

# 災害時における多重性を考慮した 道路防災機能評価指標の構築

矢野 慎一<sup>1</sup>・柳沼 秀樹<sup>2</sup>・家田 仁<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京大学大学院修士課程 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

E-mail: yano@trip.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学大学院助教 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

E-mail: yaginuma@civil.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

E-mail: ieda@civil.t.u-tokyo.ac.jp

東日本大震災以降、防災の観点から道路ネットワークが持つ必要性や有効性を適切に評価すべく、「道路事業における防災機能の評価手法（暫定手法）」が導入された。当該手法は、三陸縦貫道等の復興事業評価に適用される一方で、評価手法自体に検討すべき事項が残されており、本格的な運用に向けた改良が必須となる。本研究では、暫定手法に関する課題点を実務者との意見交換を通じて抽出し、実務的観点から評価指標の改良を試みた。改良の際には、交通量に依存しない指標を念頭に実施した。具体的には、暫定手法を構成する必要性評価と有効性評価が本質的に同質の概念に基づいている点に着目し、定量的な有効性評価ベースに多重性、すなわち災害時における代替経路の存在を考慮した新たな指標を検討した。くわえて実務利用が進んでいる必要性評価との統合を試みた。その上で、提案手法の性能を検証するために、東北地方への適用を行い、妥当性の確認を行った。

**Key Words** : multiplicity, connectivity, disaster management

## 1. 研究の背景と目的

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、津波の襲来によって東北地方太平洋沿岸部を中心に甚大な被害をもたらした。この時、救援部隊は主に「くしの歯」作戦によって啓開された東北地方の高速道路や国道を通して被災地の救援に向かうなど、東北地方の道路網は救援に大きく貢献した。

我が国における道路事業を振り返ってみると、従前の道路事業は主に交通量に由来する費用便益分析によって評価されてきており、研究分野でも費用便益分析の運用に付随する研究も多く行われてきた。一方で、たびたび災害時を考慮した道路網評価に関する研究も行われてきており、高頻度で起こる災害に対しては費用便益分析の計算に組み込まれることで道路事業の便益に加えられてきた。しかし防災機能の評価は非常に限定的であり、依然として費用便益分析においては平時交通量が支配的である。

東日本大震災を経て道路網の災害時の機能への関心が高まり、2011年8月国土交通省は実際の道路事業評価への適用に向けて「道路事業における防災機能の評価手法（暫定手法）」（以下、暫定手法）を作成した。毎年度マニュアルが改訂され、本格的実用化に向けて更

新が行われているもの、未だ実用化には大きく改善の余地を残している。

本研究では、実務者との意見交換から暫定手法の課題を抽出した上で、既存の暫定手法をベースに道路ネットワークの防災機能評価に資する評価指標の構築を目的とする。

## 2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

### (1) 暫定手法の概要

暫定手法は、拠点間の防災機能を定性的に評価する必要性評価手法（迂回解消モデル）と、道路リンクの災害時における脆弱性や事業による改善を定量的に評価する有効性評価手法（連結性向上モデル）の2つの手法からなる。以下に両手法の概要を示す。

#### a) 必要性評価手法

必要性評価手法で用いるネットワークには、人口5万人以上の重要都市・重要交通拠点・防災拠点等が位置する市町村の市役所または町村役場等をノードとして利用する。また、第一次緊急輸送道路と前述のノードを効率的に接続できるよう第二次・第三次緊急輸送道路を適宜リンクとして利用する。

この条件下で、通常時のノード間の最短経路が災害

時に利用可能であることを拠点間に「耐災害性あり」とする。また最短経路と基本的に重複しない迂回路のうち、所要時間または経路距離が最短経路の1.5倍未満の迂回路が存在することを拠点間に「多重性あり」とする。なお災害時に利用可能とは、経路上に津波浸水想定区域、土砂災害・大雨・大雪・噴火の恐れがある区間、未耐震橋梁、幅員5.5m以下の未改良区間のいずれもが存在しないことである。

以上のネットワーク条件で、耐災害性と多重性の二項目で拠点間を評価することで、表-1のようにA~Dの4段階で評価する。

評価	耐災害性	多重性
A	あり <sup>a</sup>	あり
B	あり	なし <sup>b</sup>
C	なし	あり
D	なし	なし

表-1 必要性評価手法図

- <sup>a</sup> 速達性を必要条件とすることが検討されている  
<sup>b</sup> マニュアル上は「評価しない」としているが、現在は「なし」が一般的に適用されている

## b) 有効性評価手法

有効性評価手法で用いるネットワークには、各市町村の市役所と町村役場を出発地・到着地ノードとして利用する。また、到着地ノードには背骨となる高速道路<sup>A</sup>のインターチェンジや各県庁も加えて設定する。また、主要地方道以上の道路をリンクとして利用する。なお災害時の評価においては、有効性評価手法と同様の基準で災害時に利用可能な道路のみを抽出してリンクとして用いる。

評価値の算出過程としては、まずこの道路ネットワークにおいて整備が計画されているある区間を抽出し、その区間から半径50km以内に位置する市町村中心を抽出する。次に抽出された市町村中心を出発地ノード・到着地ノードとし、さらに最寄の県庁もしくは背骨高速のICを到着地ノードに追加する。続いて、選択された出発地ノードから到着地ノードへ至る最短経路のうち、通常時に当該区間を通過するODペアを抽出する。最後に抽出されたペアについて(i)整備前通常時、(ii)整備前災害時、(iii)整備後災害時の3つのシナリオにおける最短所要時間を計算し、(i)(ii)(iii)のシナリオについて所要時間を合計する。合計所要時間をそれぞれ(i) $t_{o1}$ (ii) $t_{o2}$ (iii) $t_w$ として、以下の式(1)で示す弱点度 $\alpha_o$ の高さによって整備の必要性、式(2)で示す改善度 $K$ として、を弱点度の高さで、整備の有効性を改善度の高

さで表す。

$$\alpha_o = \frac{t_{o2}}{t_{o1}} \quad (1)$$

$$K = \frac{\alpha_o}{\alpha_w} \quad (\text{ただし、}\alpha_w = \frac{t_w}{t_{o1}}) \quad (2)$$

## c) 暫定手法の課題整理

暫定手法に関する課題抽出のために行われた国土交通省各地方整備局との意見交換会から得られた課題は、指標の課題、地域性を考慮した基礎設定の課題、実利用の際の課題の3つに大分された。本研究では主に指標の課題に着目した上で、実利用に向けた課題を方針の検討に用いつつ、指標改善の方向性を探る。

指標の課題に関して、必要性評価手法では同一評価の拠点間の整備必要性の差が示せないという点や、所要時間短縮効果が評価できないという点などが挙げられた。また有効性評価手法については、多重性の評価が不足しているという点や、不通であるODペアの所要時間の設定(48時間)が大きく影響しており妥当性が低い点などが挙げられた。

実利用面での課題に関しては、必要性評価手法では結果・概念ともに非常にわかりやすいが定量的表現でないことによる説得力の不足などが挙げられ、有効性評価手法では評価値の意味がわかりにくいという点が挙げられた。

指標・実利用面での課題から、定量的指標を基に定量的表現を行うことが可能である指標を構築することで、多くの課題に対処可能であると考えられる。また、その定量的指標には多重性の考慮が必要であり、また不通ペアの所要時間について数値を与える際には更なる議論が必要である。現状では所要時間に無限大を与えても計算可能な指標を構築することが有効であると考えられる。

## (2) 道路ネットワークの連結性・多重性に関する既往研究

暫定手法の課題を踏まえた改善方針を検討するにあたり、ネットワークの連結性評価と多重性評価に関する既往研究について見る。

連結性に関する研究としては、遮断確率を利用して連結性を評価した飯田ら<sup>1)</sup>の研究では、ミニマルパス法、ミニマルカット法、モンテカルロ法の適用性について検討された。他にも、サブネットワークの端点間の連結信頼度を利用して計算の効率化を実現し、降雨災害について遮断確率を設定して適用を行った高山ら<sup>2)</sup>の研究などがある。また、朝倉ら<sup>3)</sup>は災害時に一定の迂回以内でトリップを完了できる確率(時間信頼度)を連結度指標とすることを提案し、継続研究<sup>4)</sup>では、道路ネットワークの階層性と時間信頼度の関係性を検討した。連結性の推定に関連して、シミュレーションに

<sup>A</sup> 災害時に早期の広域的な物資輸送に資すると考えられる高速道路

よるランダムなリンク遮断パターンと復旧の有効性や必要性等から重要リンクを示した渡辺<sup>5)</sup>や、複数経路の所要時間平均を用いて多重性と拠点重要度を考慮したアクセシビリティ指標が当該リンクの遮断でどの程度低下するかによって重要性を評価した原田ら<sup>6)</sup>の研究では、連結性に大きく寄与するリンクの推定がなされた。

また、多重性を評価する研究では、ロジットモデルを用いて多重性を考慮して通常時の鉄道・航空路線ネットワークを評価した栢元<sup>7)</sup>の研究や、網羅的レビューとともに、連結信頼性と所要時間信頼性を統合した評価手法を提案した中山<sup>8)</sup>の研究があり、いずれもログサム変数を基に評価を行っている。

遮断シナリオに対してその影響を評価する研究としては、若林<sup>9)</sup>が阪神淡路大震災における道路網の問題点を整理するとともに、複数の遮断シナリオで交通量配分と交通容量からリンクの信頼性と重要性を推定した。

### (3) 本研究の位置づけ

暫定手法は災害時の連結性を評価するものであった。定性的評価を行う必要性評価手法では評価されている多重性が、定量的評価を行う有効性評価手法において不足していることが課題抽出によって指摘されており、本研究では多重性の定量的評価への算入について検討する。

さらに既往研究からは、災害時の遮断確率ではなく遮断シナリオを設定した上で、災害時の道路網に対して多重性を考慮してネットワーク評価を行う研究は行われていない。本研究では、暫定手法の2手法の特徴と課題・既往研究を踏まえ、より実際の事業評価への適用に主眼を置いた評価手法の構築を検討する。具体的には、交通量を用いず遮断シナリオを設定した上で、多重性を評価し得る簡便な評価手法であり、妥当性が疑われる不通ペアに与える所要時間については、無限大としても計算可能となるような指標の構築を検討する。

## 3. 多重性を考慮した評価指標の構築

### (1) 概要

交通網の多重性に関する既往研究では主に以下の3つの要素で評価されていた。

- (a) 到達可能確率
- (b) 利用可能経路数
- (c) 各利用可能経路の所要時間

a) 到達可能確率については、暫定手法の概念に基づき各リンクの利用可能確率を0または1で所与とするため、拠点間の到達可能確率も0または1である。

b) 利用可能経路数については多いほど多重性が高いが、実際の救援ルートを想定した際には、所要時間が比較的長い経路が多数あることより、比較的短い経路が少数でも複数あることが有効であると考えられる。したがって本研究では、利用可能経路数の上限を第一経路と第二経路の2つとした。

c) 利用可能経路の所要時間については、まず各リンクの災害時における所要時間は通常時の所要時間と等しいとして所与とする。

そのうち第一経路については、災害時に通常時の最短経路が利用可能であることが有効であると考え、通常時の最短経路を災害時の第一経路であると仮定した。その上で通常時の最短経路が災害時に不通である場合は所要時間 $=\infty$ を与えることとした。

次に第二経路については、通常時の最短経路が災害時に利用可能である場合と利用不可能である場合に分けて考える。利用可能である場合は、最短経路との重複を制限した上で最短の迂回路を探索し、第二経路に利用とする。一方、利用不可能である場合は災害時の道路網における最短経路を重複を制限せずに災害時の第二経路とする。選択された第二経路の所要時間を利用する。

すなわち第一経路に耐災害性があるかを1つ目の評価視点、災害時の第二経路の所要時間を2つ目の評価視点とした指標を構成する。利用可能経路数と利用可能経路の選択基準については大いに議論の余地があることを付記しておく。

以上より本研究における指標に用いるデータは以下の5つである。

- $t_n$  : 通常時の最短経路における所要時間
- $t_{o1}$  : 整備前災害時の第一経路における所要時間
- $t_{o2}$  : 整備前災害時の第二経路における所要時間
- $t_{w1}$  : 整備後災害時の第一経路における所要時間
- $t_{w2}$  : 整備後災害時の第二経路における所要時間

これらの5つの数値から災害時の道路網の脆弱性を示す指標値と、整備による改善を示す指標値を構築する。構築の手法については調和平均を用いるものと、栢元<sup>7)</sup>や中山<sup>8)</sup>が用いた多重性評価と同様にログサム変数を用いるものの2種類を提案する。いずれも有効性評価手法における弱点度・改善度の概念をもとにして、脆弱性を災害時と通常時の状態を表す数値の比較から評価し、改善を整備前災害時と整備後災害時の状態を表す数値の比較から評価した。

### (2) 調和平均に基づく評価指標の構築

#### a) 概要

調和平均に基づく評価指標においては、通常時の状態を最短経路の所要時間で示し、災害時の状態を災害

時の第一経路における所要時間と災害時の第二経路における所要時間の調和平均で示す。脆弱性指標  $\alpha_h$  を式 (3) に示す。

$$\alpha_h = \frac{t_{D_o}}{t_n} \quad \left( \text{ただし, } \frac{1}{t_{D_o}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{t_{o_1}} + \frac{1}{t_{o_2}} \right) \right) \quad (3)$$

また  $t_D$  が整備前後で変化する割合である改善度  $K_h$  を式 (4) に示す。

$$K_h = \frac{t_{D_w}}{t_{D_o}} \quad \left( \text{ただし, } \frac{1}{t_{D_w}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{t_{w_1}} + \frac{1}{t_{w_2}} \right) \right) \quad (4)$$

### b) 特徴

特徴として、まず第一経路の耐災害性を実質的に定性的に評価し、第二経路の所要時間を定量的に評価することで、暫定手法の必要性評価手法を定量的表現かつ定性的意味づけが可能なものにしている。暫定手法の必要性評価手法における条件である最短経路の利用可能性と、迂回率 1.5 未満の迂回路の存在の 2 つの観点から、指標がどのような値をとりうるかを計算したものが表-2 となる。

	多重性あり	多重性なし
耐災害性あり	$\alpha_N^k < 1.2$	$1.2 \leq \alpha_N^k \leq 2.0$
耐災害性なし	$2.0 < \alpha_N^k < 3.0$	$3.0 \leq \alpha_N^k$

表-2 調和平均指標と必要性評価手法の条件との対応

表 (2) に示されるように調和平均による脆弱性指標が「第一経路が利用可能か」「第二経路の迂回率」の 2 要素によって算出されている。これを示すために、式 (3) を式 (5) に展開する。

$$\frac{2}{\alpha_h} = \frac{t_n}{t_{o_1}} + \frac{t_n}{t_{o_2}} \quad (5)$$

ここで、 $t_{o_1}$  は第一経路が利用可能な場合は  $t_n$  に一致し、利用不可能な場合は  $\infty$  となる。したがって、 $t_n/t_{o_1}$  は第一経路が利用可能な場合は 1 となり、利用不可能な場合は 0 となる。また、 $t_{o_2}/t_n$  が第二経路の迂回率であることから、 $t_n/t_{o_2}$  は第二経路の迂回率の逆数である。したがって式 (5) は以下の式 (6) に展開される。

$$\frac{2}{\alpha_h} = (\text{第一経路が通行可能か}) + \frac{1}{(\text{第二経路の迂回率})} \quad (6)$$

したがって所要時間の絶対的大小の評価は不可能である。また、本研究では不通区間に対して無限大を与えた際に平均値を算出可能である特徴と、小さい数値に近い平均値が出るという特徴を踏まえ、所要時間の調和平均を利用した。なお、第一経路が利用不可能である場合は、式 (7) よる評価値が第二経路の迂回率の 2 倍の数値を示している。

$$\alpha_h = 2 \frac{t_{D_{o_2}}}{t_n} = (\text{第二経路の迂回率}) \times 2 \quad (7)$$

## (3) 期待最大効用にに基づく評価指標の構築

### a) 概要

ロジットモデルにおける期待最大効用にに基づく評価指標においては、ログサム変数がロジットモデルにおける期待最大効用になることを利用する。通常時の状態を最短経路の期待効用で示し、災害時の状態を災害時の第一経路と災害時の第二経路の二経路からなるネットワークにおける期待最大効用で示す。まず経路  $i$  の選択肢の効用を式 (8) に示す。

$$U_i = -t + \epsilon \quad (8)$$

ここで、 $U_i$  は効用、 $t$  は所要時間、 $\epsilon$  はランダム項である。ランダム項が Gumbel 分布に従うと仮定すると、ロジットモデルが導入される。このとき経路の合成効用、すなわちログサム変数は以下の式 (9) で表現できる。

$$\ln \sum_{i=1}^2 \exp(-\theta \cdot t_{w_i}) \quad (9)$$

これをもとにして、まず脆弱性の指標を式 (10) に示す。

$$\alpha_l = \frac{\frac{1}{\theta} \cdot \ln \sum_{i=1}^2 \exp(-\theta \cdot t_{o_i})}{-t_n} \quad (10)$$

また式 (11) に示すように、ログサム変数の整備前後での差を利用して改善を示す。

$$K_l = \ln \sum_{i=1}^2 \exp(-\theta \cdot t_{w_i}) - \ln \sum_{i=1}^2 \exp(-\theta \cdot t_{o_i}) \quad (11)$$

### b) 特徴

特徴として、まず同じ迂回率の第一経路と第二経路のペアの脆弱性指標値を比較した場合、所要時間が大きいほど値が大きくなるという性質を持つ。次の図-1 は、第一経路の所要時間を  $x$  時間、第二経路の所要時間を  $1.5x$  時間、いずれも災害時に利用可能であるとして、 $\theta = 1$  としたときのそれぞれの期待効用と脆弱性指標値をグラフにしたものである。図-1 のように、同じ迂回

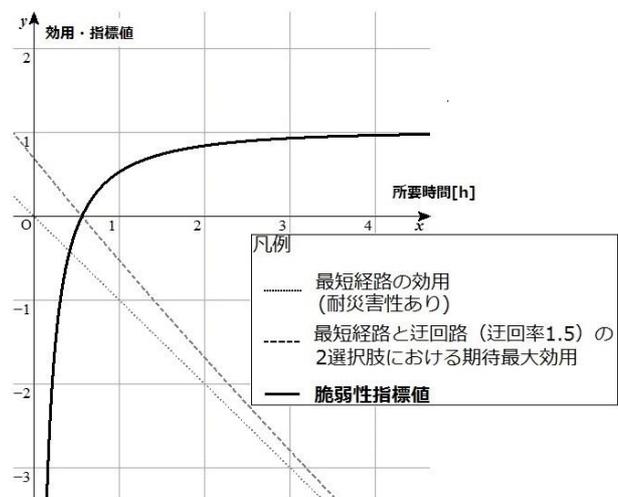


図-1 迂回率 1.5 の第二経路が災害時に存在する場合の第一経路の所要時間と脆弱性指標の関係

率であれば所要時間が短いほど指標値が小さい、すなわち脆弱性が低いという評価になることがわかる。

また、第一経路が利用不可能である場合は、式(12)より評価値が第二経路の迂回率を示しており、第一経路の利用可能性については指標値が1以下かどうかで判定可能である。

$$\alpha_l = \frac{\frac{1}{\theta} \cdot \ln(\exp(-\theta \cdot t_{o2}))}{-t_n} = \frac{t_{o2}}{t_n} = (\text{迂回率}) \quad (12)$$

## 4. 東北地方への適用

### (1) データ概要

本研究で提案した2指標による拠点間の脆弱性評価を青森県、秋田県、岩手県、山形県、宮城県、福島県の東北6県に適用した。ネットワークとしてはb)有効性評価手法におけるリンク条件にしたがって抽出した東日本大震災前における東北6県の62671のリンクと、a)必要性評価手法におけるノード条件にしたがって抽出した54の市町村中心を利用する。

### (2) 分析結果と考察

結果を図-2に示す。まず東日本大震災以前の東北地方の道路網としては、いずれの指標によっても既存の高速道路が存在する区間を中心に脆弱性評価が低く、すなわち防災機能が高いという結果が出た。一方で、太平洋沿岸を中心に海沿いでの評価値が高くなっており、津波被害が想定される中で、地震や津波の際にも利用可能な高規格道路の整備が必要であることがわかった。なお東日本大震災後の復興事業として三陸沿岸道路などが整備されており、その後も防災機能を高める道路整備事業が沿岸部を中心に進んでいる。

次に調和平均による指標とログサム変数による指標

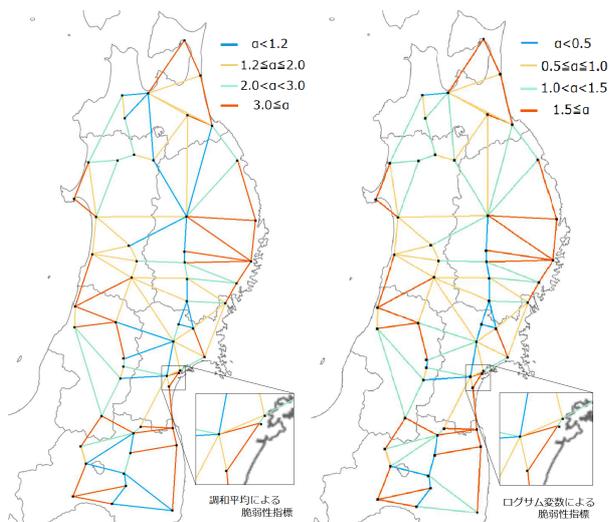


図-2 調和平均、ログサム変数を用いたそれぞれの脆弱性評価結果

を比較した。

式(7),(12)に示されるとおり、第一経路が利用不可能である  $\alpha_h > 2, \alpha_l > 1$  の範囲では脆弱性指標値は第二経路の迂回率に比例するため、同様の評価がなされる。一方で第一経路が利用可能である範囲では、調和平均による指標では迂回率のみによって評価値が変化し、ログサム変数による指標では迂回率と所要時間によって評価値が変化する。結果として、ログサム変数による脆弱性評価では調和平均による評価に比べて、盛岡-八戸、いわき-白河等、第一経路と迂回率が小さい第二経路がともに存在する拠点間であっても、所要時間が大きいために相対的に低く評価された。逆に、天童-東根、栗原-大崎等では大智経路の所要時間が短いために大きい迂回率であっても高く評価された。

## 5. まとめと今後の課題

本研究では、防災機能の評価手法(暫定手法)をもとに、調和平均とログサム変数を用いて災害時のネットワークの多重性を評価する2つの脆弱性評価指標に拡張した。さらにその2つの指標を東北地方の重要都市間評価に適用することで、その特徴を確認した。

地震・津波を想定した東北地方への適用では、いずれの指標においても脆弱性の高い拠点間は災害時に大幅な迂回が必要となるものであった。脆弱性が高い部分では、実質的に非常に簡便な計算によって算出されているものの、連結性の問題をはっきりと示していると考えられる。また、脆弱性が比較的低い拠点間においては、調和平均を用いた指標では第二経路の迂回率が小さい区間を、ログサム変数を用いた指標では所要時間が短い区間と迂回率が小さい区間を、脆弱性が低い区間として評価する性質を確認した。

調和平均を用いた指標においては、所要時間の大小が評価に全く影響せず、第二経路の迂回率のみで指標値が算出されるという特徴を持っている。これは所要時間の大小を評価できないという欠点があるものの、逆に指標値が第一経路が利用可能かと第二経路の迂回率を示しており、暫定手法必要性手法のような定性的評価との関連性が強いという利点を持つ。また、所要時間の調和平均が具体的に何を意味しているのかは不明であるということは、実用上課題となると考えられる。

一方でログサム変数を用いた指標においては、同じ迂回率の第一経路と第二経路の組み合わせにおいては、所要時間が長い組み合わせの指標値が大きくなるという利点を持っている。しかし、所要時間が0に近づくにつれ急激に指標値が低下するため、所要時間の短い拠点間の評価で、過大に評価されるという欠点がある。

本研究の今後の課題としては、大きく分けて、災害

時の経路選択方法、拠点間の重要性、ネットワークとしての評価、ロジットモデルに利用する効用関数の4つである。

まず災害時の経路選択方法については、本研究では通常時の最短経路が災害時に利用可能であることを重要視し、災害時の第一経路に通常時の最短経路を用いて、災害時に通常時の最短経路が利用不可能である場合は所要時間 $\infty$ として扱った。しかし、より多重性を評価するならば、災害時のネットワークにおける最短経路、最短迂回路を探索し用いることも考えられる。さらに、現在は第一経路と第二経路の2経路のみを利用しているが、二番目迂回路等経路数を増やして評価するという選択肢もあわせて検討する必要がある。

次に、拠点間の重要性について、必要性評価手法においては目標となる指標値が定められていた。全ての拠点間に対して一律の目標値を設定するのではなく、その拠点間連結の重要性に応じて目標値を設定する、もしくは指標値の計算に重要性を算入することでより実用的な指標を構築可能であると考えられる。

3つ目のネットワークとしての評価については、本研究では拠点間のネットワークについて評価することで拠点間の評価を算出しており、リンクではなく拠点間の連結に対する脆弱性評価にとどまった。今後、ネットワーク全体における当該拠点間のネットワーク、リンクの機能を評価可能な評価手法に拡張することで、より実用上重要な拠点間を抽出可能になりうる。

最後にロジットモデルに利用する効用関数については、本研究では所要時間に比例して小さくなる、負の効用を仮定した。分散パラメータのみならず、定数項あるいはその他の形の効用関数等について、複数の候補の比較検討を通して妥当なモデルに改良する必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、各地方整備局の皆様より貴重な助言を頂きました。また、東北地方への適用分析に際して、東北地方整備局道路計画第一課小山健一課長と長谷川聡係長には分析データならびに有益な助言を頂きました。ここに記して厚く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 飯田恭敬・若林拓史・福島博: 道路網信頼性の近似解析方法の比較研究, 土木学会論文集, No. 407/IV-11, pp. 107-116, 1989.
- 2) 高山純一: 異常気象時における道路網の連結性能評価法, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 559-565, 1989.
- 3) 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.
- 4) 朝倉康夫・柏谷増男・藤原健一郎: 道路網の機能的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.

- 5) 渡辺泰弘・鈴木勉: 復旧優先度指標による震後復旧優先道路形状に関する数理的研究, 日本都市計画学会 都市計画論文集, No. 44-1, pp. 30-37, 2009.
- 6) 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に基づく道路ネットワークの接続脆弱性評価, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 70, No. 1, pp. 76-87, 2014.
- 7) 榎元淳平・塚井誠人・奥村誠: 複数経路を考慮した鉄道・航空ネットワークの評価, 土木計画学研究・論文集, No. 19, pp. 255-260, 2003.
- 8) 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, 2011.
- 9) 若林拓史: 阪神淡路大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価, 土木計画学論文集, No. 13, pp. 391-400, 1996.