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

METHOD FOR EXTRACTING VULNERABLE ACCESSIBILITY ROADSIDE AREAS AFTER A
LARGE EARTHQUAKE田頭 まき^{*1}, 大佛 俊泰^{*2}*Maki TAGASHIRA and Toshihiro OSARAGI*

In order to reduce human casualty after a large earthquake, it is important to secure the smooth and rapid activities of emergency vehicles (e.g., ambulance services). However, there is a risk that road blockages will obstruct emergency activities and lead to the secondary damage. In this paper, we propose new accessibility indices to evaluate the accessibility of emergency transportation roads after a large earthquake. Moreover, performing the simulation that we have previously constructed, we extract the vulnerable roadside areas with poor accessibility to disaster base hospitals in Tokyo Metropolitan. Finally, we discuss the effective countermeasures to improve the accessibility indices.

Keywords : *large earthquake, accessibility assessment, link isolation ratio, network isolation ratio, emergency transportation road, disaster base hospital*

大地震, アクセシビリティ評価, リンク孤立率, ネットワーク孤立率, 緊急輸送道路, 災害拠点病院

1. はじめに

(1) 研究の背景

首都直下地震の発生が切迫する中, 大地震発生時の災害時活動(広域避難, 救急消火活動, 緊急物資の輸送, 復旧復興活動など)を支える重要なインフラストラクチャである緊急輸送道路^{注1)}の通行機能(アクセシビリティ)の確保は, 多くの地方自治体に取り組む喫緊の課題である。例えば, 東京都は, 令和7年度までに, 特定緊急輸送道路沿道建築物の耐震化率を, 現状(令和元年12月時点)の85.9%⁴⁾から100%まで改善することを目標としている^{1),2),3)}。このように, 各地方自治体は, 耐震化率や耐火率, 道路の拡幅整備率などを整備目標に設定し, 市街地整備に取り組んでいるが, これらの指標から, 大地震時のアクセシビリティを直接評価することは困難である。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。筆者らは, これまで, 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の有用性を示すことを目的に, 東京都全体で, マクロな視点から緊急輸送道路のアクセシビリティ評価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について, 定量的な検討を行ってきた⁵⁾。しかし, 市街地整備に関する, より具体的な議論を行うためにも, 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などの局所的な特性に関する詳細な分析が必要である。

本稿では, 災害時にアクセシビリティが阻害される可能性が高い緊急輸送道路の沿道区域を抽出することで, 緊急輸送道路を用いたアクセシビリティ評価を, ミクロスケール(拠点施設単位・道路リ

ンク単位)に行うことを目的とする。なお, 本稿では, 前稿⁵⁾と同様, 広域的な移動に伴う目的地までの到達可能性の視点からアクセシビリティ指標を定義し, 「緊急輸送道路の機能」という包括的な概念を評価する。

従来の研究の多くは, 特定のODペア間における緊急車両の移動性に着目し, 到達可能性や移動の非効率性の視点からアクセシビリティ評価を行なっている。その中でも, 瀬戸ら⁶⁾, 原田ら⁷⁾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 network*⁸⁾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。しかし, これらの研究では, 特定のODペア間の移動における到達不能, また, 大幅な迂回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)を特定するまでには至っていない。

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。大澤ら⁹⁾は, 建物倒壊, 橋梁の損傷, さらに, 斜面・切土の崩壊を物的被害として考慮して, 大地震時における重要拠点間の移動性を評価している。具体的には, 緊急車両の移動活動を記述可能なシミュレーションを用いて, 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。なお, 建物データに関する詳細な属性情報が得られていないため, 建物倒壊や道路閉塞の発生確率を精緻に評価しているとは言い難い。この研究は, アクセシ

^{*1} 東京工業大学環境・社会理工学院 助教・博士(工学)

^{*2} 東京工業大学環境・社会理工学院 教授・博士(工学)

Assist. Prof., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.
Prof., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

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¹⁰⁾は、緊急車両による重要拠点への移動に用いられる道路リンク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、厳密な計算を行なっていない。つまり、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。

(2) 研究の目的

本稿では、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、活動拠点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。具体的には、まず、大地震時の緊急活動において、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抽出するアクセシビリティ指標を提案する。次に、前稿⁵⁾で構築した、緊急輸送道路を用いた緊急車両の空間移動を記述する緊急車両シミュレーションモデルを改良し、東京都全域を分析対象地域としてシミュレーションを実行することで、災害拠点病院¹²⁾への移動を想定したアクセシビリティ評価を行う。さらに、それらの沿道区域におけるアクセシビリティを改善させるための方策について検討する。

大地震時には、建物全壊だけでなく、高架・橋脚の落下、液状化、道路のひび割れや電柱の倒壊など、様々な物的被害が想定される。また、交通渋滞の影響も無視することはできない。しかし、ここでは、前稿⁵⁾と同様に、よりシンプルな想定の下で議論を行うため、沿道建築物の全壊に起因する道路閉塞のみに着目する。

2. アクセシビリティ評価指標の構築

大地震時において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抽出するためのアクセシビリティ指標を提案する。大地震時には、より多くの活動拠点へ到達可能な沿道区域ほど、アクセシビリティが高いと考えられる。そこで、緊急車両の活動圏内に存在する全活動拠点 (N 箇所) に占める到達可能な活動拠点 (n 箇所) の割合 $p (=n/N)$ を用いてアクセシビリティの評価を行う。なお、本稿では、交差点間を繋ぐ道路を道路リンク、到達可能である活動拠点の割合が p 未満である道路リンクを孤立リンクと定義する。例えば、3 箇所の活動拠点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 (Fig. 1(a))。この時、 $p=2/3$ における孤立リンクを求めると、Fig. 1(a) 中央の図の点線部分となる。

本稿では、リンク孤立率 (以下、LI 値 ; The value of Link Isolation ratio) とネットワーク孤立率 (以下、NI 値 ; The value of Network Isolation ratio) という 2 つのアクセシビリティ指標を提案する (Fig. 1(b))。LI 値は「全シミュレーション試行 (K 回) の内、道路リンク i から到達可能である活動拠点の割合が p 未満である回数の割合」、NI 値は「孤立リンクの総延長が道路網の総延長に占める割合」と定義する。LI 値は、道路リンク単位で、NI 値は、道路網単位でアクセシビリティを評価する指標である。これらの指標を用いることで、広域な分析対象地域において、活動拠点へのアクセシビリティが脆弱な沿道区域を抽出することが可能となる。

Fig. 1 Definition of accessibility indices

3. アクセシビリティ評価のための緊急車両シミュレーションモデルの概要

緊急輸送道路を用いた緊急車両の空間移動を記述するシミュレーションモデルの概要を、Fig. 2 に示してある。本モデルは、道路閉塞モデルと緊急車両移動モデルから構成される。なお、本稿で用いる緊急車両シミュレーションモデルは、前稿⁵⁾で構築したモデルにおいて、道路閉塞モデルの精緻化、および、緊急活動モデルの高速化 (計算負荷の軽減) を行い、改良したモデルである。

(1) 道路閉塞モデル

道路閉塞モデルでは、沿道建築物の全壊状況に基づき、道路リンクごとの閉塞状況を推定する。まず、兵庫県南部地震 (1995 年) の実被害データに基づく構造別 (木造・RC 造・S 造・軽量 S 造) および建築年別 (木造 5 区分、その他の構造は 3 区分) の建物被害関数¹²⁾を用いて、建物 i に被災ランク R 以上の被害が発生する確率 $P_R(i)$ を推定する (Fig. 3(a))。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) を用いており¹³⁾、回帰係数 (λ , ξ) の値は、東京都の報告¹⁴⁾を参考に設定した。その上で、建物ごとに推定した全壊確率 $P_R(i)$ を用いて、一様乱数によって全壊有無を判定する (Fig. 4(b))。なお、前稿⁵⁾では、Is 値に基づく建物倒壊確率モデル¹⁵⁾を用いて、建物ごとに倒壊確率を推定したが、本稿では、使用可能な GIS データの属性情報を考慮し、実構造・建築年に基づく建物全壊確率モデル¹²⁾を用いる。次に、各道路リンクの閉塞状況を判定する。前稿⁵⁾では、建築物が倒壊して、前面道路を閉塞させるという現象をモデル化し、各道路リンクの閉塞状況を判定した。本稿では、沿道建築物の前面道路側への瓦礫流出量を考慮し、リンクの閉塞をモデル化¹⁶⁾した上で、各

Fig. 2 Overview of simulation model

道路リンクの閉塞状況を判定した。具体的には、全壊した沿道建築物による瓦礫の飛散状況から、全壊建物 i の前面道路 j が通行可能である確率 $f_i(j)$ を推定し、各道路リンクの閉塞確率 $P_b(j)$ を推定する (Fig. 3(b))。その上で、各道路リンクの閉塞確率 $P_b(j)$ を用いて、一様乱数によって閉塞有無を判定する (Fig. 4(d))。本稿では、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) と想定する。

(2) 緊急車両移動モデル

緊急車両移動モデルでは、道路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 (各道路リンク) から目的地 (活動拠点) への到達可否を推定する。前稿⁵⁾で構築した緊急車両移動モデルでは、Dijkstra 法¹⁷⁾を用いて、出発地点から目的地への到達可否および移動経路を推定した。しかし、本稿では、出発地点から目的地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ため、Dijkstra 法に変わって、幅優先探索¹⁸⁾を用いる。これによって、各活動拠点へ到達可能な道路リンクの抽出に要する計算負荷を、大幅に軽減することが可能となる。この時、活動拠点への到達可能な経路が存在しない道路リンクについては、到達不能であると判定する。

4. 緊急車両シミュレーションにおける使用データと設定条件

(1) 使用データ

分析対象とする沿道建築物、緊急輸送道路、および、活動拠点 (災害拠点病院) のデータに関する概要を Fig. 5, Fig. 6 に示してある。

建築物については、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^{19),20)}を用いる (対象建物数 102,087 棟) (Fig. 5(b))。このデータでは、各建築物の所在地や建物高さは得られているが、実構造や建築年などの詳細な属性情報が得られていない。そのため、本稿では、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、各建築物の詳細な属性を推定する。なお、本稿では、薄井らの建物敷地の接道に関する研究²¹⁾を参考に、道路境界線から 4.0m 未満に存在する建築物を沿道建築物と見なす (Fig. 5(b)(c))。

アクセシビリティが脆弱な沿道区域の抽出を行う上では、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。そこで、本稿では、通行機能の確保が特に急務である緊急輸送道路のみの利用を想定した緊急車両シミュレーションを実行する。なお、緊急輸送道路以外の道路リンクの利用を想定したアクセシビリティ評価については、別途、議論を行う²²⁾。

Fig. 3 Road blockage model

Fig. 4 Estimation of road blockage

Fig. 5 Overview of building and road data

緊急輸送道路については、道路長さや道路幅員などの情報が含まれている GIS データ (対象リンク数 26,954 本, 対象ノード数 26,158 個) に、国土交通省が公開している道路ネットワークデータ²³⁾を参考に、緊急輸送道路に関する属性を付与した (Fig. 5(a))。

活動拠点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¹¹⁾ (Fig. 6)。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。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²⁴⁾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。

(2) シミュレーションの設定条件

一般に、地震の被害想定では、首都直下地震や東京湾北部地震などの具体的な地震を想定し、被害を推定することが多い。しかし、このような想定下では、物的被害やアクセシビリティ脆弱区域の発生分布が、震源位置に近い地域において、より深刻となり、震源の想定に大きく依存した評価となる。一方、具体的な地震を想定せず、全ての地域で一律の揺れを想定する場合、各地域における道路リンクと沿道建築物との関係を、震源位置に関係なく評価することが可能となる。本稿では、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するため、全ての地域で一律の揺れを想定する¹²⁾。具体的には、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において、震源位置付近の地域では、震度 6 強の強い震度が予想されることを参考に、すべての地点において計測震度 6.2 (震度 6 強の中間値) の揺れを想定した。さらに、童ら²⁵⁾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。

緊急車両シミュレーションモデルを用いて、建築物単位で全壊判定を行い、緊急輸送道路の閉塞状況を推定した。緊急車両は、緊急輸送道路を用いて、各災害拠点病院へ移動すると想定した。災害時における医療救護活動は、該当する二次医療圏内の災害拠点病院が担うと仮定し、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 i から到達可能である二次医療圏 A 内の災害拠点病院の割合が p_A 未満であった回数の割合」を、NI 値は「二次医療圏 A における孤立リンクの総延長 ($l_A(p_A)$) が、二次医療圏 A 内の道路網の総延長 (L_A) に占める割合 ($l_A(p_A) / L_A$)」を示している。以上の準備の下で、緊急車両シミュレーションを $K=100$ 回実行した。

5. 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

(1) 道路閉塞率の空間分布

緊急輸送道路における道路閉塞率の空間分布を Fig. 8(a)(b) に示してある。23 区北部 (Fig. 8(b)) や 23 区西部 (Fig. 8(b)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 (Fig. 7(a))。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

Fig. 6 Overview of disaster base hospital and secondary healthcare service area

Fig. 7 Spatial distributions of road blockage ratio and LI ratio

塞率は低い傾向にある。

(2) LI 値の空間分布

道路リンクが、いずれの災害拠点病院へも到達不能な場合の LI 値 (p_{min}) について検討する。なお、本稿では、二次医療圏内の全災害拠点病院 (N 箇所) に占める到達可能な災害拠点病院 (n 箇所) の割合 $p (=n/N)$ の最小値 ($n=1$) を、 $p_{min} (=1/N)$ と定義する。LI 値 (p_{min}) と道路閉塞率の差についての度数分布、および、累積相対度数分布を Fig. 7(b) に示してある。LI 値 (p_{min}) は、全体の 50.0% の道路リンクで道路閉塞率よりも高い値を示し、全体の 15.5% の道路リンクで、20.0 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 (p_{min}) は、道路閉塞率よ

Fig. 8 Spatial distributions of road blockage ratio and LI ratio

りも高い値を示すことがわかる。次に、緊急輸送道路の LI 値 (p_{min}) の空間分布を Fig. 8(c)(d) 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 (Fig. 8(a)~(d))。LI 値 (p_{min}) 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った、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エリアでは (Fig. 8(d) 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 (p_{min}) 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エリアでは、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 (Fig. 9(a)(b))。

(3) 災害拠点病院ごとの NI 値

各災害拠点病院へのアクセシビリティに着目して求めた NI 値を Fig. 10 に示してある。69 箇所 (全体の 86.3%) の災害拠点病院において、NI 値は 20.0% 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 (Fig. 10(a)(b))。NI 値が特に高い値を示す災害拠点病院では、複数の移動経路が選択可能である (3 本以上の道路リンクが接続する) 交差点までの距離が長い。そのため、災害拠点病院周辺で道路閉塞が発生した場合、迂回経路が存在せず、災害拠点病院へ到達が不能となる可能性が高い (Fig. 9(c)(d))。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。

(4) 二次医療圏ごとの NI 値

Fig. 9 Spatial distributions of road blockage ratio and LI ratio in partial areas

Fig. 10 NI ratio of disaster base hospital

二次医療圏ごとに p の値を変化させながら求めた NI 値を、Fig. 11 に示してある。西多摩や北多摩北部などの二次医療圏では、NI 値 ($p_{\min}$) が高い値を示す (Fig. 11 ⑧⑫)。これらの二次医療圏では、いずれの災害拠点病院へも到達不能な沿道区域が発生し、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（区南部や区西北部など）では、一部の災害拠点病院へのアクセスが困難となる (Fig. 11 ②⑤)。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、二次医療圏ごとに 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。

6. まとめ

本稿では、活動拠点へのアクセシビリティが大地震時に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（LI 値）および、ネットワーク孤立率（NI 値））を提案した。次に、前稿⁵⁾で構築した大地震時の道路閉塞状況を道路リンク単位で記述するための道路閉塞モデルと緊急車両の空間移動を記述する緊急車両移動モデルを組み合わせた緊急車両シミュレーションモデルを改良した。その上で、東京都全域において、地表面最大速度（PGV）66 cm/s の揺れを想定したシミュレーションを実行し、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。

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。特に、緊急輸送道路の整備が疎であるエリアでは、

Fig. 11 Transition of NI ratio in secondary healthcare service area

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、医療救護の負荷が少数の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、アクセシビリティの改善施策について検討する必要がある。

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、建物全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、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、重症者の発生分布や災害拠点病院の病床数（受け入れ可能人数）に大きく依存する。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、災害拠点病院ごとの受け入れ重傷者数、および、収容キャパシティの超過により受け入れ不能となる重傷者数などについての、より具体的な分析が必要である。これらについては、今後の課題としたい。

本稿は、地理情報システム学会論文集²⁶⁾における発表内容をもとに、新たな分析を加え、全面的に書き改めたものである。

注

注 1) 各地方自治体は、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ている。さらに、東京都では、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築物（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^{1),2),3)}。

注 2) 大地震時のアクセシビリティの評価方法としては、具体的な震源地（特定の想定地震）を設定して、その地震の影響を評価する方法（方法 1）、震源地をランダムに多数想定し、これらの影響を平均値で評価する方法（方法 2）、全ての地点において一律の揺れを想定して評価する方法（方法 3）が考えられる。方法 1 は、具体的な想定地震がアクセシビリティに及ぼす影響を直接的に評価することができる。しかし、震源地から遠い地域には影響が及ばないため、局所的な評価となり、東京都全域について評価したい場合には不向きといえる。方法 2 では、東京都全域を偏りなく評価することは可能であるが、地震の影響の程度が平滑化され、被害の様相が過小評価される危険性がある。方法 3 では、東京都全域が震源地に近い場所と同程度に

強く揺れるという過大な想定であるため、地震強度の地域差は反映されず、被害の様相は過大評価となる可能性がある。しかし、本稿では、東京都全域を移動するような広域移動ではなく、二次医療圏内での空間移動について検討することから、地震強度の地域差は大きく影響しないと判断して、方法3を採用することとした。

参考文献

- 1) Tokyo Metropolitan Government.: Promoting the Seismic Resistance of Buildings, http://www.taishin.metro.tokyo.jp/pdf/tokyo/sokushinkeikaku_2.pdf, 2016. 3 (accessed 2019.9.29), (in Japanese)
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 (2019.9.29 参照)
- 2) Tokyo Metropolitan Government.: Regulation to Promote Seismic Retrofit of Buildings along the Emergency Transportation Roads, http://www.reiki.metro.tokyo.jp/reiki_honbun/ag10141981.html, 2011. 3 (accessed 2019.9.29), (in Japanese)
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 (2019.9.29 参照)
- 3) Tokyo Metropolitan Government.: Further Strategy on Promotion of the Seismic Resistance of Buildings along the Specific Emergency Transportation Roads, http://www.taishin.metro.tokyo.jp/pdf/tokyo/consideration_houkoku.pdf, 2018.5 (accessed 2020.3.4), (in Japanese)
東京都：特定緊急輸送道路沿道建築物の耐震化に向けた更なる促進策について, http://www.taishin.metro.tokyo.jp/pdf/tokyo/consideration_houkoku.pdf, 2018.5, (2020.3.4 参照)
- 4) Tokyo Metropolitan Government.: Seismic Status of Buildings along the Specific Emergency Transportation Roads, http://www.taishin.metro.tokyo.jp/tokyo/topic04_0112.html, 2020.12 (accessed 2020.3.4), (in Japanese)
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, http://www.taishin.metro.tokyo.jp/tokyo/topic04_0112.html, 2020.12, (2020.3.4 参照)
- 5) Osaragi, T. and Kishimoto, M.: Accessibility Evaluation of Specific Emergency Transportation Roads and Effects of Quake-Resistant-Conversion of Roadside Buildings, *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, Vol. 84, No. 764, pp. 2175-2182, 2019. 10 (in Japanese)
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
- 6) Seto, Y., Uno, N. and Shiomi, Y.: A Physician Allocation Model Based on Accessibility Index Considering Non-overlapping Path, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol. 67, No. 5, pp. I_57-I_68, 2011 (in Japanese)
瀬戸裕美子, 宇野伸宏, 塩見康博：非重複経路数を考慮したアクセシビリティ指標に基づく医療施設配置計画, *土木学会論文集 D3(土木計画学)*, Vol. 67, No. 5, pp. I_57-I_68, 2011.
- 7) Harada, T., Kurauchi, F. and Takagi, A.: Connectivity Vulnerability Evaluation Based on Potential Accessibility Considering a Redundancy of Road Network, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol. 70, No. 1, pp. I_76-87, 2014 (in Japanese)
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.
- 8) Grötschel, M.: Design of survivable networks, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol.7, pp.617-672, 1995.
- 9) Osawa, S., Fujiu, M., Nakayama, S. and Takayama, J.: Development and Application of an Evaluation Method of the Vulnerable Section to the Earthquake of the Road Network, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering)*, Vol. 73, No. 4, pp. 467-478, 2017 (in Japanese)
大澤脩司, 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, pp. 467-478, 2017.
- 10) Harada, S., Eitoku, Y., Tone, T., Miki, S. and Wakabayashi, T.: Practical Evaluation about the Connection Reliability of Road, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol. 69, No. 5, pp. I_67-I_78, 2013 (in Japanese)
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(土木計画学)*, Vol. 69, No. 5, pp. I_67-I_78, 2013.
- 11) Breaux of Social Welfare and Public Health :The Outline of Installation and Operation of Tokyo Disaster Base Hospital, <http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/iryo/kyuukyuu/saigai/kyotenbyouinlist.files/kyoten-yoko.pdf> (accessed 2020.3.4), (in Japanese)
東京都福祉保健局：東京都災害拠点病院設置運営要綱, <https://www.fukushihoken.metro.tokyo.lg.jp/iryo/kyuukyuu/saigai/kyotenbyouinlist.files/kyoten-yoko.pdf> (2020.3.4 参照)
- 12) Murao, O. and Yamazaki, F.:Development of Fragility Curves for Buildings Based on Damage Survey Data of a Local Government after the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, No. 527, pp.189-196, 2000. 1 (in Japanese)
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
- 13) Murao, O. and Yamazaki, F.:Comparison of Building Damage Evaluation by Local Governments after the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, No. 515, pp.187-194, 1999. 1 (in Japanese)
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
- 14) Tokyo Metropolitan Government.: Community Earthquake Risk Assessment Study (8th Edition), https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/bosai/chousa_6/home.htm, 2018.2 (accessed 2020.3.4), (in Japanese)
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 (2020.3.4 参照)
- 15) Hayashi, Y., Suzuki, Y., Miyakoshi, J. and Watanabe, M.: Seismic Risk Evaluation of Existing RC Buildings Based on Seismic Performance Indices, *Journal of Social Safety Science*, No. 2, pp. 235-242, 2000.11 (in Japanese)
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
- 16) Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Developments of Technology and Evaluation index of Disaster Mitigation for planning Local Areas, <http://www.nilim.go.jp/lab/jdg/soupuro/0.pdf>, 2003. 3, (accessed 2018.8.22), (in Japanese).
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 (2018.8.22 参照)
- 17) Dijkstra, E. W.: A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, *Numerische Mathematik*, Vol. 1, pp. 269-271, 1959.
- 18) 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.
- 19) Tokyo Metropolitan Government. : Land Use in Tokyo Tokyo 23 Wards 2011Edition Overview of Land Use Survey for FY 2011, http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/seisaku/tochi_c/pdf/tochi_3/tochi_all.pdf?1407 (accessed 2019.7.18)
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 (2019.7.18 参照)
- 20) Tokyo Metropolitan Government. : Land Use in Tokyo Tama and Island Areas 2012 Edition Overview of Land Use Survey for FY 2012, http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/seisaku/tochi_c/pdf/tochi_4/tochi_all.pdf (accessed 2019.7.18)
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 (2019.7.18 参照)
- 21) Usui, H. and Asami, Y.: Study on Methods of Judging Adjacency of Lots to Roads by Using GIS, *CSIS Discussion paper*, No.95, 2009. 4 (in Japanese)
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, 2009. 4
- 22) Kishimoto, M. and Osaragi, T.: Relationships Between Accessibility of Emergency Vehicles and Local Environments in Tokyo Metropolitan Area After a Large Earthquake, *Journal of Disaster Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 489-499, 2019. 3
- 23) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: National Land Numerical Information Emergency Transportation Road, http://nlftp.mlit.go.jp/ksj-e/gml/datalist/KsjTmplt-N10-v1_1.html (accessed 2019.2.18)
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 (2019.2.18 参照)
- 24) Breaux of Social Welfare and Public Health :Tokyo Disaster Base Hospital, <http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/iryo/kyuukyuu/saigai/kyotenbyouinlist>.

html(accessed 2019.7.3)

東京都福祉保健局 : 東京都災害拠点病院, <http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/iryo/kyuukyuu/saigai/kyotenbyouinlist.html> (2019.7.3 参照)

- 25) Tong, H. and Yamazaki, F.: Relationship between Ground Motion Indices and New JMA Seismic Intensity, *Seisan Kenkyu*, Vol. 48, No. 11, pp. 31-34, 1996. 11(in Japanese)

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

- 26) Kishimoto, M. and Osaragi, T.: Method for Extracting Vulnerable Roadside Areas Based on Accessibility to Disaster Base Hospitals after a Large Earthquake, *Papers and Proceedings of the Geographic Information Systems Association (CD-ROM)*, D-4-5, 2019. 10(in Japanese)

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見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)*, D-4-5, 2019. 10

METHOD FOR EXTRACTING VULNERABLE ACCESSIBILITY ROADSIDE AREAS AFTER A LARGE EARTHQUAKE

Maki TAGASHIRA^{*1} and Toshihiro OSARAGI^{*2}

^{*1} Assist. Prof., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

^{*2} Prof., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

As it is predicted that there is a 70% possibility of an earthquake directly hitting Tokyo metropolitan within the next 30 years, it is an urgent issue to ensure the traffic function of emergency transportation roads (hereafter called "ETR"), which is an important infrastructure that supports emergency activities at the time of a large earthquake (e.g., wide-area evacuation, firefighting activities, ambulance services, etc.). In previous paper, we discussed about the transportation function of ETR after a large earthquake by evaluating the accessibility of ETR and the effects of quake-resistant-conversion of roadside buildings. In this paper, we propose the method for extracting vulnerable accessibility roadside areas, which have high possibility to hinder emergency activities after a large earthquake.

First, to extract the vulnerable roadside areas with poor accessibility, we propose novel indices, Link Isolation ratio (hereafter called "LI ratio") and Network Isolation ratio (hereafter called "NI ratio"). Next, we improve a simulation model, which we had previously constructed. This simulation model is consist of the following two sub-models. The one is the road blockage model that describes the collapse of each roadside building based on the construction year and the structure of each building, and describes the road blockage based on the collapse situation of roadside buildings. The other one is the emergency-vehicle-movement model that describes movement of emergency vehicles to activity bases. Then, performing the simulations, we evaluate the accessibility to disaster base hospitals (total 80 bases) using ETR in Tokyo metropolitan. We examine the simulation results with accessibility indices, LI ratio and NI ratio, which are calculated on the assumption that the medical relief activities are conducted at disaster base hospitals in the corresponding secondary healthcare service area.

LI ratio($p_{\min}$), the possibility of an emergency vehicle cannot access to any disaster base hospital, indicates higher value than road blockage ratio at 50.0% of road links, and there is a difference of 20.0 points or more between these indices at 15.5% of road links. This is because the isolation status of each road link is result of not only its own blockage status but also surrounding situations. From the spatial distribution of the LI ratio($p_{\min}$), we can grasp vulnerable roadside areas with poor accessibility to disaster base hospitals. For instance, it is difficult to secure a detour route when emergency vehicle encounters road blockages in an area with sparse road network. In such areas, isolated links tend to occur over a wide range.

NI ratios($p_{\min}$) exceeds 50.0% at 7 disaster base hospitals (8.8% of the total). In the secondary healthcare service areas with those hospitals, there is a high possibility that the medical relief function is biased toward hospitals with high accessibility. Therefore, it is also important to consider the countermeasures to improve the accessibility to hospitals with poor accessibility. Moreover, NI ratios($p_{\min}$) indicate high value in secondary healthcare service areas such as Nishi-tama and Kita-tama Hokubu. At the time of a large earthquake, there is a possibility that some roadside areas become unreachable to any hospital and patients in those areas may not be able to receive medical relief activities. To improve NI ratios($p_{\min}$) of those areas, there is an urgent need to consider the countermeasures such as quake-resistant-conversion of buildings around disaster base hospitals or road links with high LI ratios.

(2019 年 10 月 8 日原稿受理, 2020 年 5 月 26 日採用決定)