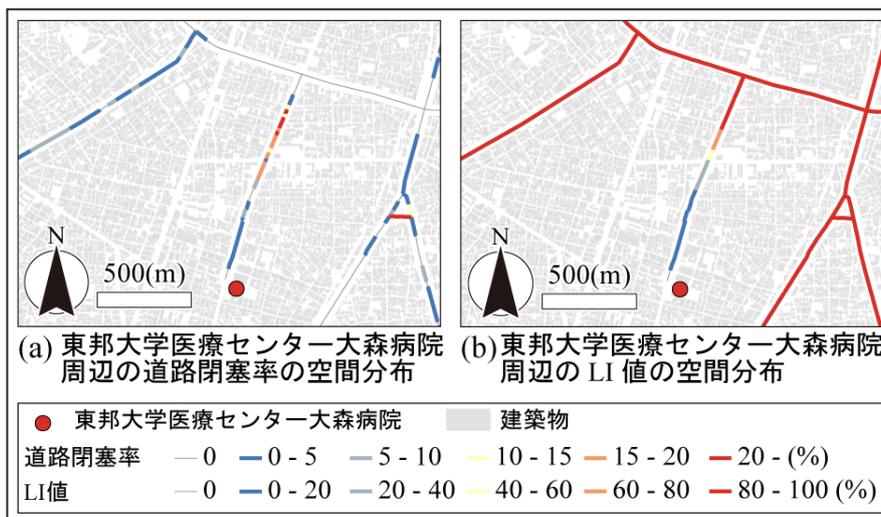


図 4.3.3-2 東邦大学医療センター大森病院周辺の道路閉塞率および LI 値の空間分布

表 4.3.3-3 災害拠点病院ごとの NI 値一覧

No.	病院名	NI 値	No.	病院名	NI 値
1	がん研究会明病院	4.5%	41	平成立石病院	9.8%
2	武蔵野赤十字病院	17.7%	42	東京都保健医療公社東部 地域病院	44.7%
3	杏林大学医学部付属病院	12.8%	43	江戸川病院	20.4%
4	至誠会第二病院	38.4%	44	博慈会記念総合病院	9.8%
5	東京慈恵会医科大学附属 第三病院	32.8%	45	苑田第一病院	10.4%
6	慶応義塾大学病院	14.1%	46	東京曳舟病院	11.1%
7	東京女子医科大学病院	30.8%	47	三井記念病院	4.5%
8	国立国際医療研究センター 病院	26.6%	48	日本大学病院	5.5%
9	東京山手メディカルセン ター	32.2%	49	順天堂大学医学部附属順 天堂医院	5.5%
10	東京都保健医療公社大久 保病院	14.1%	50	日本医科大学付属病院	26.2%
11	新渡戸記念中野総合病院	29.1%	51	東京都立墨東病院	4.5%
12	立正佼成会附属佼成病院	14.9%	52	東京大学医学部付属病院	17.9%
13	東京医科大学病院	14.1%	53	永寿総合病院	4.5%
14	日本赤十字社医療センタ ー	43.7%	54	東京新宿メディカルセン ター	26.0%
15	池上総合病院	21.7%	55	東京医科歯科大学医学部 附属病院	16.0%
16	東邦大学医療センター大 森病院	93.9%	56	東京慈恵会医科大学葛飾 医療センター	9.8%
17	昭和大学病院	8.1%	57	順天堂大学医学部附属順 天堂江東高齢者医療セン ター	4.5%
18	東京都立広尾病院	8.1%	58	東京臨海病院	4.5%
19	北里大学北里研究所病院	18.9%	59	東京都済生会中央病院	6.4%
20	N T T 東日本関東病院	9.9%	60	東京慈恵会医科大学附属 病院	4.5%
21	大森赤十字病院	29.8%	61	昭和大学江東豊洲病院	4.5%
22	東京労災病院	8.1%	62	聖路加国際病院	4.5%
23	東京都立松沢病院	49.9%	63	国立病院機構災害医療セ ンター	9.0%
24	東京都保健医療公社荏原 病院	78.7%	64	公立阿伎留医療センター	28.2%
25	公立学校共済組合関東中 央病院	11.8%	65	公立福生病院	28.9%
26	国立病院機構東京医療セ ンター	11.5%	66	青梅市立総合病院	30.8%

第四章 大地震発生時におけるアクセシビリティが脆弱な沿道区域の抽出方法

27	東京北医療センター	12.6%	67	東海大学八王子病院	8.3%
28	帝京大学医学部附属病院	24.5%	68	東京医科大学八王子医療センター	8.3%
29	東京都立大塚病院	17.7%	69	日野市立病院	9.2%
30	東京都健康長寿医療センター	12.6%	70	町田市民病院	8.3%
31	東京都保健医療公社豊島病院	46.5%	71	日本医科大学多摩永山病院	8.3%
32	日本大学医学部附属板橋病院	70.1%	72	稲城市立病院	8.3%
33	練馬光が丘病院	12.6%	73	南町田病院	61.9%
34	東京警察病院	23.2%	74	東京都保健医療公社多摩南部地域病院	8.3%
35	荻窪病院	14.1%	75	公立昭和病院	19.6%
36	順天堂大学医学部附属練馬病院	12.6%	76	東京都立多摩・小児総合医療センター	28.8%
37	東京女子医科大学東医療センター	58.7%	77	東京都保健医療公社多摩北部医療センター	21.6%
38	江東病院	4.5%	78	国立病院機構東京病院	22.1%
39	東京都立駒込病院	57.6%	79	東大和病院	20.8%
40	西新井病院	25.9%	80	佐々総合病院	54.1%

3.4 二次医療圏ごとのネットワーク孤立率

大地震発生時には、一部の災害拠点病院が、倒壊、もしくは、周囲の閉塞道路によってアクセス困難となり、傷病者の受け入れが困難となる恐れがある。そのような場合、傷病者は、二次医療圏内の他の災害拠点病院へ搬送されると考えられるが、圏域内の医療救護機能が一部の利用可能な災害拠点病院に過度に偏ると、それらの災害拠点病院において、受け入れ人数の限界に達してしまう可能性がある。つまり、二次医療圏内の医療救護機能が、圏域内の災害拠点病院へ均等に分配されるかを評価する必要がある。そこで、本節では、二次医療圏単位でアクセス可能な拠点施設数を考慮したアクセシビリティ評価を行う。

例えば、3箇所の拠点施設を有する道路網上に複数の閉塞道路が発生している状況を想定する(図4.3.4-1)。この時、拠点Aへは、全体の40%の道路リンクから到達可能である(全体の60%の道路リンクからは到達困難)。つまり、拠点AのNI値は、60%である。同様に、拠点Bおよび拠点CのNI値も求められる。次に、これらの値を踏まえ、到達可能な拠点施設数と活動圏域単位で算出したNI値の関係を考える(図4.3.4-2)。活動圏域内の10%の道路リンクは、いずれの拠点施設へも到達不能な孤立リンクである。つまり、「1箇所の拠点施設へ到達できるか」を考えた場合のNI値は、10%となる(図4.3.4-2(a))。同様に、到達可能な活動拠点数が2拠点以下(図4.3.4-2(b))、3箇所以下(図4.3.4-2(c))と増えるにつれて、孤立する道路リンクが増え、NI値が悪化する様子を記述できる。

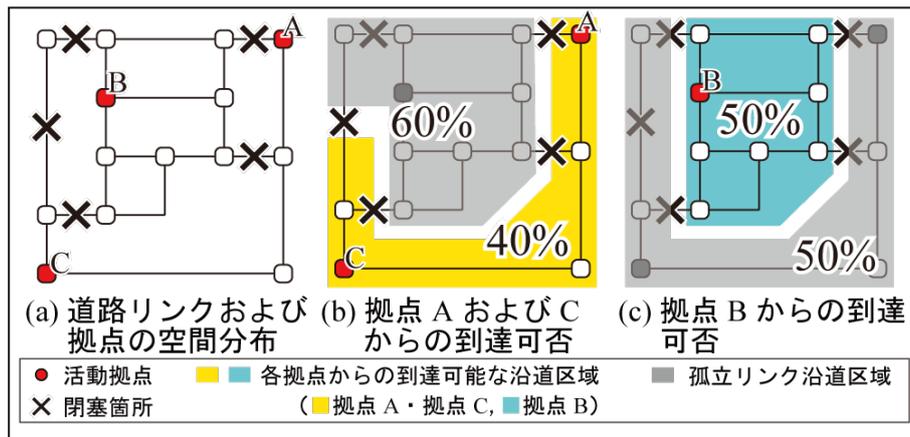


図 4.3.4-1 閉塞リンクおよび孤立リンクの分布の例

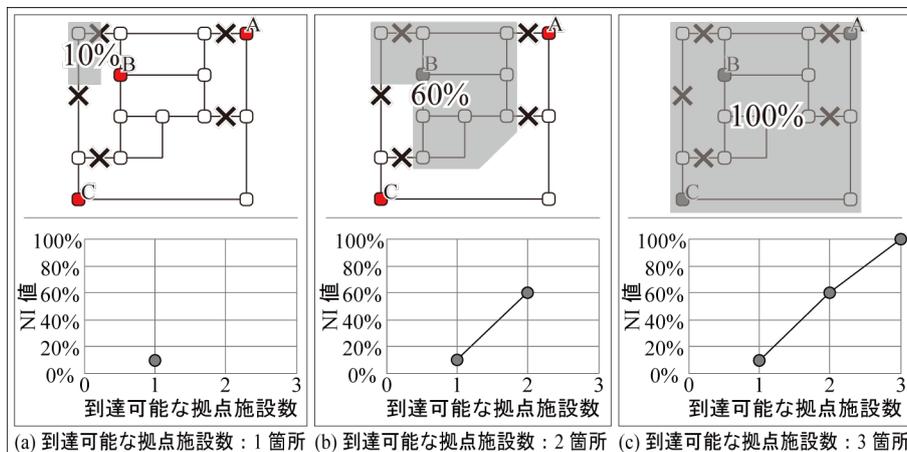


図 4.3.4-2 到達可能な拠点施設数とNI値の関係の例

二次医療圏ごとに集計したネットワーク孤立率（以下、NI 値）の推移を、図 4.3.4-3 および表 4.3.4-4 に示してある。東京都の 12 の二次医療圏は、それぞれ、圏域内に存在する災害拠点病院数が異なるため、ここでは、圏域内に存在する全拠点施設（ M 箇所）に占める到達可能な拠点施設（ m 箇所）の割合 $\alpha (=m/M)$ を横軸にとる。

例えば、4 つの災害拠点病院を有する⑥区東北部（▲）における、 α と NI 値に着目する。二次医療圏内のいずれの災害拠点病院へも到達困難である場合の NI 値（ $\alpha=1/4$ ）から、到達可能な災害拠点病院数が、2 拠点未満（ $\alpha=2/4$ ）、3 拠点未満（ $\alpha=3/4$ ）、4 拠点未満（ $\alpha=4/4$ ）となるにつれて、NI 値が悪化する様子を確認できる。⑧西多摩（▲）や⑫北多摩北部（■）などの二次医療圏では、NI 値が高い値を示す。これらの二次医療圏では、災害時に、いずれの災害拠点病院へも到達不能な区間が発生し、傷病者が医療救護活動を受けられない可能性がある。また、NI 値が高い値を示す災害拠点病院（東邦大学医療センター大森病院や日本大学医学部附属板橋病院など）が存在する二次医療圏（②区南部（●）や⑤区西北部（▲）など）では、一部の災害拠点病院へのアクセスを確保することが困難となる。このような二次医療圏では、圏域内の医療救護機能が、少数の災害拠点病院に偏る可能性が高い。災害拠点病院周辺、および、LI 値が高い値を示す道路リンクの沿道建築物を優先的に耐震化するなど、二次医療圏における NI 値を改善するための施策について検討する必要がある。

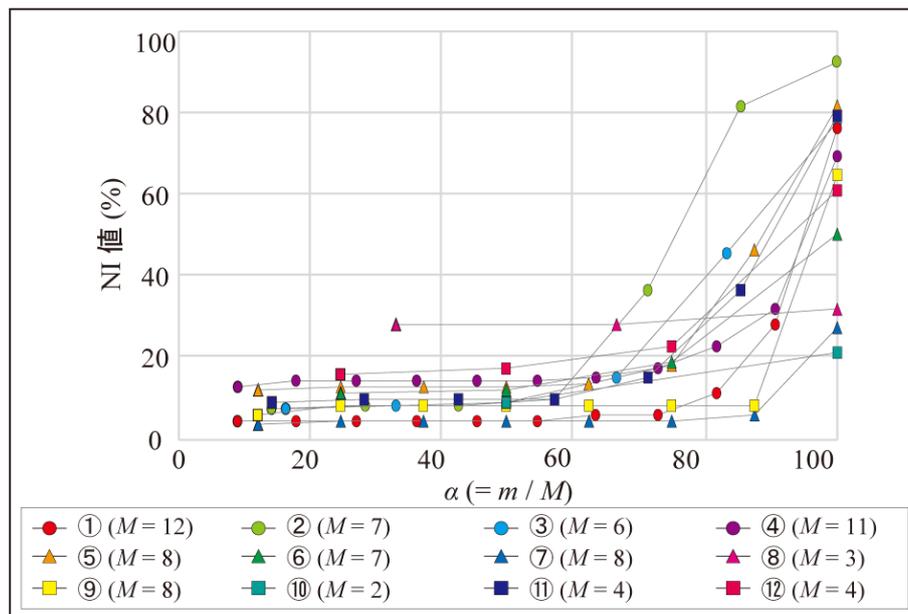


図 4.3.4-3 二次医療圏ごとの NI 値の推移
 (M ：二次医療圏内に存在する全拠点施設数， m ：到達可能な拠点施設数)

表 4.3.4-4 二次医療圏ごとのNI値一覧
(M:二次医療圏内に存在する全拠点施設数, m:到達可能な拠点施設数)

No.	二次医療圏名	M	NI値 (%)												
			m=1	m=2	m=3	m=4	m=5	m=6	m=7	m=8	m=9	m=10	m=11	m=12	
1	区中央部	12	4.1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	5.5	6.5	12.1	35.0	81.7
2	区南部	7	7.2	8.1	8.1	9.9	36.4	81.5	99.1						
3	区西南部	6	7.5	8.1	9.0	15.3	45.6	77.9							
4	区西部	11	13.2	14.0	14.1	14.1	14.1	14.1	14.9	17.4	22.4	31.8	69.5		
5	区西北部	8	12.4	12.6	12.6	12.6	13.4	17.7	46.5	81.4					
6	区東北部	7	9.1	9.8	9.8	9.8	15.1	36.5	79.1						
7	区東部	8	3.8	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	5.5	26.9					
8	西多摩	3	28.1	28.2	31.7										
9	南多摩	8	6.0	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	65.1					
10	北多摩西部	2	9.0	20.8											
11	北多摩南部	4	11.3	11.9	18.8	50.2									
12	北多摩北部	4	16.1	17.7	22.6	61.2									

4. 第四章のまとめ

本章では、大地震時において拠点施設へのアクセシビリティが脆弱となる沿道区域の抽出方法を提案した。具体的には、まず、大地震時の物的被害下における孤立リンクに着目したアクセシビリティ指標（リンク孤立率（以下、LI 値）、および、ネットワーク孤立率（以下、NI 値））を提案した。次に、東京都全域において、地表面最大速度（*PGV*）66 cm/s の揺れを想定した緊急活動シミュレーションモデル（第二章）を実行し、緊急輸送道路を用いた災害拠点病院（計 80 箇所）へのアクセシビリティ評価を行った。

緊急輸送道路のうち、道路閉塞率が 10.0%を超える道路リンクは、全体の 5.9%に留まっており、道路閉塞率は低い傾向にあることを示した。さらに、LI 値を用いて、災害拠点病院へのアクセシビリティが脆弱な沿道区域を抽出可能であることを示した。特に、緊急輸送道路の整備が疎である区間では、広い範囲で孤立リンクが発生する傾向があることを示した。

また、災害拠点病院ごとの NI 値をみると、7 箇所（全体の 8.8%）の災害拠点病院において、50.0%を超える非常に高い値を示した。このような災害拠点病院が存在する二次医療圏では、医療救護の負荷がアクセシビリティが高い災害拠点病院に集中する可能性が高い。災害拠点病院周辺、および、LI 値が高い値を示す道路リンクの沿道建築物を優先的に耐震化するなど、アクセシビリティを改善するための施策について検討する必要がある。

本研究では、建物倒壊に起因する道路閉塞のみに着目して、拠点施設へのアクセシビリティを評価するため、人口分布を考慮していない。しかし、大地震時における、医療救護活動を想定したアクセシビリティ評価は、人口分布や重症者の発生分布、さらには、災害拠点病院の病床数（受け入れ可能人数）などにも大きく依存する。円滑な医療救護活動を実現するためにも、これらの要因を考慮したアクセシビリティ評価は、今後の課題である。

第五章

緊急輸送道路以外の道路を用いたアクセシビリティ評価と市街地性状の関連分析

1. 緊急輸送道路以外の道路を用いたアクセシビリティ評価

本章では、緊急輸送道路以外の道路（以下、その他の道路）を用いた、各建物へのアクセシビリティ評価および市街地性状との関連分析を行う。具体的には、まず、緊急活動時の移動経路を評価するアクセシビリティ指標を提案する。次に、東京都全域を対象に、緊急活動シミュレーション（第二章）を実行し、緊急輸送道路上の交差点から各建築物への到達可否および移動経路を推定する。さらに、算出したアクセシビリティ指標と市街地性状との関連を、重回帰分析を用いて明らかにするとともに、アクセシビリティを効果的に改善するための手法について、定量的に検討する。

本章では、到達可能率、増加移動時間、および、地域到達確率という、3種類の指標を用いて、アクセシビリティを評価する。

(a) 地域到達率

地域到達率 (Local Accessibility ; LA) は、緊急活動の到達可否のみを評価する指標である。地域到達率は、到達可能率 (p. 22, 式(10)) を、活動圏域内の全 OD ペアについて算出し、集計した値であり、活動圏域内の到達可能性をマクロスケールに評価する指標である。具体的には、地域内における建物の総延べ床面積に占める、緊急車両が到達可能な建物の総延べ床面積の割合を示す (式(14))。

$$LA_A = \frac{\sum_{i \in {}_aR_A} s(i) \cdot \delta(o, i)}{\sum_{i \in {}_aR_A} s(i)} \quad (14)$$

ここで、 ${}_aR_A$ は、エリア A 内の建物集合、 $s(i)$ は、建物 i の延べ床面積 (m^2)、 $\delta(o, i)$ は、出発地点 o から建物 i への到達有無を表すダミー変数 (1 : 到達可能, 0 : 到達不能) である。

(b) 増加移動時間

増加移動時間 (Travel Time Increment ; TTI) は、移動の効率性という観点から、緊急車両の移動経路を評価する指標である。第三章では、緊急車両が主要道路を優先的に利用するように、道路種別ごとの通行速度を設定した。そのため、移動の効率性を評価する上では、直感的に理解が容易な、移動距離の視点から評価を行った。本章では、道路交通法や道路構造令、東日本大震災前後の一般車両の走行実績を参考に、災害時における減速を考慮した通行速度の設定を行なうため、移動時間に基づいた評価を行う。

また、本章では、比較的狭域な活動圏域内における移動を想定する。平常時の所要移動時間が極めて短い場合、災害時に大幅な迂回が生じると、移動時間増加率が極めて大きな値となり、集計値に影響を及ぼす可能性がある。そこで、本章では、移動時間の増加率ではなく、増加分を用いて、緊急車両の移動の効率性を評価する。具体的には、災害時における道路閉塞の影響により増加した移動時間を示す (式(15))。

$$TTI_A = \frac{\sum_{i \in {}_aR_A} \delta(o, i) \cdot (T'(o, i) - T(o, i))}{\sum_{i \in {}_aR_A} \delta(o, i)} \quad (15)$$

ここで、 ${}_aR_A$ は、エリア A 内の建物集合、 $T(o, i)$ は、平常時における出発地点 o から建物 i への所要移動時間 (分)、 $T'(o, i)$ は、発災時における出発地点 o から建物 i への所要移動時間 (分)、 $\delta(o, i)$ は、出発地点 o から建物 i への到達有無を表すダミー変数 (1: 到達可能, 0: 到達不能) である。

(c) 地域到達確率

地域到達確率 (Local Access Possibility ; LAP) は、移動の安全性という観点から、緊急車両の移動経路を評価する指標である。具体的には、大地震時における物的被害下における、建物 i への移動経路の安全性を評価する指標を示す (式(16), 式(17))。

$$LAP_A = \frac{\sum_{i \in {}_aR_A} s(i) \cdot p(o, i)}{\sum_{i \in {}_aR_A} s(i)} \quad (16)$$

where

$$p(o, i) = \prod_{j \in {}_cR_{o,i}} (1 - q(j)) \quad (17)$$

ここで、 ${}_aR_A$ は、エリア A における建物集合、 $s(i)$ は、建物 i の延べ床面積 (m^2)、 $p(o, i)$ は、災害時における出発地点 o から建物 i への到達確率、 ${}_cR_{o,i}$ は、出発地点 o から建物 i への移動時間が最短となる経路上の道路リンク集合、 $q(j)$ は、道路リンク j の閉塞確率である。

2. シミュレーションの設定条件

本研究では、第三章・第四章と同様に、具体的な想定地震は設定せず、東京湾北部地震および都心南部直下地震の被害想定結果を参考に、すべての地点において計測震度 6.2 の揺れを想定した。すなわち、震源位置や地盤性状の影響を考慮せず、各拠点施設へのアクセシビリティを相対的に評価することを目的とした。さらに、童ら⁴¹⁾の手法を用いて地表面最大速度 (PGV) に換算した値 (66cm/s) を、シミュレーションにおける地震強度とした。

第四章で用いた GIS データ (p. 42~43, 第四章 2.1 節) を使用して、緊急活動シミュレーションモデルを実行した。具体的には、実構造・建築年に基づく建物倒壊確率モデル (p. 14, 第二章 2.2 節) を用いて、建物単位で全壊判定を行った。その上で、瓦礫流出確率に基づく道路閉塞確率モデル (p. 17, 第二章 3.2 節) を用いて、東京都内の道路閉塞状況を推定した。本章では、道路リンクの有効幅員が 4.0m/0m 未満となった場合に、緊急車両/救急隊員の通行が不能である (閉塞) と想定した。このとき、道路上における中央分離帯の存在は考慮しない。大地震時の緊急輸送道路における道路閉塞がアクセシビリティに及ぼす影響については、第三章および第四章で議論したため、本章では、緊急輸送道路の通行機能は確保されている (閉塞しない) と仮定する。さらに、緊急車両のみでなく、救急隊員などによる歩行移動も想定し、緊急輸送道路上の交差点から地域内の各建物への移動経路を推定した (p. 18, 第二章 4 節)。

以上の準備の下で、緊急活動シミュレーションを $K=100$ 回実行した。第三章と第四章では、それぞれ、評価対象となる緊急活動の活動圏域 (東京都, または、二次医療圏) ごとにアクセシビリティ評価を行なった。本章では、緊急輸送道路以外の道路を用いた、狭域的な緊急活動を評価することを目的とするため、緊急輸送道路で囲まれた区域を 1 つの空間単位と考え、アクセシビリティ指標 (p. 59~60, 式(14)~(17)) を算出する (図 5.2-1)。しかし、以下の条件を満たすエリアは、例外処理を行った。

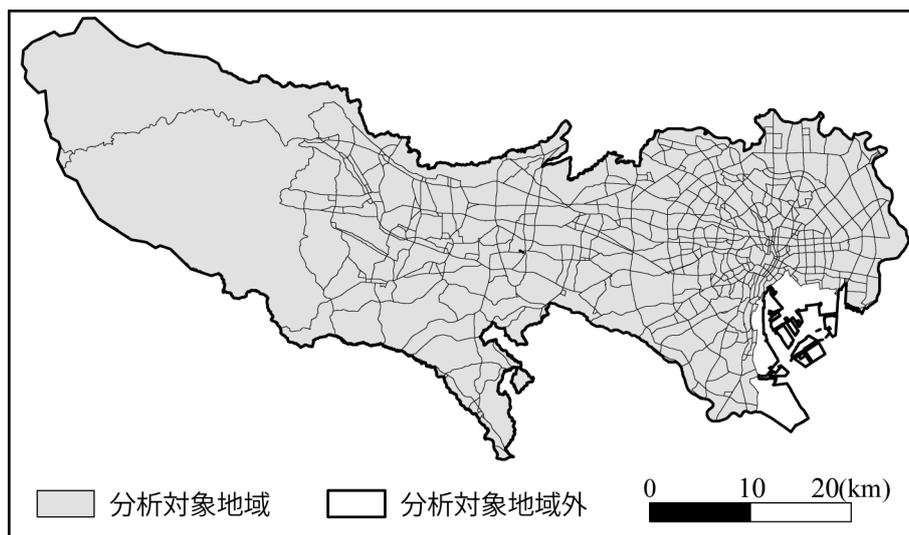


図 5.2-1 アクセシビリティ指標の集計単位

• **湾岸部エリア（図 5.2-2）**

本章では、緊急輸送道路の通行機能は確保されているという想定の下、緊急輸送道路以外の道路（その他の道路）を用いた移動に関するアクセシビリティ評価を行う。そのため、主に緊急輸送道路のみで道路網が構成される湾岸部においては、アクセシビリティ評価を行うことが困難である。それらのエリアにおけるアクセシビリティ評価は、第三章および第四章で行った。

• **緊急輸送道路が密に整備されているエリア（図 5.2-3）**

緊急輸送道路が密に整備されているエリアにおいては、緊急輸送道路に囲まれたエリア内の建物数が少なくなるため、特定の建物の結果に大きく依存してしまう。集計結果の信用性を確保するため、集計単位内の道路リンク数が 10 本未満のエリアは、隣接エリアと統合した。

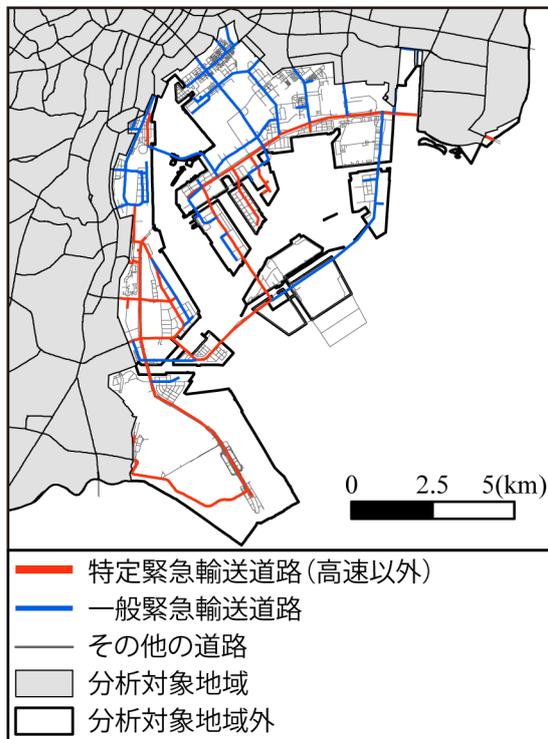


図 5.2-2 湾岸エリアにおける道路分布

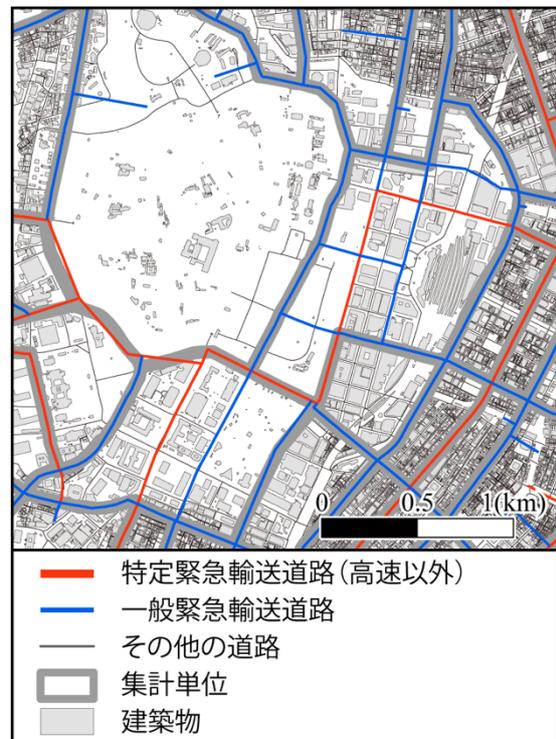


図 5.2-3
緊急輸送道路が密に整備されているエリア
における道路分布

3. 物的被害とアクセシビリティ指標の空間分布

3.1 物的被害の空間分布

建物全壊率（エリア内の総建物数に占める全壊建物数の割合）と道路閉塞率（エリア内の総道路リンク数に占める閉塞した道路リンク数の割合）の空間分布を図 5.3.1-1 から図 5.3.1-3 に示してある。市部では、建物全壊率の高いエリアが一部見受けられるものの、道路閉塞率は全体的に低い。一方、区部においては、いずれの指標も高い値を示しており、特に、墨田区・荒川区・台東区・品川区西部などの木造住宅密集地域^{注8}で深刻な値を示している（例えば、area 1～3）。

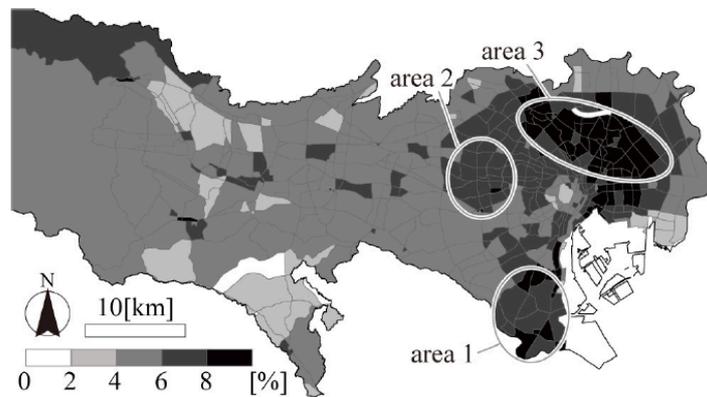


図 5.3.1-1 建物全壊率の空間分布（計 100 回のシミュレーションの平均値）

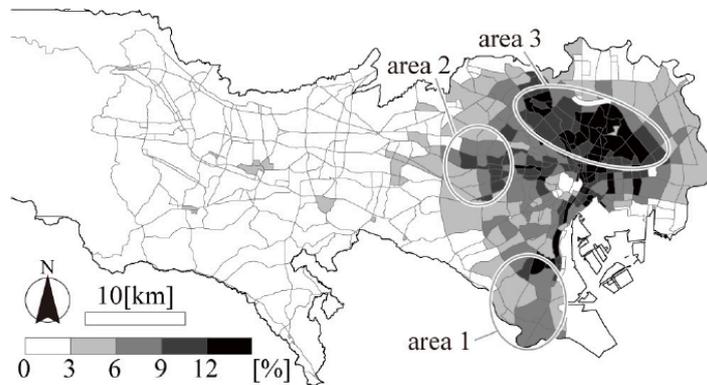


図 5.3.1-2 道路閉塞率の空間分布（歩行活動時：有効幅員 W_e が 0m 未満）
（計 100 回のシミュレーションの平均値）

^{注8} 木造住宅密集地域とは、狭隘な道路が複雑に入り組み、老朽化した木造建物が高密度に立ち並ぶ地域である。

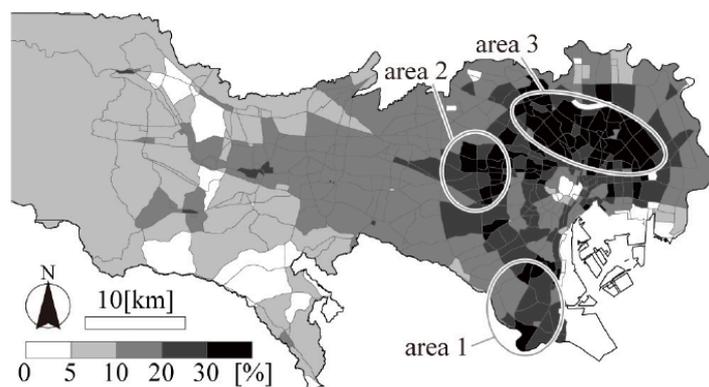


図 5.3.1-3 道路閉塞率の空間分布（車両活動時：有効幅員 W_e が 4.0m 未満）
（計 100 回のシミュレーションの平均値）

3.2 アクセシビリティ指標の空間分布

各アクセシビリティ指標の空間分布を図 5.3.2-1 から図 5.3.2-3 に示してある。地域到達率は、東京都全域において、高い値を示している（図 5.3.2-1）。すなわち、緊急輸送道路上の交差点から、エリア内の建物までの到達可能性は、おおよその地域において確保されていることがわかる。

一方、増加移動時間および地域到達確率は、東京都区部、特に、木造住宅密集地域（例えば、area 1～3）において、悪い値を示している（図 5.3.2-2、図 5.3.2-3）。木造住宅密集地域のような、道路閉塞が発生しやすいエリアでは、円滑な緊急活動が困難となり、アクセシビリティが阻害される可能性が高いことが分かる。

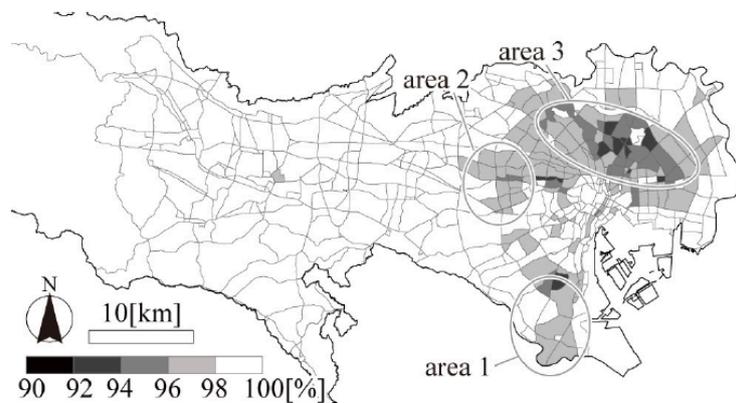


図 5.3.2-1 地域到達率の空間分布（計 100 回のシミュレーションの平均値）

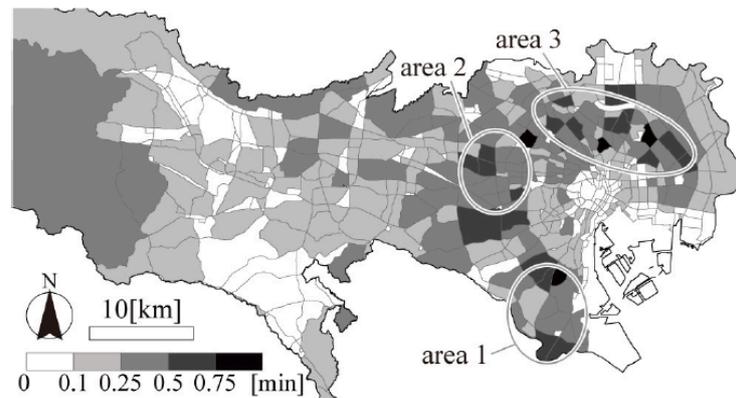


図 5.3.2-2 増加移動時間の空間分布（計 100 回のシミュレーションの平均値）

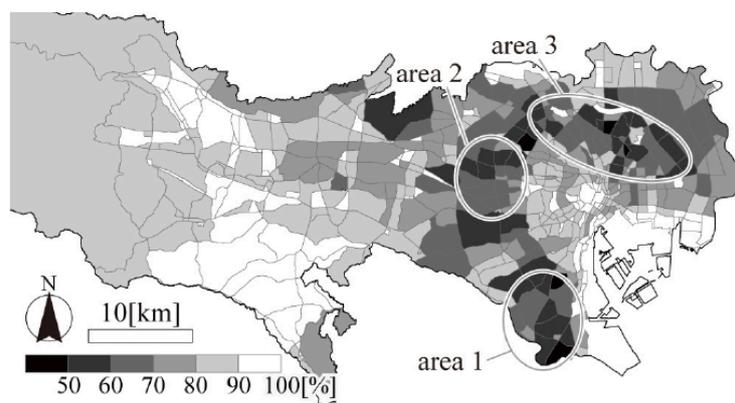


図 5.3.2-3 地域到達確率の空間分布 (計 100 回のシミュレーションの平均値)

4. アクセシビリティ指標と市街地性状の関連分析

4.1 市街地特性変数を用いた重回帰分析

どのような要因（市街地性状）が、物的被害率（建物全壊率・道路閉塞率）やアクセシビリティ指標（地域到達率，増加移動時間，地域到達確率）に影響を及ぼすのかを同定するため，表 5.4.1-1 に示した説明変数（市街地特性変数）を用いて，物的被害率とアクセシビリティ指標を記述する重回帰モデルを構築する。ステップワイズ法を用いて説明変数を選択した上で，選択された説明変数間の多重共線性および理論的整合性を確認した。なお，本章では，説明変数間の *VIF* が 10.0 以下の場合，多重共線性は見られないと判断した⁵⁰⁾。

また，被説明変数と説明変数が非線形の関係にある場合，その関係を線形化するための変数変換を行う（例えば，対数を取るなど）。なお，変形不能な説明変数が含まれるデータはデータセットから除外した。

表 5.4.1-1 モデル式に用いる市街地特性変数一覧
(いずれも活動圏域内で集計した値)

<i>l</i>	名称	説明
1	旧耐震建物率	全建物に占める，新耐震基準 ^{注9)} を満たしていない（旧耐震基準に基づき建てられた）建物の割合
2	旧耐震木造建物率	全建物に占める，新耐震基準 ^{注9)} を満たしていない（旧耐震基準に基づき建てられた）木造建物の割合
3	グロス建ぺい率	各街区内に存在する建物総面積の，街区面積に対する割合の平均値
4	建物高さ	建物高さの平均値（階）
5	沿道建築物数	沿道建築物の中で，道路境界線からの距離が 4.0m 未満の建物数の平均値（棟/本）
6	狭隘道路率	全道路リンク数に占める，道路幅員が 4.0m 未満の道路リンク数の割合
7	広幅員道路率	全道路リンク数に占める，道路幅員が 8.0m 以上の道路リンク数の割合
8	道路長さ	道路リンクの長さ（交差点間距離）の平均値（m）
9	ノードリンク比	各交差点に接続する道路リンク数の平均値

注9 1981（昭和 56）年 6 月以降に建築確認通知を出した建築物は，建築基準法に基づく現行の耐震基準（新耐震基準）を満たしている。これらの建築物は，大規模の地震動（震度 6 強~7 に達する程度）に対しても，倒壊・崩壊のおそれがないと考えられている。

4.2 物的被害モデルの推定結果

物的被害率（建物全壊率 Y_1 、道路閉塞率（車両活動時） Y_2 、道路閉塞率（歩行活動時） Y_3 ）の重回帰モデル式を、式(18)から式(20)に示してある。

$$Y_1 = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2, \quad (18)$$

$$y_2 = \ln(Y_2/(1 - Y_2)) = a_0 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6X_6 + a_7X_7, \quad (19)$$

$$y_3 = \ln(Y_3/(1 - Y_3)) = a_0 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6X_6, \quad (20)$$

ここで、 X_i が説明変数、 a_i が推定パラメータである。

建物全壊率と道路閉塞率（車両活動時および歩行活動時）のモデルは、いずれも記述力が高い（図 5.4.2-4～図 5.4.2-6）。建物全壊率は、旧耐震建物率と旧耐震木造建物率によって良好に記述できる（表 5.4.2-1）。また、道路閉塞率は、建物性状に関する変数（旧耐震木造建物率、グロス建蔽率、建物高さ）のみでなく、道路性状に関する変数（沿道建築物数、狭隘員道路率、広幅員道路率）からも影響を受けることが分かる（表 5.4.2-2、表 5.4.2-3）。

表 5.4.2-1 建物全壊率の推定式における説明変数と推定パラメータ (N = 533)

l	説明変数	非標準化係数	標準偏回帰係数	σ	t	VIF
		B	β			
0	(定数)**	$-8.81 \cdot 10^{-3}$	$6.13 \cdot 10^{-2}$	$1.08 \cdot 10^{-3}$	-8.15	
1	旧耐震建物率**	$1.11 \cdot 10^{-1}$	$1.19 \cdot 10^{-2}$	$2.55 \cdot 10^{-3}$	43.7	1.21
2	旧耐震木造建物率**	$7.19 \cdot 10^{-2}$	$7.50 \cdot 10^{-3}$	$2.62 \cdot 10^{-3}$	27.5	1.21

**p < .01.

表 5.4.2-2 道路閉塞率 (車両活動時: 有効幅員 W_e が 4.0m 未満) の推定式における説明変数と推定パラメータ (N = 533)

l	説明変数	非標準化係数	標準偏回帰係数	σ	t	VIF
		B	β			
0	(定数)**	-5.90	-1.68	$8.39 \cdot 10^{-2}$	-70.4	
2	旧耐震木造建物率**	3.45	$3.60 \cdot 10^{-1}$	$1.66 \cdot 10^{-1}$	20.7	2.61
3	グロス建ぺい率**	1.93	$2.08 \cdot 10^{-1}$	$3.01 \cdot 10^{-1}$	6.41	9.08
4	建物高さ**	$2.15 \cdot 10^{-1}$	$2.57 \cdot 10^{-1}$	$2.28 \cdot 10^{-2}$	9.44	6.41
5	沿道建築物数**	$2.32 \cdot 10^{-1}$	$4.07 \cdot 10^{-1}$	$1.34 \cdot 10^{-2}$	17.3	4.80
6	狭隘道路率**	$6.84 \cdot 10^{-1}$	$1.08 \cdot 10^{-1}$	$9.96 \cdot 10^{-2}$	6.86	2.14
7	広幅員道路率**	$-7.89 \cdot 10^{-1}$	$-1.37 \cdot 10^{-1}$	$1.17 \cdot 10^{-1}$	-6.74	3.58

**p < .01.

表 5.4.2-3 道路閉塞率（歩行活動時：有効幅員 W_e が 0m 未満）の推定式における説明変数と推定パラメータ（ $N = 532$ ）

l	説明変数	非標準化係数 B	標準偏回帰係数 β	σ	t	VIF
0	(定数) *	-9.16	-3.29	1.23×10^{-1}	-74.5	
2	旧耐震木造建物率**	3.46	3.61×10^{-1}	2.44×10^{-1}	14.2	2.60
3	グロス建ぺい率**	3.94	4.23×10^{-1}	434×10^{-1}	9.07	8.78
4	建物高さ**	3.64×10^{-1}	4.35×10^{-1}	3.20×10^{-2}	11.4	5.91
5	沿道建築物数**	2.39×10^{-1}	4.18×10^{-1}	1.94×10^{-2}	12.3	4.66
6	狭隘道路率**	5.38×10^{-1}	8.51×10^{-2}	1.24×10^{-1}	4.33	1.55

** $p < .01$.

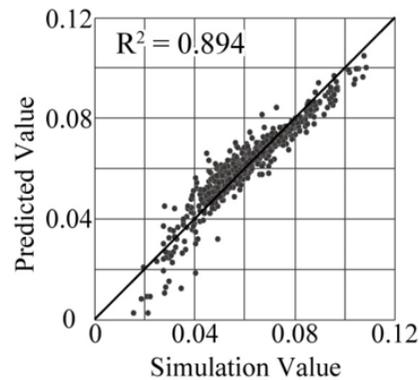


図 5.4.2-4 建物全壊率の推定精度

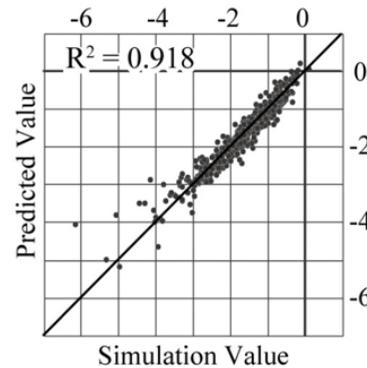


図 5.4.2-5 道路閉塞率（車両活動時：有効幅員 W_e が 4.0m 未満）の推定精度

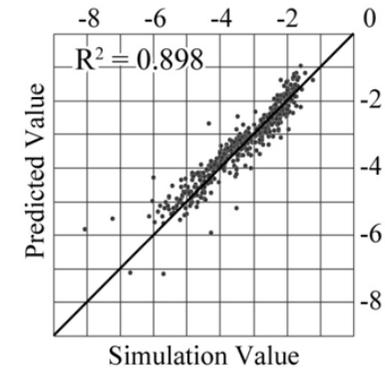


図 5.4.2-6 道路閉塞率（歩行活動時：有効幅員 W_e が 0m 未満）の推定精度

** $p < .01$.

4.3 アクセシビリティ評価モデルの推定結果

各アクセシビリティ指標（地域到達率 Y_4 、増加移動時間 Y_5 、地域到達確率 Y_6 ）の重回帰モデル式を、式(21)から式(23)に示してある。

$$y_4 = \ln(Y_4/(1 - Y_4)) = a_0 + a_2X_2 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6X_6, \quad (21)$$

$$y_5 = \ln Y_5 = a_0 + a_2X_2 + a_5X_5 + a_6X_6 + a_7X_7 + a_9X_9, \quad (22)$$

$$y_6 = \ln(Y_6/(1 - Y_6)) = a_0 + a_2X_2 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6X_6 + a_7X_7 + a_9X_9, \quad (23)$$

ここで、 X_l が説明変数、 a_l が推定パラメータである。

いずれのアクセシビリティ指標の重回帰モデル式も、高い記述力を持つ（図 5.4.3-4～図 5.4.3-6）。

いずれの重回帰モデル式においても、道路閉塞率との関係が強い市街地性状（ $l=2, 5, 6$ ）が説明変数として選択されていることから、閉塞道路が緊急活動の円滑性を阻害する要因であることが確認できる（表 5.4.3-1～表 5.4.3-3）。また、増加移動時間および地域到達確率の重回帰モデル式には、説明変数として、ノードリンク比（ $l=9$ ）が選択されている（表 5.4.3-2, 表 5.4.3-3）。ノードリンク比が小さいエリアでは、目的地点への移動経路上で道路閉塞に遭遇した場合、選択可能な迂回経路が少なく、大幅な迂回を強いられる可能性が高い。そのため、このようなエリアにおいては、増加移動時間および地域到達確率が悪い値を示すことが分かる。

表 5.4.3-1 地域到達率の推定式における説明変数と推定パラメータ(N = 530)

<i>l</i>	説明変数	非標準化係数 <i>B</i>	標準偏回帰係数 β	σ	<i>t</i>	VIF
0	(定数)**	8.96	4.49	$1.32 \cdot 10^{-1}$	68.1	
2	旧耐震木造建物率**	-3.83	$-3.98 \cdot 10^{-1}$	$3.24 \cdot 10^{-1}$	-11.8	2.48
4	建物高さ**	$-2.51 \cdot 10^{-1}$	$-3.00 \cdot 10^{-1}$	$2.53 \cdot 10^{-2}$	-9.91	2.01
5	沿道建築物数**	$-4.07 \cdot 10^{-1}$	$-7.06 \cdot 10^{-1}$	$1.61 \cdot 10^{-2}$	-25.3	1.71
6	狭隘道路率**	$-5.55 \cdot 10^{-1}$	$-8.74 \cdot 10^{-2}$	$1.60 \cdot 10^{-1}$	-3.47	1.39

***p* < .01.

表 5.4.3-2 増加移動時間の推定式における説明変数と推定パラメータ(N = 533).

<i>l</i>	説明変数	非標準化係数 <i>B</i>	標準偏回帰係数 β	σ	<i>t</i>	VIF
0	(定数)**	-6.24	-2.10	$2.80 \cdot 10^{-1}$	-22.3	
2	旧耐震木造建物率**	2.44	$2.54 \cdot 10^{-1}$	$3.45 \cdot 10^{-1}$	7.07	1.93
5	沿道建築物数**	$1.87 \cdot 10^{-1}$	$3.30 \cdot 10^{-1}$	$1.97 \cdot 10^{-2}$	9.52	1.78
6	狭隘道路率**	1.32	$2.09 \cdot 10^{-1}$	$2.37 \cdot 10^{-1}$	5.57	2.09
7	広幅員道路率**	-1.21	$-2.10 \cdot 10^{-1}$	$2.27 \cdot 10^{-1}$	-5.34	2.31
9	ノードリンク比**	$8.13 \cdot 10^{-1}$	$2.11 \cdot 10^{-1}$	$1.19 \cdot 10^{-1}$	6.80	1.43

***p* < .01.

表 5.4.3-3 地域到達確率の推定式における説明変数と推定パラメータ(N = 533).

l	説明変数	非標準化係数 B	標準偏回帰係数 β	σ	t	VIF
0	(定数)**	8.07	1.74	2.59×10^{-1}	31.2	
2	旧耐震木造建物率**	-2.95	-3.08×10^{-1}	3.36×10^{-1}	-8.80	2.47
4	建物高さ**	-1.14×10^{-1}	-1.37×10^{-1}	3.26×10^{-2}	-3.50	3.07
5	沿道建築物数**	-2.33×10^{-1}	-4.09×10^{-1}	1.85×10^{-2}	-12.6	2.12
6	狭隘道路率**	-1.24	-1.96×10^{-1}	2.05×10^{-1}	-6.05	2.11
7	広幅員道路率**	1.04	1.81×10^{-1}	2.42×10^{-1}	4.31	3.57
9	ノードリンク比**	-1.40	-3.64×10^{-1}	1.03×10^{-1}	-13.5	1.45

** $p < .01$.

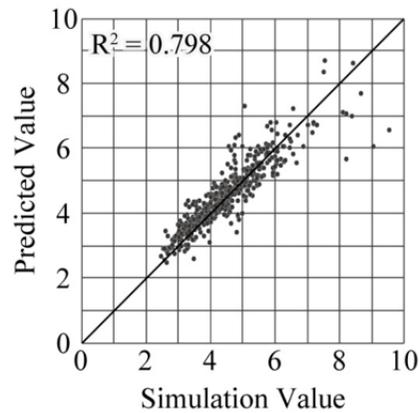


図 5.4.3-4 地域到達率の推定精度

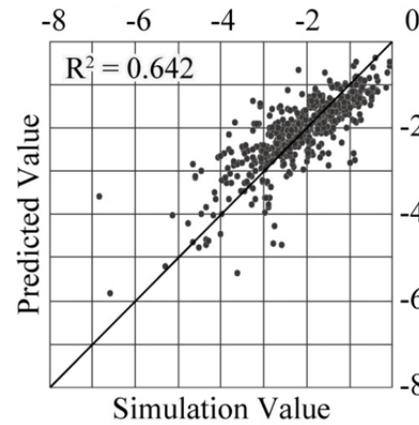


図 5.4.3-5 地域到達率の推定精度

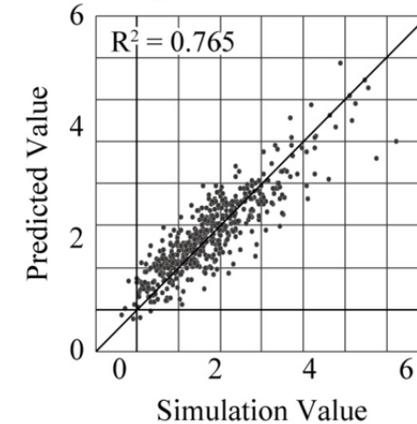


図 5.4.3-6 増加移動時間の推定精度

4.4 地域到達確率と市街地性状の関連分析

本節では、推定した重回帰モデル式(式(23))を用いて、各市街地特性変数を改善した場合の地域到達確率の向上効果を把握する。例えば、旧耐震建物率や狭隘道路率の改善は、それぞれ、建物の耐震改修の促進⁵¹⁾や狭隘道路拡幅事業⁵²⁾に相当する。なお、ノードリンク比や建物高さは、重回帰モデル式において、有意な説明変数であるが(表 5.4.3-3)、それらの値の改善を目的とした市街地整備事業は少ない。そこで、本章では、旧耐震木造建物率 ($l=2$)、沿道建築物数 ($l=5$)、狭隘道路率 ($l=6$)、および、広幅員道路率 ($l=7$) という4つの市街地性状と地域到達確率の関係に着目し、関連分析を行う。また、道路拡幅(狭幅員道路率および広幅員道路率の改善)においては、沿道建築物の除却やセットバックが必要になるが、ここでは、市街地特性変数間の相互関係は、考慮せずに議論を進める。

ある市街地特性変数を改善した場合に得られる地域到達確率の向上効果は、各エリアの市街地特性に応じて異なると考えられる。例えば、広幅員道路が十分に整備されているエリアでは、一部の道路を拡幅することによる地域到達確率向上効果は限定的であると考えられる。そこで、地域到達確率が低い値を示すエリアの代表的な特徴を抽出するため、それらのエリアを市街地特性変数の値が類似するグループに分類する。具体的には、地域到達確率の値が下位 20%を示すエリア(計 106 エリア)を、 k -means 法を用いて、 J を最小化するような、4つのグループに分類する(式(24)、式(25))。

$$J = \sum_{m=1}^k \sum_{x_Z \in C_m} |x_Z - c_m|^2, \quad (24)$$

where

$$x_Z = (u_{1Z}, u_{5Z}, u_{6Z}, u_{7Z}), \quad (25)$$

ここで、 k はクラスター数、 c_m はクラスター C_m の重心、 u_{lZ} はグループ Z における市街地特性変数 l の平均値である。

エリアの分類結果を図 5.4.4-1 および表 5.4.4-2 に示してある。グループ A では、旧耐震木造建物率 ($l=2$) が非常に高い値を示している。グループ B では、道路性状 ($l=6, 7$) は相対的に良い値を示すが、沿道建築物数が多い傾向にある。グループ C では、道路幅員は狭いが ($l=6, 7$)、建物性状 ($l=2, 5$) が相対的に良い値を示す。グループ D では、道路幅員は狭いが ($l=6, 7$)、旧耐震木造建物率 ($l=2$) は低い傾向にある。

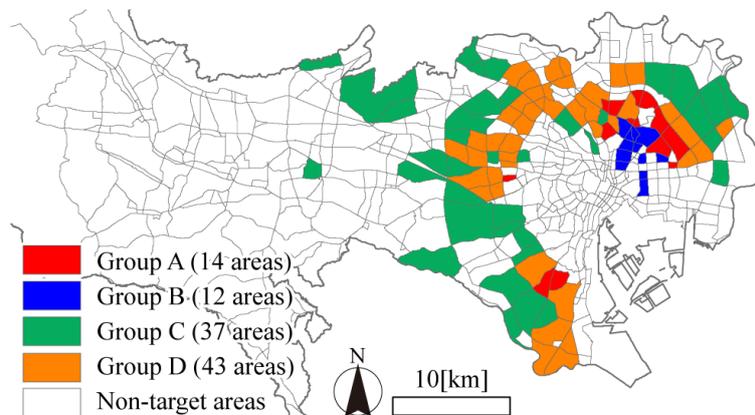


図 5.4.4-1 k -means 法に基づくエリアの分類結果

表 5.4.4-2 各グループにおける市街地特性変数 l の平均値

l	説明変数	Group A	Group B	Group C	Group D
2	旧耐震木造建物率	49.9%	41.6%	33.8%	40.8%
5	沿道建築物数	8.55 棟	8.65 棟	6.68 棟	7.65 棟
6	狭隘道路率	42.0%	19.9%	42.6%	40.5%
7	広幅員道路率	3.6%	31.7%	3.5%	4.6%

次に、推定した重回帰モデル式 (式(23)) を用いて、各市街地特性変数の値を改善させた場合の、地域到達確率の向上効果を推定した (図 5.4.4-3～図 5.4.4-6, 表 5.4.4-7)。地域到達確率の向上効果は、グループの市街地性状に応じて異なることが分かる。例えば、建物性状が相対的に良い値を示す Group C では、旧耐震建物の耐震化促進による地域到達確率の向上効果が小さくなることがわかる (表 5.4.4-7)。また、グループ A において地域到達確率を 1.0 ポイント改善するためには、旧耐震木造建物率を 1.4 ポイント、狭隘道路率を 3.2 ポイント、広幅員道路率を 3.9 ポイント、もしくは、沿道建築物数を 0.17 棟改善する必要がある。

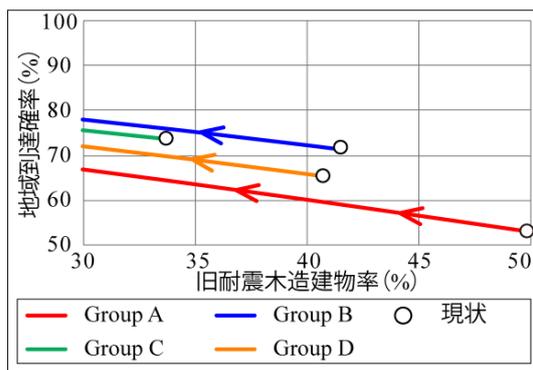


図 5.4.4-3

地域到達確率と旧耐震木造建物率の関係

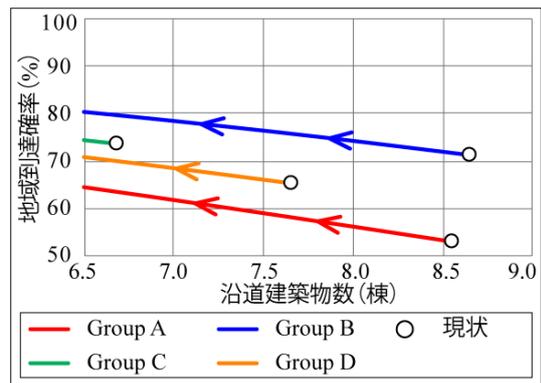


図 5.4.4-4

地域到達確率と沿道建築物数の関係

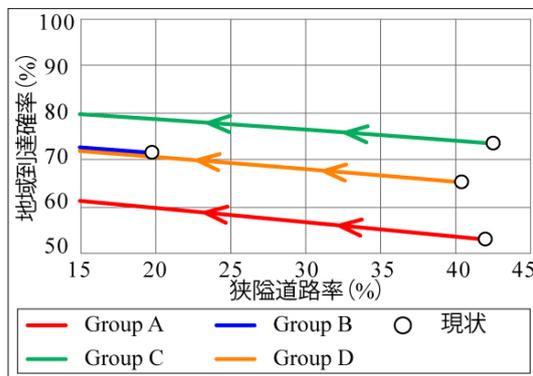


図 5.4.4-5

地域到達確率と狭隘道路率の関係

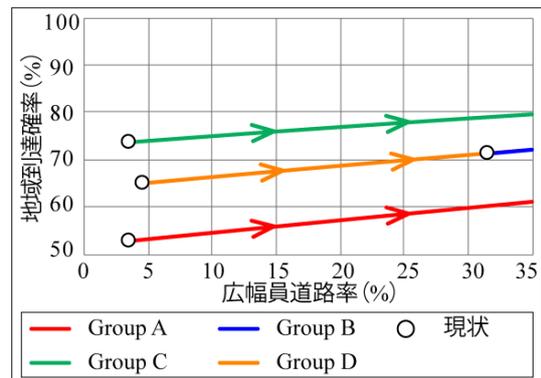


図 5.4.4-6

地域到達確率と広幅員道路率の関係

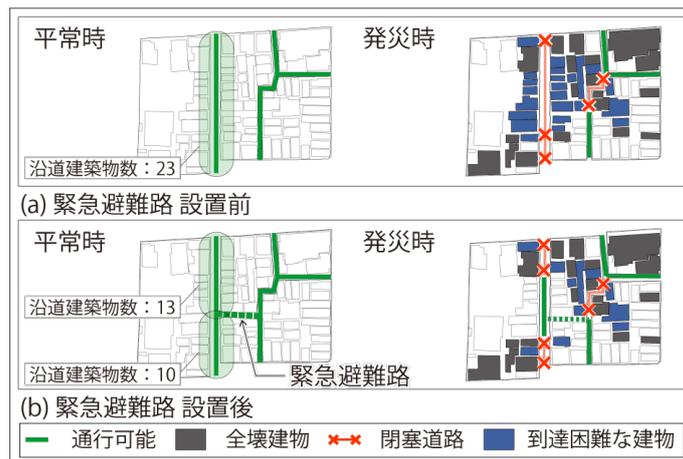
表 5.4.4-7 地域到達確率を1ポイント向上させるために必要な市街地特性変数の改善値

l	説明変数	Group A	Group B	Group C	Group D
2	旧耐震木造建物率	1.4%	1.4%	1.9%	1.5%
5	沿道建築物数	0.17 棟	0.18 棟	0.24 棟	0.19 棟
6	狭隘道路率	3.2%	3.4%	4.5%	3.6%
7	広幅員道路率	3.9%	4.0%	5.3%	4.3%

すなわち、建物の耐震化（旧耐震木造建物率の改善）や道路拡幅（狭隘道路率および高幅員道路率の改善）などの一般的な市街地整備事業と同様に、道路リンクあたりの沿道建築物数を減少させることも、効果的な施策であること分かる。沿道建築物数を改善する整備施策としては、例えば、空き家の除去や緊急避難路の設置⁵³⁾が考えられる。緊急避難路とは、緊急時に周囲の居住者が通り抜け可能となるよう、土地建物権利者が庭先や建物と建物の間を整備して設けた避難路である（図 5.4.4-8、図 5.4.4-9）。例えば、木造住宅密集地域内の沿道建築物数が多い道路リンク（沿道建築物数：23 棟）において、緊急輸送道路を設けた場合、道路リンクが 2 本に分割され、結果として、沿道建築物数が少なくなる（沿道建築物数：10 棟および 13 棟）。



図 5.4.4-8
緊急避難路の例
(著者撮影)



5. 第五章のまとめ

緊急輸送道路以外の道路（以下、その他の道路）を用いた地域内移動を想定した、各建物へのアクセシビリティ評価、および、市街地性状との関連分析を行なった。東京都全域を対象に、緊急活動シミュレーションモデルを実行し、道路閉塞状況および緊急輸送道路上の交差点から各建物までの移動経路を推定した。緊急輸送道路で囲まれた空間単位で建物ごとのシミュレーション結果を集計し、アクセシビリティ指標（地域到達率、増加移動時間、地域到達確率）を算出した。

物的被害率（建物全壊率・道路閉塞率）は、木造住宅密集地域において、特に悪い値を示した。これらの地域では、アクセシビリティ指標も、悪い値を示す傾向にあった。

次に、重回帰分析を用いて市街地性状と物的被害およびアクセシビリティ指標の関連を定量的に把握した。道路閉塞率の説明変数として選択された市街地性状は、アクセシビリティ指標の説明変数としても選択される傾向にある。すなわち、道路閉塞率とアクセシビリティ指標には、強い相関があることを示した。

さらに、地域到達確率の値が下位 20%を示すエリアを、市街地特性変数の値が類似するグループに分類した上で、推定された重回帰モデル式を用いて、市街地特性変数を改善した場合の地域到達確率向上効果について検討した。その結果、地域到達確率の向上効果は、地域の市街地性状に応じて異なることを示した。例えば、旧耐震木造建物率が非常に高い値を示すグループ A において地域到達確率を 1.0%改善するためには、旧耐震木造建物率を 1.4%、狭隘道路率を 3.2%、広幅員道路率を 3.9%、もしくは、沿道建築物数を 0.17 棟改善する必要があることを示した。すなわち、沿道建築物の耐震化および道路拡幅以外にも、空き家の除却や緊急避難路の設置も効果的であることを示した。

第六章
結論

1. 本研究のまとめ

各章の要約を以下に示す。

【第一章：序論】

第一章では、大地震時における都市内移動の円滑性を確保する上で、道路網の機能的階層性を高めることの重要性を整理した。次に、大地震時におけるアクセシビリティ評価およびアクセシビリティの改善施策に関する既往研究を概説した。最後に、道路の交通機能に着目し、大地震時における拠点施設へのアクセシビリティ、および、市街地整備事業がアクセシビリティに及ぼす影響を、定量的に評価する手法を確立することが、本研究の目的であると述べた。

【第二章：緊急活動シミュレーションモデルの構築】

第二章では、大地震時の建物倒壊に起因する道路閉塞を考慮した、緊急車両の拠点施設への空間移動を記述するシミュレーションモデルを構築した。本シミュレーションモデルは、建物倒壊を記述する「建物倒壊シミュレーションモデル」、建物倒壊に起因する道路閉塞を記述する「道路閉塞シミュレーションモデル」、および、緊急車両の空間移動を記述する「緊急車両移動モデル」から構成される。建物倒壊シミュレーションモデルおよび道路閉塞シミュレーションモデルについては、複数のモデルが提案されている。第三章から第五章では、各章で使用可能な GIS データに適したモデルを選択した上で、緊急活動シミュレーションモデルを実行する。

【第三章：特定緊急輸送道路のアクセシビリティ評価と沿道建築物耐震化の効果】

第三章では、特定緊急輸送道路沿道建築物の耐震化とアクセシビリティの関係について分析した。まず、現状（平成 27 年 9 月現在）の耐震化率の下では、高速道路から進入した場合であっても、約 3 割の大規模救出救助活動拠点に到達できない可能性があることを示した。次に、極端な 3 種類の耐震化シナリオを想定し、特定緊急輸送道路沿道建築物の耐震化によるアクセシビリティ向上に果たす効果を定量的に評価した。沿道建築物の耐震化により、アクセシビリティは改善されるが、特に、耐震性能の低い沿道建築物を優先的に整備することの効果は大きい。さらに、一般緊急輸送道路と特定緊急輸送道路を用いたアクセシビリティ評価を行い、一般緊急輸送道路は特定緊急輸送道路の機能確保にとって重要な補助的役割を果たすことを示した。

【第四章：大地震発生時におけるアクセシビリティが脆弱な沿道区域の抽出方法】

第四章では、大地震時において拠点施設へのアクセシビリティが脆弱となる沿道区域の抽出方法を提案した。東京都全域において、緊急輸送道路を用いた災害拠点病院へのアクセシビリティ評価を行い、大地震時の物的被害下における孤立リンクに着目したアクセシビリティ指標（リンク孤立率（LI 値）、および、ネットワーク孤立率（NI 値））を算出した。LI 値を用いて、災害拠点病院へのアクセシビリティが脆弱な沿道区域を示した。高い NI 値を示す災害拠点病院が存在する二次医療圏では、医療救護の負荷がアクセシビリティが高い災害拠点病院に集中する可能性が高い。災害拠点病院周辺、および、LI 値が高い値を示す道路リンクの沿道建築物を優先的に耐震化するなど、アクセシビリティを改善するための施策について検討する必要があることを示した。

【第五章：

緊急輸送道路以外の道路を用いたアクセシビリティ評価と市街地性状の関連分析】

第五章では、緊急輸送道路以外の道路を用いたアクセシビリティを評価した上で、市街地性状との関連を分析した。具体的には、まず、東京都全域において、緊急活動シミュレーションを実行し、緊急輸送道路で囲まれた空間単位でアクセシビリティ指標（地域到達率、増加移動時間、地域到達確率）を算出した。次に、重回帰分析を用いて市街地性状と物的被害およびアクセシビリティ指標の関連を定量的に把握した。さらに、推定された重回帰モデル式を用いて、市街地特性変数を改善した場合の地域到達確率向上効果について検討した。その結果、地域到達確率の向上効果は、地域の市街地性状に応じて異なることを示した。沿道建築物の耐震化および道路拡幅以外にも、空き家の除却や緊急避難路の設置も効果的であることを示した。

2. 結論

本研究では、道路の機能分類に着目した上で、大地震時における拠点施設へのアクセシビリティ評価およびアクセシビリティの改善方策について議論した。まず、第二章では、緊急活動シミュレーションモデルを構築した。これにより、大地震時の建物倒壊に起因する道路閉塞下における、緊急車両の都市内移動を記述可能となった。第三章から第五章では、東京都全域を対象に、第二章で構築した緊急活動シミュレーションモデルを用いて、大地震時の拠点施設などへのアクセシビリティを定量的に評価した。緊急輸送道路を用いた評価では、緊急輸送道路の整備が疎である地域において、緊急輸送道路以外の道路（以下、その他の道路）を用いた評価では、木造住宅密集地域において、それぞれ、アクセシビリティが脆弱になる傾向が見られた。すなわち、道路の機能分類に応じた階層（道路階層）ごとに、アクセシビリティが脆弱となる地域が異なることを明らかにした。次に、これらの地域における、市街地整備事業によるアクセシビリティ改善効果を定量的に評価した。緊急輸送道路においては、耐震性能が低い沿道建築物から優先的に耐震化を促進することが効果的であることを示した。さらに、より効果的にアクセシビリティを改善するため、アクセシビリティ脆弱区域を抽出する方法を提案した。これにより、アクセシビリティを確保困難な拠点施設が存在する活動圏域では、施設機能の負荷がアクセシビリティが高い拠点施設に集中する可能性が高いことを明らかにした。その他の道路においては、地域の市街地性状に応じて、アクセシビリティ改善効果は、異なることを示した。また、沿道建築物の耐震化および道路拡幅以外にも、空き家の除却や緊急避難路の設置も効果的であることを示した。

本研究では、道路の沿道建築物が拠点施設へのアクセシビリティに与える影響を把握するため、建物倒壊に起因する道路閉塞のみに着目して議論を行った。しかし、災害時には、建物倒壊以外の物的被害（電柱の倒壊、液状化、もしくは、建物の延焼など）や交通渋滞によって、道路リンクの通行機能が阻害される可能性が極めて高い。本シミュレーションモデルと、これらの事象を記述可能な既往モデル（例えば、54）、55）を連携することで、より多様な事前対策の検討が可能になると考えられる。さらに、本研究で提案したアクセシビリティ評価手法は、市街地整備事業による事前対策だけでなく、大地震発生直後の初動支援にも有効である。例えば、発災時刻における、人口分布や道路閉塞の発生箇所などをリアルタイムに把握することで（例えば、56）、病院などの拠点施設へのアクセシビリティが脆弱となる沿道区域を即座に特定し、災害時活動を円滑するための策を講じることが可能となると考えられる。

一方、本手法を適用するためには、各自治体が、建物や道路に関する詳細な GIS データを整備・更新、維持管理、さらには、提供する体制を確立することが求められる。より実践的な議論を可能とするためには、GIS データにおける属性情報の精緻化も課題である。また、広域な分析対象地域においてシミュレーション分析を行う上では、複数の自治体が作成した GIS データを組み合わせる場合がある。そのため、自治体によって GIS データの持つ属性情報が異なることがないように、一定の基準を設けて、データ整備を行う必要がある。

本研究で提案した手法を用いて、アクセシビリティを定量的に評価することで、道路網の頑健性を高めるような市街地整備の検討が可能となる。本研究の成果が、将来、災害事前対策や発災時対応などにおいて、幅広く活用され、円滑な災害時活動の実現に寄与することを期待したい。

付録

付録 1 物的被害モデルの比較

1.1 物的被害モデルの比較の概要

本研究では、使用可能な GIS データ（建物データおよび道路データ）の有する属性情報に応じた建物倒壊シミュレーションモデルおよび道路閉塞シミュレーションモデルを用いて、建物・道路単位で建物全壊および道路閉塞を推定した（表 7.1.1-1, 図 7.1.1-2）。ここでは、各モデルの推定結果を比較し、それらの特徴および結果の信頼性について検討する。

表 7.1.1-1 緊急活動シミュレーションモデル一覧

建物倒壊シミュレーションモデル	
建物倒壊モデル 1：Is 値に基づく建物倒壊確率モデル	(p. 12, 第二章 2.1 節)
建物倒壊モデル 2：実構造・建築年に基づく建物倒壊確率モデル	(p. 14, 第二章 2.2 節)
道路閉塞シミュレーションモデル	
道路閉塞モデル 1：建物倒壊による道路閉塞判定モデル	(p. 16, 第二章 3.1 節)
道路閉塞モデル 2：瓦礫流出確率に基づく道路閉塞確率モデル	(p. 17, 第二章 3.2 節)

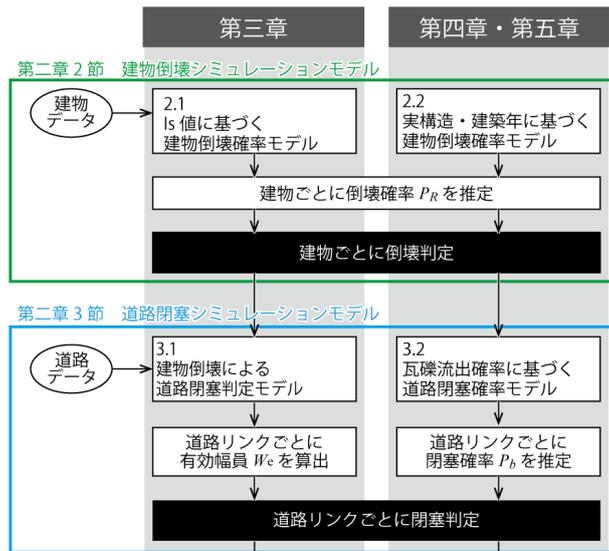


図 7.1.1-2 緊急活動シミュレーションモデルの概要（再掲：p. 9, 図 2.1-1（一部））

1.2 使用データ

各モデルで使用する建物データおよび道路閉塞データの概要を以下に示す。ここでは、特定緊急輸送道路（高速以外）を対象に、建物の全壊状況および道路閉塞状況を比較する。なお、第三章 2.1 節（p. 23～p. 25）および第四章 2.1 節（p. 42～p. 43）において、使用データに関するより詳細な説明を行なっている。

(a) 建物データ

建物倒壊モデル 1 では、耐震診断または耐震改修に関する報告から詳細な属性情報（建物高さ、実構造、建築年月日、セットバック距離、前面道路幅員、対建物、耐震状況、Is 値）が得られている GIS データ（平成 26 年度作成）を用いる。その中から、耐震化促進対象建築物（p. 24, 図 3.2.1-1(b)）を対象に全壊判定を実施し、シミュレーションを実施する。

建物倒壊モデル 2 では、東京都都市計画 GIS データの一部である土地・建物利用現況調査（東京都区部（平成 23 年度作成）⁴⁴⁾および多摩・島しょ地域（平成 24 年度作成）⁴⁵⁾）を用いる（総建物数 2,766,079 棟）（p. 42, 図 4.2.1-1）。このデータは、構造耐震性指標（Is 値）や実構造・建築年に関する属性情報を有していない。そのため、町丁目単位で得られている実構造別・建築年別の建物割合クロス集計表を元に、各建物の実構造および建築年を推定した。その中から、特定緊急輸送道路（高速以外）の沿道建築物（道路境界線から 4.0m 未満に存在する建物）を対象に全壊判定を実施し、シミュレーションを実施する。

(b) 道路データ

道路閉塞モデル 1 では、国土交通省が公開している道路ネットワークデータ（平成 25 年度作成）³⁹⁾をベースとして、不足する道路リンクデータを補完して作成した道路データを使用する（p. 25, 図 3.2.1-3）。なお、本データにおいては、すべての道路リンク上に中央分離帯が設置されていると仮定する。

道路閉塞モデル 2 では、緊急輸送道路などの主要道路だけでなく、細街路も含まれている GIS データ（平成 26 年度作成）を使用する（p. 42, 図 4.2.1-1）。このデータは、道路間の接続関係だけでなく、道路長さや道路幅員などの詳細な属性情報を有する点で優れている。また、国土交通省が公開している道路ネットワークデータ³⁹⁾を参考に、緊急輸送道路に関する属性を付与した。なお、本データにおいては、道路リンク上における中央分離帯の存在を考慮しない。

1.3 建物倒壊モデルの推定結果の比較

本研究では、具体的な想定地震は設定せず、東京湾北部地震および都心南部直下地震の被害想定結果を参考に、すべての地点において計測震度 6.2 の揺れを想定した。さらに、童ら⁴¹⁾の手法を用いて地表面最大速度 (PGV) に換算した値 (66 cm/s) を、シミュレーションにおける地震強度とした。以上の想定のもと、特定緊急輸送道路の沿道建築物のみを対象に、2 種類の建物倒壊モデル (表 7.1.1-1) を用いて、建物単位で全壊判定を行った (表 7.2.3-1)。

建物倒壊モデル 2 で用いた建物データには、Is 値や実構造・建築年に関する属性情報が存在しない。そのため、町丁目単位で得られている実構造別・建築年別割合のクロス集計にもとづき、乱数を用いて、各建物の詳細な属性情報を推定している。東京都の公表³⁸⁾によると、住宅の耐震化率は、83.8% (平成 27 年 3 月末時点)、特定緊急輸送道路沿道建築物の耐震化率は、84.8% (平成 30 年 12 月末時点) と推定されている。つまり、特定緊急輸送道路などの主要道路の沿道においては、建築物の耐震化が比較的進んでいると考えられる。また、建物倒壊モデル 2 で用いた建物データの方が、作成年度が古いため、一部の建物における耐震・改修を考慮できていない。以上に示した理由により、建物倒壊モデル 1 よりも、建物倒壊モデル 2 を使用した場合の方が、特定沿道建築物の全壊状況は深刻になると考えられる。

しかし、各モデルによる建物全壊の推定結果を見ると、建物全壊率 (全建物数に占める全壊建物数の割合) は、建物倒壊モデル 1 において、より深刻な値を示していることが分かる (表 7.2.3-1)。すなわち、どちらのモデル (建物倒壊モデル 1/建物倒壊モデル 2) も、物的被害を過大/過小に評価している可能性が高い。

表 7.1.3-1 各建物倒壊シミュレーションによる推定結果
(計 100 回のシミュレーションに基づく平均値)

	建物倒壊モデル 1	建物倒壊モデル 2
全建物数	4838 棟	4793 棟
全壊建物数	208 棟	161 棟
建物全壊率*	4.3%	3.4%

*全建物数に占める全壊建物数の割合

1.4 道路閉塞モデルの推定結果の比較

前節で推定した建物全壊状況を踏まえて、東京都内の緊急輸送道路の閉塞状況を推定する。道路閉塞モデル1/道路閉塞モデル2による道路閉塞の推定結果を確認する（図7.1.4-1, 図7.1.4-2）。道路閉塞率（シミュレーションの試行回数に占める、道路リンクが閉塞した回数の割合）は、道路閉塞モデル1において、より深刻な値を示していることが分かる。推定結果が、道路閉塞モデル1において、より深刻な値を示した理由として、以下の3点が考えられる。

1. 建物がどのように全壊するかは、破壊箇所が大きく依存する。一般に、耐震診断結果一覧表には、当該建物の各階・各方向（X・Y方向）ごとに得られたIs値が記載される。しかし、本データでは、各建築物に1つのIs値しか得られていない。そこで、最も安全側の評価を行うため、各建物は、このIs値に従って、1階部分で破壊が発生し、道路に向かって全壊すると仮定した。
2. 第四章で用いた道路データでは、道路リンク上における中央分離帯の存在を考慮していない。そのため、第四章（道路閉塞モデル2を用いた場合）の方が、建物全壊下における道路リンクの有効幅員を過小に評価している可能性が高い。
3. 一般に、道路の有効幅員が4.0m以上であれば、緊急車両が通行可能であると考えられる。第四章および第五章では、比較的狭い活動圏域内における、より実質的な活動についてアクセシビリティを評価するため、緊急車両の通行に必要な有効幅員を一般的な値である、4.0mに設定した。しかし、第三章では、隣接県からの大規模な移動を想定しているため、より安全側の評価となるように、緊急車両の通行に必要な有効幅員を6.0mと設定した。

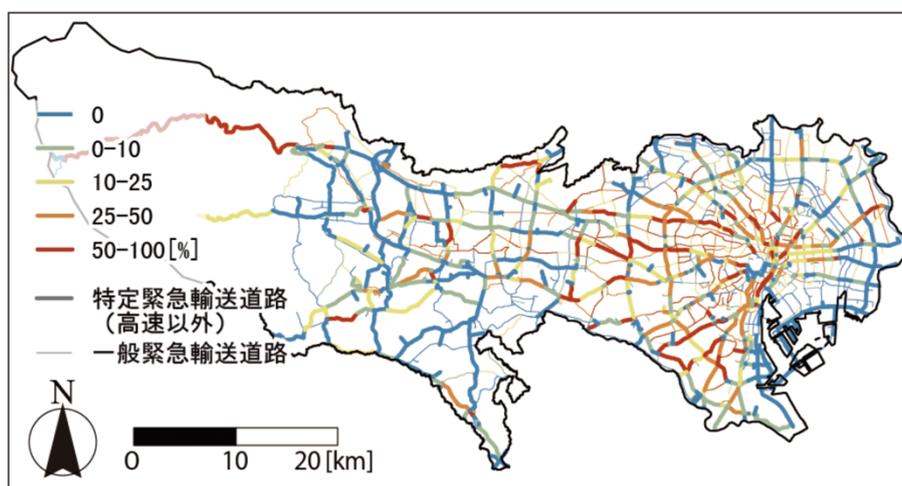


図7.2.4-1 特定緊急輸送道路（高速以外）における道路閉塞率の空間分布
（再掲：図3.3.1-2）

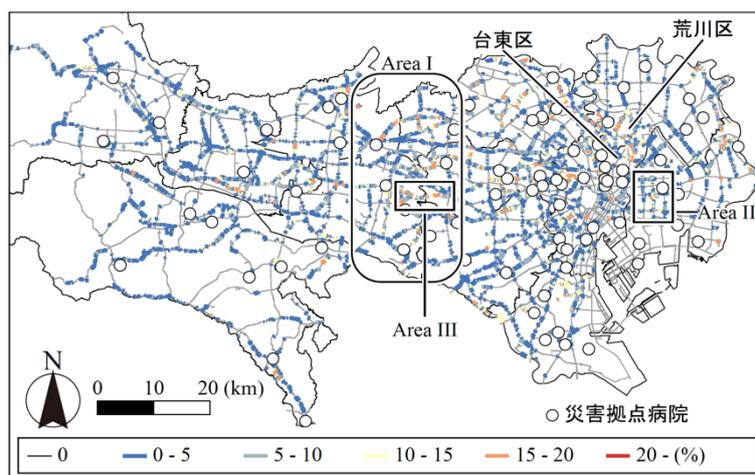


図 7.2.4-2 道路閉塞率の空間分布 (再掲：図 4.3.1-1)

参考文献

- 1) 内閣府：防災情報のページ 阪神淡路大震災教訓情報資料集, http://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/hanshin_awaji/data/detail/1-6-1.html, (2019.12.16 参照)
- 2) 三原淳子：大阪府広域緊急交通路沿道建築物の耐震化促進（耐震改修施策について）, GBRC: General Building Research Corporation, Vol. 38, No. 3, pp.13-15, 2013.7
- 3) 佐藤一郎：これまでの愛知県における耐震まちづくり施策の評価と今後の展開について, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 80, No. 717, pp. 2587-2595, 2015.11
- 4) 東京都：東京における緊急輸送道路沿道建築物の耐震化を推進する条例, http://www.reiki.metro.tokyo.jp/reiki_honbun/ag10141981.html, 2011.3 (2019.12.16 参照)
- 5) 東京都：東京都耐震改修促進計画, http://www.taishin.metro.tokyo.jp/pdf/tokyo/sokushinkeikaku_2.pdf, 2016.3 (2019.12.16 参照)
- 6) Buchanan, C.: Traffic in Towns: A Study of the Long Term Problems of Traffic in Urban Areas, Her Majesty's Stationery Office, 1963.
- 7) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用, 2015.6
- 8) 朝倉康夫, 塩見康博, 宇野伸宏：道路網の階層性と災害時の時間信頼性との関連, 土木学会論文集, No. 583/IV-38, pp. 51-60, 1998.1
- 9) 中山晶一郎：ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便益評価の一考察, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 67, No. 2, pp. 147-166, 2000.
- 10) 朝倉康夫, 柏谷増男, 藤原健一郎：交通ネットワークにおける迂回の限度を考慮した OD ペア間信頼度の指標, 土木学会論文集, No. 555/IV-34, pp. 41-49, 1997.1
- 11) 加知範康, 岑貴志, 加藤博和, 大島茂, 林良嗣：ポテンシャル型アクセシビリティに基づく交通利便性評価指標群とその地方都市への適用, 土木計画学研究・論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 675-686, 2006.9
- 12) Uddin, A. W., 大澤脩司, 藤生慎, 高山純一, 中山晶一郎：緊急輸送道路の災害リスクを考慮した都道府県庁と市町村役場間の到達可能性に関する分析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 72, No. 4, pp.I_756-I_767, 2016.
- 13) 瀬戸裕美子, 宇野伸宏, 塩見康博：非重複経路を考慮したアクセシビリティ指標に基づく医師配置計画モデルの構築, 都市計画論文集, No. 45-3, pp. 487-492, 2010.10
- 14) 原田剛志, 倉内文孝, 高木朗義：リダンダンシーを考慮したアクセシビリティ指標に基づく道路ネットワークの脆弱性評価, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 70, No. 1, pp. I_76-87, 2014.
- 15) Grötschel, M.: Design of survivable networks, Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol.7, pp.617-672, 1995.
- 16) 近藤竜平, 塩見康博, 宇野伸宏：アクセシビリティと連結信頼性を考慮した道路網・医療施設計画モデル, 土木計画学研究・論文集, No. 27, pp. 579-588, 2010.9
- 17) 大澤修司, 藤生慎, 中山晶一郎, 高山純一：地震に対する道路網の脆弱区間評価手法の構築と緊急輸送道路網への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 73, No.4 (地震工学論文集第 36 巻), pp. I_467-I_478, 2017.
- 18) 原田慎也, 栄徳洋平, 戸根智弘, 三木智, 若林拓史：道路の連結信頼性の実用的な評価方法の提案, 土木学会論文集 D3, Vol. 69, No. 5, pp. I_67-I_74, 2013.
- 19) Nagae, T., Fujihara, T. and Asakura, Y.: Anti-seismic reinforcement strategy for anurban road network, Transportation Research Part A: Policy and Practice , Vol. 46, Issue 5, pp. 813-827, 2012.6

参考文献

- 20) 喜多敏春, 近田康夫: 道路ネットワークを考慮した道路構造物耐震補強の優先順位設定におけるゲーム理論の適用, 構造工学論文集, Vol.59A, pp. 244-251, 2013.3
- 21) 南正昭, 高野伸栄, 加賀屋誠一, 佐藤馨一: 拠点的医療施設へのアクセスを 2 系統で保証する道路ネットワーク構造, 土木計画学研究・論文集, Vol.14, pp. 679-686, 1997
- 22) 中里尚央, 辛島一樹, 山元隆稔, 堺俊介, 大貝彰: 特定建築物耐震化促進のための空間データ整備と耐震化優先度の検討 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 都市計画, pp. 933-934, 2014.7
- 23) Oki, T. and Osaragi, T.: Urban improvement policies for reducing human damage in a large earthquake by using wide-area evacuation simulation incorporating rescue and firefighting by local residents, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Planning Support Science for Smarter Urban Futures, Vol.1, pp. 449-468, 2017.
- 24) 久貝壽之, 加藤孝明: 道路閉塞からみた道路網防災性能の構造の解明: パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎研究(その 4), 日本建築学会計画系論文集, Vol. 72, No. 615, pp. 113-120, 2007.5
- 25) 日本道路協会: 道路用語辞典 第 3 版, 丸善, 1997.5
- 26) 林康裕, 鈴木祥之, 宮腰淳一, 渡辺基史: 耐震診断結果を利用した既存 RC 造建築物の地震リスク表示, 地域安全学会論文集, No. 2, pp. 235-242, 2000.11
- 27) 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, No. 527, pp. 189-196, 2000.1
- 28) 国土交通省: 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, <http://www.nilim.go.jp/lab/jdg/soupuro/0.pdf>, 2003.3 (2019.12.16 参照)
- 29) Matsumoto, M. and Nishimura, T.: Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, Vol. 8, No.1. pp. 3-30, 1998.1
- 30) 国土交通省: 建築物の耐震診断及び耐震改修の促進を図るための基本的な方針, <https://www.mlit.go.jp/common/001020211.pdf>, 2006.1 (2019.12.16 参照)
- 31) 日本建築学会: 1978 年宮城県沖地震被害調査報告, 1980
- 32) 東京都: 地震に関する地域危険度測定調査報告書 (第 8 回), https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/bosai/chousa_6/home.htm, 2018.2 (2020.2.28 参照)
- 33) 村尾修, 山崎文雄: 兵庫県南部地震における建物被害の自治体による調査法の比較検討, 日本建築学会構造系論文集, No. 515, pp. 187-194, 1999.1
- 34) 大佛俊泰, 廣川典昭, 沖拓弥: 大地震時における消防隊の到着時間からみた道路閉塞情報収集の有効性日本建築学会計画系論文集, Vol. 80, No. 709, pp. 465-473, 2015. 3
- 35) 大佛俊泰, 沖拓弥: リアルタイム災害情報収集・共有・活用システムの開発, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 82, No. 739, pp. 2451-2459, 2017.9
- 36) Dijkstra, E. W.: A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik, Vol. 1, pp. 269-271, 1959.
- 37) Moore, E. F.: The shortest path through a maze, Proceedings of the International Symposium on the Theory of Switching, Harvard University Press, pp. 285-292, 1959.
- 38) 東京都: 特定緊急輸送道路沿道建築物の耐震化の状況について, <https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2019/07/31/03.html>, (2020.1.19 参照)
- 39) 国土交通省: 国土数値情報 緊急輸送道路, http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N10-v1_1.html, (2019.12.16 参照)
- 40) 東京都防災会議: 東京都地域防災計画 震災編(令和元年修正), <https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/>

- tokyo.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/000/359/2019mokuji.pdf, (2019.12.16 参照)
- 41) 童華南, 山崎文雄: 地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究, Vol. 48, No. 11, pp. 31-34, 1996.11
 - 42) 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 (改訂版), http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000649583.pdf, 2016.6 (2019.12.16 参照)
 - 43) 岸田正博: 東日本大震災における高速道路の被害と復旧状況, コンクリート工学, Vol. 50, No. 1, pp. 45-48, 2012.1
 - 44) 東京都: 東京の土地利用 平成 23 年東京都区部 平成 23 年度土地利用現況調査の概要, http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/seisaku/tochi_c/pdf/tochi_3/tochi_all.pdf?1407, (2019.12.16 参照)
 - 45) 東京都: 東京の土地利用 平成 24 年多摩・島しょ地域 平成 24 年度土地利用現況調査の概要, http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/seisaku/tochi_c/pdf/tochi_4/tochi_all.pdf (2019.12.16 参照)
 - 46) 薄井宏行, 浅見泰司: GIS を用いた建物敷地の接道判定方法に関する研究, CSIS Discussion paper, No.95, pp. 1-6, 2009.4
 - 47) 交通工学研究会: 交通工学ハンドブック, 技報堂出版, 1984
 - 48) 津田圭介, 胡内健一, 許斐信亮: 首都直下地震発生時に想定される緊急対応車両の走行状況の推定, こうえいフォーラム: 日本工営技術情報, No. 21, pp. 37-45, 2013.3
 - 49) 東京都福祉保健局: 東京都災害拠点病院, <http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/iryoku/kyuukyuu/saigai/kyotenbyouinlist.html> (2019.12.16 参照)
 - 50) Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L. and Black, W. C.: Multivariate Data Analysis, 3rd editoin, New York: Macmillan, 1995.
 - 51) 国土交通省: 建築物の耐震改修の促進に関する法律, https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=407AC0000000123_20190625_430AC000000067&openerCode=1, 2019.6 (2019.12.16 参照)
 - 52) 世田谷区: 狭あい道路拡幅整備事業について, <http://www.city.setagaya.lg.jp/kurashi/102/124/379/381/d00014903.html>, 2019.4 (2019.12.16 参照)
 - 53) 足立区: 緊急避難路の整備費用を助成いたします!, <https://www.city.adachi.tokyo.jp/k-chose/kinkyu-hinanro.html>, 2019.4 (2019.12.16 参照)
 - 54) 廣川典昭, 大佛俊泰: 同時多発火災を想定した大規模延焼シミュレーションに基づく延焼危険性指標の提案と消防隊行動支援への活用, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 82, No. 732, pp. 301-310, 2017
 - 55) 大佛俊泰・島田 廉: 平日と休日における都市内滞留者の時空間分布推定と地震被害想定への応用, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 74, No. 635, pp. 145-152, 2017
 - 56) 大佛俊泰, 沖拓弥: リアルタイム災害情報収集・共有・活用システムの開発, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 82, No. 739, pp. 2451-2459, 2017

関連する研究業績

学術雑誌論文（査読あり）

- [1] Osaragi, Toshihiro, Kishimoto, Maki and Oki, Takuya: Assessment of Street Network Accessibility in Tokyo Metropolitan Area after a Large Earthquake, Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data Part 3), Vol. 13, No. 2, pp. 262-271, 2018.3（第二章・第五章に関連）
- [2] Kishimoto, Maki and Osaragi, Toshihiro: Relationships Between Accessibility of Emergency Vehicles and Local Environments in Tokyo Metropolitan Area After a Large Earthquake, Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data Part 4), Vol. 14, No. 3, pp. 489-499, 2019.3（第二章・第五章に関連）
- [3] 大佛俊泰・岸本まき：特定緊急輸送道路のアクセシビリティ評価と沿道建築物耐震化の効果，日本建築学会計画系論文集，Vol. 84, No. 764, pp.2175-2182, 2019.10（第二章・第三章に関連）
- [4] 岸本まき・大佛俊泰：大地震発生時における脆弱アクセシビリティ沿道区域の抽出方法，日本建築学会計画系論文集，査読審査中（第二章・第四章に関連）

国際会議論文（査読あり）

- [5] Kishimoto, Maki, Osaragi, Toshihiro, Oki, Takuya and Hirokawa, Noriaki: Risk of Property Collapse and Assessment of Evacuation Risk in Tokyo Metropolitan Area at a Large Earthquake, The 20th AGILE Conference on Geo-Information Science (AGILE 2017), Proceedings of the 20th AGILE Conference on Geo-Information Science (USB), No. 79, 2017.5（第二章・第五章に関連）
- [6] Kishimoto, Maki and Osaragi, Toshihiro: Accessibility Assessment of Emergency Vehicles in Tokyo Metropolitan Area after a Large Earthquake, ISPRS Technical Commission IV Symposium 2018, ISPRS TC IV Mid-term Symposium “3D Spatial Information Science – The Engine of Change”, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XLII-4, pp. 303-308, 2018.9（第二章・第五章に関連）

国内会議論文（査読なし）

- [7] 岸本まき，大佛俊泰，沖拓弥，廣川典昭：大地震時における避難危険度と市街地性状との関連分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 261-262, 2016.8（第五章に関連）
- [8] 岸本まき，大佛俊泰，沖拓弥，廣川典昭：東京都における大地震時の避難危険度と市街地性状との関連分析，地理情報システム学会講演論文集 (CD-ROM)，Vol. C-2, No. 3, 2016.10（第五章に関連）
- [9] 大佛俊泰，岸本まき，沖拓弥：災害時活動困難度の評価について 大地震時における道路網の機能的階層性を考慮した災害時活動困難度 その1，日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol. F-1, pp. 891-892, 2017.9（第一章に関連）
- [10] 岸本まき，大佛俊泰，沖拓弥：東京都全域における災害時活動困難度の推定 大地震時における道路網の機能的階層性を考慮した災害時活動困難度 その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，Vol. F-1, pp. 893-894, 2017.9（第一章に関連）
- [11] 岸本まき，大佛俊泰，廣川典昭：特定緊急輸送道路の沿道建築物耐震化とアクセシビリ

- ティ評価, 地理情報システム学会講演論文集 (CD-ROM), Vol. B-6, No. 1, 2017.10 (第三章に関連)
- [12] 岸本まき: 大地震時における道路網の機能的階層性を考慮した災害時活動困難度について, 2018年 都市住宅学会学生論文コンテスト, 都市住宅学会, 2018.3 (第一章・第二章に関連)
- [13] 岸本まき, 大佛俊泰, 沖拓弥: 道路網の機能的階層性からみた大地震時における緊急車両のアクセシビリティについて, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. F-1, pp. 1047-1048, 2018.9 (第一章に関連)
- [14] 岸本まき, 大佛俊泰: 一般緊急輸送道路の沿道建築物耐震化とアクセシビリティ評価, 地理情報システム学会講演論文集 (CD-ROM), Vol. B-2, No. 2, 2018.10 (第四章に関連)
- [15] 岸本まき, 大佛俊泰: 一般緊急輸送道路を用いた緊急車両のアクセシビリティの効率的な改善方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1047-1048, 2019.9 (第四章に関連)
- [16] 岸本まき, 大佛俊泰: 大地震発生時における災害拠点病院へのアクセシビリティからみた脆弱な沿道区域の抽出方法, 地理情報システム学会講演論文集 (CD-ROM), Vol. D-4, No. 5, 2019.10 (第四章に関連)

受賞歴

- 地理情報システム学会 優秀発表賞, 2016.10 (研究業績[8])
- 地理情報システム学会 優秀発表賞, 2017.10 (研究業績[11])
- 都市住宅学会 学生論文コンテスト 修士論文部門優秀賞, 2018.3 (研究業績[12])
- 東京工業大学 建築学科同窓会 冬夏賞, 2018.3
- ISPRS Technical Commission IV Symposium 2018 ISPRS Best Oral Presentation Award, 2018.10 (研究業績[6])
- ISPRS Technical Commission IV Symposium 2018 ISPRS Recipient of The ISPRS Foundation (TIF) Travel Grant to attend, 2018.10 (研究業績[6])
- 日本建築学会 若手優秀発表, 2019.1 (研究業績[13])
- 地理情報システム学会 ポスターセッション賞, 2019.10 (研究業績[16])

謝辞

この論文は、筆者が大佛研究室に在籍した学部4年からの5年間の研究成果をまとめたものです。本研究を遂行するにあたり、多くの方々からご指導ならびにご助言、ご協力を賜りました。お世話になった全ての方々に深く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、ご指導賜りました東京工業大学環境・社会理工学院教授 大佛俊泰博士に心よりの感謝を申し上げます。大佛教授には、学部時代から博士課程まで、研究の進め方から研究者の基盤となる様々なご指導を賜りました。大佛教授のもとで学び、そして研究を行えたことを心から光栄に思います。誠にありがとうございます。

副査として論文審査を頂きました、藤井晴行教授、坂田弘安教授、斎尾直子准教授、沖拓弥准教授に、感謝申し上げます。ご多忙の中、本論文全体を通して詳細に査読していただき、的確なご指摘と有益なコメントを多数頂戴致しました。心より感謝いたします。また、沖拓弥准教授には、日頃から、研究成果に関する多くの議論を交わしたのみでなく、人生の先輩として、多くの相談に乗っていただきました。心から感謝いたします。

また、日常の議論を通じて多くの示唆を頂きました東京工業大学大佛研究室の皆様にも、深く感謝いたします。皆さんと議論・談笑した時間は、研究生活を続ける上で大きな活力となりました。特に、廣川典昭博士に御礼申し上げます。本論文に関係する様々な知見を賜り、研究遂行上重要なことを多く気づかせていただきました。ここに深く感謝いたします。

多忙な日々を共に乗り越えてくれた夫に感謝します。最後に、博士進学のかっけを与えてくれ、度々激励の言葉をかけて頂いた父と、博士課程進学を後押ししてくれ、常に明るく支えてくれた母に最大限の感謝を示します。

2020年2月17日

東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系
岸本まき