# 緊急輸送道路ネットワークの脆弱性評価手法の比較分析

深沢　隆大[1]・石川　友保[2]

[1]学生非会員　福島大学大学院　共生システム理工学研究科（〒960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地）
E-mail:s2270041@ipc.fukushima-u.ac.jp

[2]正会員　福島大学　共生システム理工学類（〒960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地）
E-mail:ishikawa@sss.fukushima-u.ac.jp

緊急輸送道路ネットワークの性能を評価する手法はこれまでに多数提案されてきたが，その評価対象や評価指標は手法間で異なる．本研究では，緊急輸送道路ネットワークの脆弱性評価手法を比較することで，各評価手法の適用条件を明らかにした．具体的には，各評価手法を定性的・定量的に比較し，評価内容に関する条件，必要情報に関する条件，ネットワーク構造に関する条件を分析した．その結果，適用条件は，より少ない評価情報でネットワークを評価したい場合，災害前後の所要時間や距離の差を評価したい場合，経路数の多いネットワークの脆弱性を評価したい場合などによって異なることを示すとともに，各評価手法の適用条件を明らかにした．

***Key Words:*** *natural disaster, emergency transportation road network, vulnerability*

## 1. はじめに

災害発生時，被災地に円滑に物資を輸送するためには，緊急輸送道路ネットワークが必要不可欠である．過去の大規模災害においては，被災地への緊急支援物資輸送の多くが車両でおこなわれた．そして，実際に道路ネットワークの寸断によって，被災地内の避難所への物資の輸送が遅れた例がある．

このように緊急輸送道路ネットワークは重要であり，その性能（脆弱性，頑健性など）を評価するために，これまで多くの評価手法が提案されてきた．例えば，緊急輸送道路ネットワーク内の脆弱性の高いリンクを特定する手法 [1]や，災害発生前後の所要時間の変化を評価する手法 [2]などがある．緊急輸送道路ネットワークの性能を評価することで，道路の補修工事やバイパス道路整備の優先順位付けなどに活用することができる．

これらの評価手法は評価対象や評価指標などが異なるため，評価手法の選定にあたっては適用条件を明らかにする必要がある．前述の例においては，評価対象はリンクとノードであり，評価指標はリンク端点の固有ベクトル成分差とレジリエンスである．

本研究では，既存手法の定性的・定量的な比較に基づき，緊急輸送道路ネットワークの脆弱性評価手法の適用条件を明らかにすることを目的とする．

## 2. 本研究で用いる用語の定義と内容

### (1) 緊急輸送道路ネットワークの定義

緊急輸送道路ネットワークとは「災害時の緊急支援物資輸送で用いられる道路網」と定義する．緊急輸送道路ネットワークはノードとリンクで構成されている．ノードには，被災地外の物流拠点，IC・貨物駅等，広域物流拠点（一次拠点），地域内物流拠点（二次拠点），避難所などがある．また，リンクには道路がある（**図-1**）．

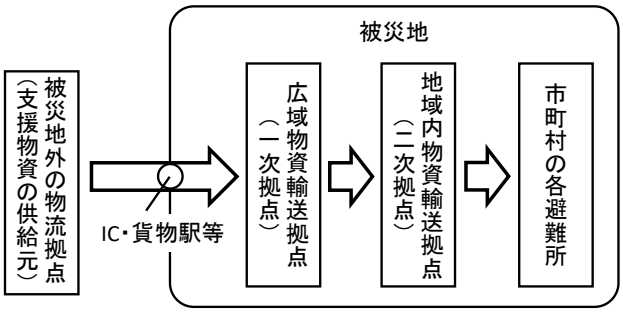



**図-1**　緊急支援物資の流れ

### (2) 脆弱性の定義

緊急輸送道路ネットワークは，被災地内の物流拠点や避難所に物資を輸送するためのものであり，その脆弱性が高いということは，これらの施設への物資の輸送がで

きなくなる，または遅れるものと考えられる．

そこで，本研究では，緊急輸送道路ネットワークの脆弱性を「災害時に目的施設への輸送ができなくなる，または遅れること」と定義する．例えば，目的施設までの経路数が少ない場合には輸送できなくなる可能性が高く，脆弱性が高い．また，目的施設までに複数の経路があったとしても，最短経路が寸断した際に大幅に迂回しなければならない場合は目的施設までの到着が遅れる可能性が高く，脆弱性が高い．

### (3) 適用条件の定義と種類

適用条件とは「ある評価手法を用いるときに求められる条件」と定義する．

適用条件としては様々なものが考えられるが，本研究では，「評価したい内容に対して適用しているか」（評価内容），「評価対象であるネットワークに対して適用しているか」（ネットワーク構造），「評価するために必要な入力データがあるか」（必要情報）の 3 点を適用条件とする．

## 3. 既存の評価手法の概要と比較方法

### (1) 既存の評価手法の選定と分類

J-Stage において「災害　道路　ネットワーク　評価」をキーワードに，査読付かつフリーアクセス（無料）の論文を検索した結果，2,857 編が抽出された．このうち，掲載誌が土木学会論文集 D3 または都市計画論文集に限定した結果，344 編が抽出された．

さらに，その中から，タイトルに次の 3 種類の用語をすべて含むものに限定した結果，8 編を選定した．3 種類の用語は，道路ネットワークに関する用語（道路ネットワーク，道路網など），評価に関する用語（評価，推定など），災害に関する用語（自然災害，緊急輸送道路，リタンダンシーなど）である（**表-1**）．

また，上記で抽出した評価手法を，ノードに関する評価手法 4 つと，リンクに関する評価手法 4 つに分類した．ノードに関する評価手法は，堀井 (1996)[3]，原田ら (2014)[4]，山口ら (2018)[5]，鎌谷ら(2019)[2]とした．リンクに関する評価手法は，嶋田ら(1995)[6]，中南ら(2018)[1]，田島ら(2018)[7]，大澤ら(2021)[8]とした（**表-2**）．

### (2) ノードに関する評価手法の概要

堀井(1996)は，気象災害時の迂回の発生を考え，平常時に対する移動時間の増加割合を評価している．

原田ら(2014)は，平常時と災害時でアクセシビリティ（二点間の移動のしやすさ）がどの程度変化するかを計算し，ネットワーク内の各都市の接続性を評価している．

山口ら(2018)は，研究者へのアンケートより，災害時に接続を確保すべき防災拠点の優先順位を評価している．

鎌谷ら(2019)は，過去の災害時における道路の破断割合や車両の速度変化の割合を活用し，都市（生活圏）間の移動時間変化から各都市の強靭性を評価している．

### (3) リンクに関する評価手法の概要

嶋田ら(1995)は，気象災害の発生前後で OD 需要が変化しないという前提のもと，発生前後での OD 間の所要時間変化を評価した．

中南ら(2018)は，ネットワークの接続状態を表す行列を解析し，ネットワークの連結性に各リンクがどの程度関係しているのかを評価した．

**表-1**　既存の評価手法の抽出結果

| No. | 評価手法 | 出典 |
|---|---|---|
| 1 | 嶋田ら(1995) | 嶋田喜昭、加藤哲男、本多義明：「自然災害を考慮した道路網評価に関する基礎的考察」、都市計画論文集、Vol.30、pp.97-102、1995. |
| 2 | 堀井(1996) | 堀井雅史：「迂回度を用いた自然災害時における道路網の代替機能に関する評価方法」、都市計画論文集、Vol.31、pp.769-774、1996. |
| 3 | 原田ら(2014) | 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. |
| 4 | 中南ら(2018) | 中南孝晶、中山晶一朗、小林俊一、山口裕通：「固有値解析による固有ベクトルを利用した緊急輸送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.74、No.5、pp. I_1141-I_1148、2018. |
| 5 | 田島ら(2018) | 田島雅己、本間裕大：「複数経路の空間的関係に着目した交通ネットワークの頑健性評価」、都市計画論文集、Vol.53、No.2、pp.199-205、2018. |
| 6 | 山口ら(2018) | 山口裕通、小泉奏子、大澤脩司、中山晶一朗：「道路ネットワークの接続性強化に向けた防災拠点の重要度ランクの推定」、土木学会論文集D3（土木計画）、Vol.74、No.5、pp. I_303-I_314、2018. |
| 7 | 鎌谷ら(2019) | 鎌谷崇史、中尾聡史、樋野誠一、毛利雄一、片山慎太朗、東徹、川端祐一郎、藤井聡：「大規模震災に対する各地域の道路ネットワークレジリエンス評価」、土木学会論文集D3（土木計画学）、Vol.75、No.5、pp. I_353-I_363、2019. |
| 8 | 大澤ら(2021) | 大澤脩司、藤生慎、高山純一：「災害危険箇所に基づく災害対応の拠点施設間の道路の接続性評価に関する研究」、土木学会論文集D3（土木計画学）、Vol.76、No.5、pp. I_281-I_296、2021. |

表-2　既存の評価手法の分類

| No. | 評価手法 | 分類 | 評価手法の概要 |
|---|---|---|---|
| 1 | 嶋田ら (1995) | リンク | 気象災害下ではODは平常時と変わらないという考え方のもと、災害発生前後のOD間の所要時間変化によって道路網を評価する手法 |
| 2 | 堀井 (1996) | ノード | 気象災害時にリンクが寸断することで発生する迂回を考慮し、平常時に対する災害時の移動時間の増加を評価できる手法 |
| 3 | 原田ら (2014) | ノード | 災害時、都市間の移動のしやすさ（アクセシビリティ）が平常時に対してどの程度減少するか、またその計算結果からどの都市の接続性が脆弱であるのかを評価できる手法 |
| 4 | 中南ら (2018) | リンク | ノード・リンクの接続状態を表す行列に対して固有ベクトルを解析し、寸断時にネットワークの連結性を大きく下げるリンクを評価する手法 |
| 5 | 田島ら (2018) | リンク | 災害時、ランダムに発生する障害に対して各リンクがどの程度の確率で寸断するのか、またリンク寸断時の残存経路は何通りあり、各経路の距離はどの程度なのかを求め、ネットワークの各OD間の頑健性を評価する手法 |
| 6 | 山口ら (2018) | ノード | 研究者に対し、災害時に優先して繋ぐべき防災拠点の種類を回答させるアンケートを実施し、その結果から災害発生時に接続を確保すべき防災拠点の優先順位を評価する手法 |
| 7 | 鎌谷ら (2019) | ノード | 東日本大震災時のプローブデータ（道路の破断率・車両の速度変化率）を用い、都市（生活圏）間の移動時間変化を推計して各都市の強靭性を推計する手法 |
| 8 | 大澤ら (2021) | リンク | 災害時に重要となるODを結ぶ経路が多数通過しているリンクが重要という考え方のもと、災害危険箇所数を含めた各リンクの対策上の注目度を評価する手法 |

表-3　各評価手法の必要情報

| 評価手法 | ネットワークデータ | | | ODデータ | | その他のデータ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 表現方法 | リンク属性 | ノード属性 | OD ペア | OD 交通量 | |
| 嶋田ら (1995) | GIS | 距離 切断確率 | － | ○ | ○ | － |
| 堀井 (1996) | GIS | 距離 | － | ○ | － | － |
| 原田ら (2014) | GIS | 距離 | 魅力度 | ○ | － | 交通抵抗のﾊﾟﾗﾒｰﾀ |
| 中南ら (2018) | 行列 | 距離 | － | － | － | － |
| 田島ら (2018) | グラフ | 距離 | － | － | － | 障害半径、障害発生密度 |
| 鎌谷ら (2019) | GIS | 距離 | － | ○ | ○ | 全ﾘﾝｸに占める被災ﾘﾝｸの割合、車両の速度変化の割合 |
| 大澤ら (2021) | GIS | 危険箇所数 | － | ○ | － | － |

田島ら(2018)は，リンクが障害で寸断する確率およびリンク寸断時における二点間の残存経路の数や距離を指標として，OD 間の頑健性を評価した．

大澤ら(2021)は，災害時に重要となる経路が経由するリンクおよび各リンクの災害危険箇所数に着目し，リンクの対策上の注目度を評価した．

### (4)　評価手法の比較方法

各評価手法の適用条件を求めるにあたって，本研究では，定性的比較と定量的比較の 2 つをおこなう．

定性的比較では，適用条件のうち，必要情報に関する条件と評価内容に関する条件を明らかにする（4 章）．

定量的比較では，適用条件のうち，ネットワーク構造に関する条件を明らかにする（5 章）．

なお，以降の比較分析では，(1)で選定した 8 つの評価手法のうち，山口ら(2018)を除く 7 つを対象とする．これは，山口ら(2018)はアンケート調査に基づく評価手法のためである．

## 4.　評価手法の定性的比較

### (1)　必要情報の種類と条件

#### a)　必要情報の種類

各評価手法の必要情報は，ネットワークデータ，OD データ，その他のデータに分けられる（**表-3**）．

ネットワークデータはネットワークの表現方法や，ノードとリンクの属性に関するデータである．このうち，ネットワークの表現方法には，グラフ（ノード・リンクの位置や接続関係を簡易的に表現したもの），GIS（ノード・リンクの位置や接続関係を地図上に表現したもの），行列（ノード・リンクの隣接関係等を数字の羅列で表現したもの）がある．リンク属性には，距離，切断確率（災害によって，当該リンクが切断する確率），危険箇所数（土砂災害などで被災する恐れのある危険な箇所の数）がある．ノード属性には，魅力度（当該ノードで享受できるサービスの魅力の多さ）がある．

OD データはネットワーク内のある出発地（Origin）と到着地（Destination）の組合せに関するデータであり，OD ペアと OD 交通量がある．OD ペアとは，出発地と到着地の組合せそのものである．OD 交通量とは，OD ペア間で発生する自動車交通量である．

その他のデータには，交通抵抗のパラメータ，障害半径と障害発生密度，全リンクに占める被災リンクの割合と車両の速度変化の割合がある．

#### b)　必要情報に関する条件

以上のことから，必要情報に関する条件は次のように考えられる．必要情報の数を最小限に抑えたい場合は，表現方法とリンク属性のデータのみで脆弱性を評価できる中南ら(2018)が適用できると考えられる．また，特定の OD を評価したい場合には嶋田ら(1995)，堀井(1996)，原田ら(2014)，鎌谷ら(2019)，大澤ら(2021)が適用できると考えられる．その他，大規模な災害を考えてその被害を確率的にネットワークに反映させたい場合は田島ら(2018)や鎌谷(2021)が適用できると考えられる．

さらに，すべての評価手法に共通する表現方法から考えると，GIS からグラフ，グラフから行列を表現することはできるが，行列からグラフ，グラフから GIS を表現できないことから，中南ら(2018)の方法は他の手法と比べ様々な表現方法に対応可能と考えられる．またリンク属性のデータについては，大澤ら(2021)のみが距離のデータを必要としない代わりに，災害危険箇所のデータが必要であることがわかる．

以上より，ネットワークの表現方法とリンク属性のデータは全手法において最低限必要である．ノード属性・OD データ・その他のデータは評価手法によって異なる．したがって，入手できる情報によって適用できる評価手法は異なる．

### (2) 評価内容の比較

#### a) 脆弱性の定義の比較

既存の評価手法では，緊急輸送道路ネットワークの性能を「脆弱性」以外の視点で評価しているものがある．ここでは，評価手法間の比較をおこなうため，「脆弱性」以外の視点の場合は，その視点から類推される「脆弱性」を整理した（**表-4**）．

本研究で類推した「脆弱性」をみると，脆弱性は遅延と経路寸断があった．

脆弱性を遅延とする評価手法は，嶋田ら(1995)，堀井(1996)，原田ら(2014)，鎌谷ら(2019)であった．これらの評価手法の共通点は，災害時の OD 間の所要時間が平常時と比べて増加することに着目していることである．

脆弱性を経路寸断とする評価手法は，中南ら(2018)，田島ら(2018)，原田ら(2014)，大澤ら(2021)であった．これらの評価手法の共通点は，特定のリンクが途切れることで，経路が寸断することに着目していることである．

なお，原田ら(2014)は遅延と経路寸断の両方を脆弱性とする評価手法である．

#### b) 評価指標の比較

既存の評価手法では，前述の評価の視点に応じて評価指標が設定されている（**表-5**）．

ノードに関する評価手法は，いずれも，評価対象とするノードと他のノードの距離や所要時間を，平常時と災害時のそれぞれで求め，これらの値を基に評価指標を算出している．堀井(1996)の基準化迂回度は，望ましい距離（平常時）と実際の距離（災害時）との差を，望ましい距離で除して求める．原田ら(2014)のアクセシビリティ減少率は，平常時の基準化アクセシビリティと災害時の基準化アクセシビリティの差を，平常時の基準化アクセシビリティで除して求める．このとき，基準化アクセシビリティの算出に，所要時間を用いる．鎌谷ら(2019)のレジリエンスは，地震後の所要時間（災害時）を地震前の所要時間（平常時）で除して求める．

リンクに関する評価手法は，評価指標を算出する際の共通点がみられない．嶋田ら(1995)は，災害前後の OD 間の所要時間差を求める．中南ら(2018)は，リンク端点の固有ベクトル成分差を求める．田島ら(2018)での OD ペアごとの頑健性は，障害発生確率と残存経路の合成距離を基に求める．大澤ら(2021)の対策注目度は，災害危険箇所数と，経路内の当該リンクの有無を基に求める．

#### c) 評価内容に関する条件

以上の点から，評価内容に関する適用条件を考える．災害前後における所要時間や距離の差を評価したい場合は，嶋田ら(1995)，堀井(1996)，鎌谷ら(2019)が適用できると考えられる．それに対して，災害後の経路寸断を評

**表-4** 各評価手法における評価の視点と本研究で類推した「脆弱性」

| 評価手法 | 評価の視点 | 内容 | 本研究で類推した「脆弱性」 |
|---|---|---|---|
| 嶋田ら (1995) | 自然災害に対する道路網の強さ | 平常時と自然災害時のOD間の所要時間が変化しないこと | 平常時と自然災害時のOD間の所要時間が変化すること |
| 堀井 (1996) | 代替性 | ある区間がなんらかの原因で遮断された場合に、迂回にかかる時間が遮断前の移動時間と同程度であること | ある区間がなんらかの原因で遮断された場合、迂回にかかる時間が遮断前の移動時間と比べて長いこと |
| 原田ら (2014) | 接続性 | OD間で、リンクを全く共有しない経路の数が多いこと | リンクが途切れることによってOD間の経路がなくなること、なくならない場合でも所要時間が変化すること |
| | 接続脆弱性 | リンクが途切れることによってOD間の経路がなくなること、なくならない場合でも所要時間が変化すること | |
| 中南ら (2018) | 脆弱性 | 通行不能となった場合にネットワークの連結性を大きく低下させるリンクがあること | 通行不能となった場合にネットワークの連結性を大きく低下させるリンクがあること |
| 田島ら (2018) | 頑健性 | リンクが途切れてもOD間の移動ができるよう、経路が多数かつ分散して存在すること | 経路が少ないまたは密になって存在しているため、リンクが途切れた時にOD間の移動ができなくなってしまうこと |
| 鎌谷ら (2019) | 強靭性 | 災害が発生して道路の破断や交通量の変化が起きても、OD間の所要時間が変化しないこと | 災害が発生して道路の破断や交通量の変化が起き、OD間の所要時間が変化すること |
| 大澤ら (2021) | 接続性 | OD間で、災害リスクが少ない経路が複数確保されており、経路同士の重複が少ないこと、かつ重複部分の途切れるリスクがないこと | OD間に災害リスクの多い経路しかなく、複数の経路があっても経路同士の重複が多いこと、また重複部分が少ない場合でも重複部分の途切れるリスクが高いこと |

**表-5** 各評価手法における脆弱性の評価指標

| 分類 | 評価手法 | 評価指標 | 評価指標の概要 | 計算式 | 記号の説明 |
|---|---|---|---|---|---|
| ノード | 堀井(1996) | 迂回度 | ある都市から他都市への望ましい距離(平常時)と実際の距離(災害時)との隔たりの大きさ | $C_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(d_{ij}-e_{ij})^2$ | $C_i$：都市$i$の迂回度<br>$n$：都市の総数<br>$e_{ij}$：$i-j$間の望ましい距離<br>$d_{ij}$：$i-j$間の実際の距離<br>$C_i^*$：都市$i$の基準化迂回度 |
| | | 基準化迂回度 | 迂回度を修正し、望ましい距離に対する実際の距離の増加割合を表せるようにした指標 | $C_i^* = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left[(d_{ij}-e_{ij})/e_{ij}\right]^2$ | |
| | 原田ら(2014) | アクセシビリティ | ある都市と他都市の近接性を、都市の機会の大きさ(商品数・収容人数など)と都市間の交通抵抗を用いて表したもの(移動時間・距離・費用など) | $A_{i,N} = \sum_{j=1}^{m} D_j f(c_{i,j,N})$<br>$f(c_{i,j,N}) = \left(1+\exp(\beta c_{i,j,N}-\theta)\right)^{-1}$ | $A_{i,N}$：OD間で確保しなければならない経路数を$N$本としたときの、ある都市$i$のアクセシビリティ<br>$m$：他都市の数<br>$D_j$：他都市$j$の魅力度(機会の大きさ)<br>$c_{i,j,N}$：OD間で確保しなければならない経路数を$N$本としたときの、$i-j$間の平均所要時間<br>$f(c_{i,j,N})$：OD間で確保しなければならない経路数を$N$本としたときの、$i$から$j$へ移動する際の交通抵抗の小ささ(移動のしやすさ)<br>$\beta$：災害時(リンク寸断時)、経路距離が伸びた場合に$A_{i,N}$が半減されるように調整するパラメータ<br>$\theta$：$A_{i,N}$の最大値を1に近づけるパラメータ<br>$AI_{i,N}$：OD間で確保しなければならない経路数を$N$本としたときの、ある都市$i$の基準化アクセシビリティ |
| | | 基準化アクセシビリティ | アクセシビリティの値を[0, 1]に基準化した指標 | $AI_{i,N} = \sum_{j=1}^{m} D_j f(c_{i,j,N}) \Big/ \sum_{j=1}^{m} D_j$ | |
| | | アクセシビリティ減少率 | 道路が途絶した災害時の道路ネットワークにおいて、基準化アクセシビリティが平常時からどの程度の割合で減少したかを表す指標 | $RI_{i,a,N} = (AI_{i,0,N} - AI_{i,a,N})/AI_{i,0,N}$ | $RI_{i,a,N}$：OD間で確保しなければならない経路数を$N$本としたときの、ある都市$i$のアクセシビリティ減少率<br>$AI_{i,0,N}$：平常時(途絶しているリンクが0本のとき)、OD間で確保しなければならない経路数を$N$本としたときの、ある都市$i$の基準化アクセシビリティ<br>$AI_{i,a,N}$：リンク$a$が途絶した場合、OD間で確保しなければならない経路数を$N$本としたときの、ある都市$i$の基準化アクセシビリティ |
| | | クリティカルリンク | 途絶することで、多くの都市のアクセシビリティが大きく下がるようなリンクを表す指標 | $CRA_{a,N}(\lambda) = \sum_i \varepsilon_{i,a,N}(\lambda)$ | $CRA_{a,N}(\lambda)$：OD間で確保しなければならない経路数を$N$本としたとき、リンク$a$が寸断した場合にアクセシビリティ減少率が閾値$\lambda$を超える都市の個数<br>$\varepsilon_{i,a,N}(\lambda)$：OD間で確保しなければならない経路数を$N$本としたとき、リンク$a$が寸断した場合に都市$i$のアクセシビリティ減少率が閾値$\lambda$を超えれば1、そうでなければ0 |
| | 鎌谷ら(2019) | レジリエンス | 災害前後における所要時間変化の割合と往復の交通量によって地域の脆弱性を表す指標 | $R_i = \frac{\sum_j (k_{ij}C_{ij}) + \sum_j (k_{ji}C_{ji})}{\sum_j k_{ij} + \sum_j k_{ji}}$<br>$C_{ij} = \frac{T_{ij(after)}}{T_{ij(before)}}$ | $R_i$：生活圏$i$のレジリエンス<br>$C_{ij}$：生活圏$i-j$間地震前後の所要時間変化率<br>$k_{ij}$：生活圏$i-j$間の観測交通量<br>$T_{ij(after)}$：生活圏$i-j$間の地震後の所要時間<br>$T_{ij(before)}$：生活圏$i-j$間の地震前の所要時間 |
| リンク | 嶋田ら(1995) | 災害前後のOD間の所要時間差 | 災害時、道路が途絶することで発生するOD間の迂回の程度の大きさ | (災害時のOD間所要時間)―(平常時のOD間所要時間) | ― |
| | 中南ら(2018) | リンク端点の固有ベクトル成分差 | ネットワークの接続関係を表したラプラシアン行列の固有ベクトルにおいて、リンクの端点の固有ベクトルの成分差から、ネットワーク内の各リンクの相対的な脆弱性を表す指標 | $\lvert b_i - b_j \rvert$ | $b_i$：ノード$i$の第二最小固有ベクトル成分<br>$b_j$：ノード$j$の第二最小固有ベクトル成分 |
| | | カット本数 | ネットワークをできる限りノードの数が等しくなるよう2分割するために、途絶させるリンクの最低本数を表す指標 | ― | ― |
| | 田島ら(2018) | 頑健性 | ネットワークのあるODペアにおいて、代替経路の数と各経路の空間的な分散の度合いを評価する指標 | $G(\rho,R) = \frac{\sum_{r\in N}\sum_{s\in N}\omega_r\omega_s \cdot G^{rs}(\rho,R)}{\sum_{r\in N}\sum_{s\in N}\omega_r\omega_s}$<br>(ネットワークの頑健性)<br>$G^r(\rho,R) = \frac{\sum_{s\in N}\omega_s \cdot G^{rs}(\rho,R)}{\sum_{s\in N}\omega_s}$<br>(都市$r$の頑健性)<br>$G^{rs}(\rho,R) = \sum_{J\in\Omega^{rs}} p_J^{rs} \cdot \frac{1}{L_J^{rs}}$<br>(ODペアの頑健性) | $\rho$：障害発生密度<br>$R$：障害半径<br>$G^r(\rho,R)$：障害発生密度$\rho$、障害半径$R$の障害が発生した場合の、ノード$r$の頑健性<br>$G(\rho,R)$：障害発生密度$\rho$、障害半径$R$の障害が発生した場合の、ネットワークの頑健性<br>$\omega_r,\omega_s$：始点$r$、終点$s$それぞれの重み<br>$N$：頂点集合の数<br>$G^{rs}(\rho,R)$：障害発生密度$\rho$、障害半径$R$の障害が発生した場合のネットワークにおける、あるODペア$rs$間の頑健性<br>$\Omega^{rs}$：$rs$間で発生する障害パターンの集合<br>$p_J^{rs}$：$rs$間においてある障害パターン$J$が発生する確率<br>$L_J^{rs}$：$J$が発生した状況における$rs$間の残存経路の合成距離 |
| | 大澤ら(2021) | 対策注目度 | ネットワークにおける各リンクの対策上の注目度の高さ(危険箇所の少なさ、リンクを経由する経路の重要性)を表した指標 | $E_{a1} = \begin{cases} \frac{1}{N_a^w}\sum_{i=1}^{N_r}\delta_{a,i} & (N_a^w>0) \\ 0 & (N_a^w=0) \end{cases}$<br>$E_{a2} = \begin{cases} N_a^w\sum_{i=1}^{N_r}\delta_{a,i} & (N_a^w>0) \\ 0 & (N_a^w=0) \end{cases}$<br>$E_{a1}' = \begin{cases} \frac{1}{N_a^w}\sum_{i=1}^{N_r}\alpha_i\delta_{a,i} & (N_a^w>0) \\ 0 & (N_a^w=0) \end{cases}$<br>$E_{a2}' = \begin{cases} N_a^w\sum_{i=1}^{N_r}\alpha_i\delta_{a,i} & (N_a^w>0) \\ 0 & (N_a^w=0) \end{cases}$ | $E_{a1}$：視点1)に基づくリンク$a$の対策注目度※<br>$E_{a2}$：視点2)に基づくリンク$a$の対策注目度※<br>$E_{a1}'$：視点1)3)に基づくリンク$a$の対策注目度※<br>$E_{a2}'$：視点2)3)に基づくリンク$a$の対策注目度※<br>$w$：災害危険箇所の要素集合<br>$N_a^w$：$w$のうち、リンク$a$に含まれる災害危険箇所の数<br>$\delta_{a,i}$：リンク$a$がある経路$i$に含まれるなら1、そうでなければ0<br>$N_r$：全経路数<br>$\alpha_i$：経路$i$の重み係数<br>※視点<br>1)災害危険箇所数が少ないリンクほど、対策箇所1箇所あたりでリスクを軽減できる経路が多く、効果的な対策が可能<br>2)あるOD間の経路で、経由する頻度が高く、かつ災害危険箇所数の多いリンクほど注目度が高い<br>3)災害対応上の重要な拠点ペアを結ぶ経路は重みが高く、重みの高い経路が多数通過するリンクほど注目度が高い |

価したい場合には，中南ら(2018)，田島ら(2018)，大澤ら(2021)が適用できると考えられる．経路の所要時間・距離と経路減少の両方を考慮したい場合には原田ら(2014)が適用できると考えられる．また，OD そのものを評価したい場合には嶋田ら(1995)や田島ら(2018)が，OD から個々のノードを評価したい場合は堀井(1996)，原田ら(2014)，鎌谷ら(2019)が適用できる．個々のリンクを評価する場合には中南ら(2018)，大澤ら(2021)が適用できる．

### (3) 定性的比較結果の考察

既存の評価手法において，必要情報に関する条件と評価内容に関する条件を定性的に明らかにした．その結果，①必要情報に関する条件については，必要情報の数を最小限に抑えたい場合，特定の OD を評価したい場合，大規模な災害を考えてその被害を確率的にネットワークに反映させたい場合などによって異なることを示した．②評価内容に関する条件については，災害前後における所要時間や距離の差を評価したい場合，災害後の経路寸断を評価したい場合，OD から個々のノードを評価したい場合などによって異なるということがわかった．

これらのことから，既存の評価手法は，入手できる情報の数や種類・評価したい脆弱性によって適用条件が異なると考えられる．

## 5. 評価手法の定量的比較

### (1) 定量的比較の考え方

仮想ネットワークに対して，各評価手法を適用し，評価指標を求めることで，適用条件のうちネットワーク構造に関する条件を導くこととする．

このとき，仮想ネットワークは平常時と災害時を想定したケースを設定し，平常時・災害時それぞれで評価指標を算出する．

ここでは，4 章の評価手法 7 つのうち，堀井(1996)，原田ら(2014)，中南ら(2018)，大澤ら(2021)の 4 つを対象とする．なお，嶋田ら(1995)，田島ら(2018)，鎌谷ら(2019)は，指標の計算式（**表-5**）より，平常時と災害時それぞれで指標が算出できないため，ここでは除外した．

### (2) 仮想ネットワークと分析ケースの設定

#### a) 仮想ネットワークの設定

本分析での仮想ネットワークの表現方法はグラフとし，ノード 16 個，リンク 24 本が格子状に配置されたものとする．ノードのうち，角に配置された 4 つのノード（**図-2** の 1 と 4 と 13 と 16）を「都市ノード」と呼び，残りのノードを「中継ノード」と呼ぶこととする．ノード属性は都市ノードには魅力度を付与し（すべて 1），リンク属性はすべてのリンクに「距離」（すべて 1）と「災害危険箇所数」（すべて 10）を付与する（**図-2**）．

OD データのうち，OD ペアはすべての都市ノードの組合せ 12 ペアとする．

#### b) 分析ケースの設定

分析ケースは，a)の仮想ネットワークをもとに，使用できないリンクの割合から，0%，25%，50%，75%の 4 ケースとする．これらのケースは，被害の大きさに対する脆弱性の評価結果を比較するために設定する．

0%は平常時のネットワークを想定しており，すべてのリンクを使用できる．25%と 50%と 75%は災害時のネットワークを想定しており，パーセンテージが大きくなるほど，使用できるリンクが少なくなる，すなわち被害が大きくなるものとする．どのリンクを使用できなくするかはランダムに設定した．ランダムに設定した結果，25%のネットワークはすべての OD に経路があり，50%のネットワークは一部の OD に経路があり，75%のネットワークはすべての OD に経路がない状態となった．

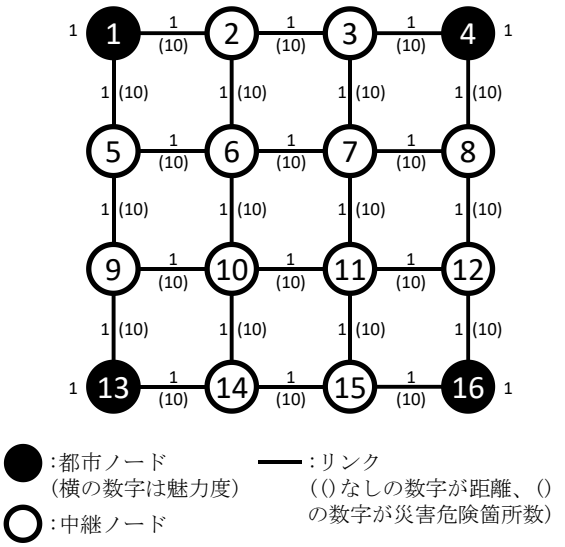



**図-2** 仮想ネットワークの基本形

### (3) ノードに関する評価手法の比較

#### a) 堀井(1996)

堀井(1996)の評価手法では，望ましい距離を各 OD 間の直線距離，実際の距離を各 OD 間の道のりとして，評価値を求めた（**表-6**）．

その結果，0%と 25%のネットワークの評価結果を比べると，迂回度・基準化迂回度は都市ノード 1 と 13 は変化せず，都市ノード 4 と 16 は 25%のときには迂回度が倍以上になり，基準化迂回度は 4 倍近くになった．50%と 75%のネットワークでは評価値が算出できなかった．

#### b) 原田ら(2014)

原田ら(2014)の評価手法では，非重複経路数（N）を 2，とし，評価値を求めた．パラメータについては，経路距

離が伸びた場合にアクセシビリティが半減するよう調整するパラメータ（$\beta$）を 1.15，アクセシビリティの最大値を 1 に近づけるパラメータ（$\theta$）を 6.91 とした．また，クリティカルリンクの閾値$\lambda$は 0.5 とした．

その結果，0%と 25%のネットワークの評価結果を比べると，アクセシビリティと基準化アクセシビリティとクリティカルリンクの本数は，すべての都市ノードで 25%のときには減少した．他方，アクセシビリティ減少率は変化しなかった．そして，総合評価は，都市ノード 1 は 25%のときは変化せず，他の都市ノードは 25%のときに C から E に変化した．なお，総合評価の基準は，**表-7** のとおりである（接続性の閾値 0.68，接続脆弱性の閾値 0.50）．50%と 75%のネットワークでは，総合評価を除き，評価値が算出できなかった．

**c) 考察**

ノードに関する評価手法では，0%と 25%のネットワークはすべての評価手法で評価値を算出できたが，50%と 75%のネットワークは原田ら(2014)の総合評価以外は評価値を算出できなかった．

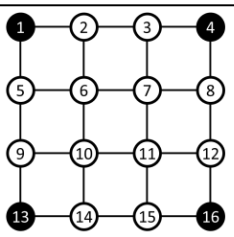
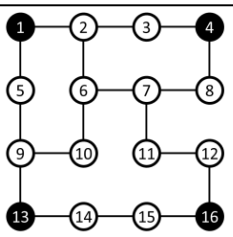
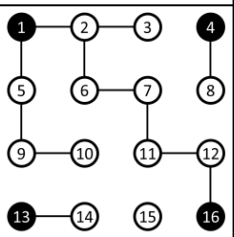
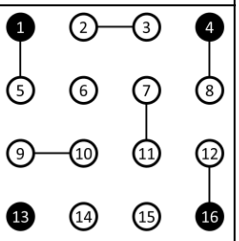
0%と 25%のネットワークの評価結果から考えると，堀井(1996)の指標は 25%のときに減少しており，特に 4-16 間の実際の距離が 3 から 5 になったことが迂回度の増加に反映されていると判断できる．また原田ら(2014)の指標のうち，アクセシビリティと基準化アクセシビリティ，クリティカルリンク本数が減少しており，リンクが減少したことで経路の所要時間が増加したと判断できる．以上のことから，災害発生後に個々のノードの脆弱性が高くなることを評価する際には，堀井(1996)，原田ら(2014)の両方が適用できると考えられる．ただし，原田ら(2014)は，複数経路の平均所要時間を考慮してノードを評価したい場合に適用できるが，OD 間の経路数が平常時の時点で少ないネットワークではアクセシビリティ減少率が最大となりやすい点に注意が必要である．逆に，堀井(1996)は OD 間の複数経路を考慮した計算ができないが，評価値に最大値がない点が原田ら(2014)に対する特徴といえる．

**表-7** アクセシビリティの総合評価[4)]

| 総合評価 | 接続性 | 接続脆弱性 |
|---|---|---|
| A | ○ | ○ |
| B | ○ | × |
| C | ○ | 経路なし |
| D | × | ○ |
| E | × | × |
| F | 経路なし | － |

○：閾値以上　×：閾値より低い　－：計算不可
経路なし：存在経路が与件を満たさない
※優先順位は必ずしもD>C>Bとは限らない

**表-6** 評価結果（ノードに関する評価手法）

| 使用できないリンクの割合 | | 0% | | | | 25% | | | | 50% | | | | 75% | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ネットワーク | |  | | | |  | | | |  | | | |  | | | |
| ノード | | 1 | 4 | 13 | 16 | 1 | 4 | 13 | 16 | 1 | 4 | 13 | 16 | 1 | 4 | 13 | 16 |
| 堀井(1996) | 迂回度 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 1.77 | 0.77 | 1.77 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 基準化迂回度 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.15 | 0.04 | 0.15 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 原田ら(2014) | アクセシビリティ | 2.32 | 2.32 | 2.32 | 2.32 | 1.77 | 1.25 | 1.51 | 1.51 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 基準化アクセシビリティ | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.59 | 0.42 | 0.50 | 0.50 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | アクセシビリティ減少率の最大値 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | クリティカルリンクの本数 | 8 | | | | 4 | | | | - | | | | - | | | |
| | 総合評価 | C | C | C | C | C | E | E | E | F | F | F | F | F | F | F | F |

### (4) リンクに関する評価手法の比較

#### a) 中南ら(2018)

中南ら(2018)の手法において，0%と 25%のネットワークの評価結果を比較すると，リンク端点の第二最小固有ベクトル成分差とカット本数は，最大値，最小値，平均値のすべてで 25%のときに減少した（**表-8**）．50%と75%のネットワークでは，評価値が算出できなかった．

#### b) 大澤ら(2021)

大澤ら(2021)の手法では，経路の重みを，第一経路で2，第二経路で1として評価値を求めた．

その結果，0%と 25%のネットワークの評価結果を比較すると，対策注目度 4 つ（$E_{a1}$，$E_{a2}$，$E_{a1}'$，$E_{a2}'$）は，最大値，最小値，平均値のすべてで 25%のときに増加した．50%と75%のネットワークでは，評価値が算出できなかった．

#### c) 考察

リンクに関する評価手法では，0%と 25%のネットワークはすべての評価手法で評価値を算出できたが，50%と 75%のネットワークは評価値を算出できなかった．

0%と 25%のネットワークの評価結果から考えると，中南ら(2018)の指標は 25%のときに減少しており，ネットワークの連結性が弱くなったと判断できる．また大澤ら(2021)の指標は 25%のときに増加しており，リンクが減少したことで残りのリンクを経由する回数が増え，注目度が上がったと考えられる．以上から，災害発生後に残った個々のリンクの脆弱性が高くなることを評価したい場合には中南ら(2018)，大澤ら(2021)が適用できると考えられる．

### (5) 定量的比較結果の考察

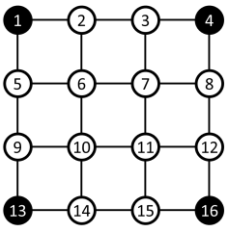
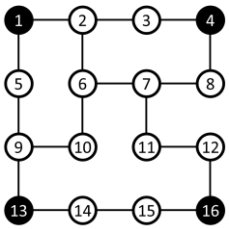
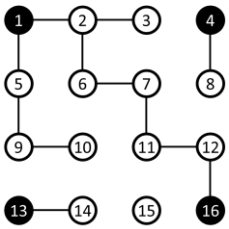
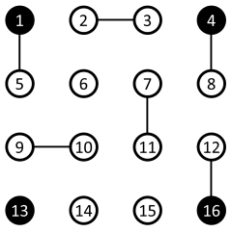
既存の評価手法において，ネットワーク構造に関する条件を定量的に明らかにした．その結果，ネットワーク構造に関する条件については，個々のノードの脆弱性が高くなることを評価したい場合，複数経路の所要時間を考慮してノードの脆弱性を評価したい場合，災害発生後に残った個々のリンクの脆弱性が高くなることを評価したい場合などによって異なるということがわかった．

このことを，4 章における定性的比較と組み合わせて考えると，各評価手法の適用条件は，入手できる情報の数や種類・評価したい脆弱性・評価対象によって異なることがわかった．

## 6. おわりに

本研究では，緊急輸送道路ネットワークの脆弱性評価手法を定性的・定量的に比較することで，各評価手法の適用条件を明らかにした．定性的比較では，評価内容に関する条件，必要情報に関する条件を比較し，定量的比較ではネットワーク構造に関する条件を比較した．その結果，適用条件は，より少ない評価情報でネットワークを評価したい場合，災害前後の所要時間や距離の差を評価したい場合，経路数の多いネットワークの脆弱性を評価したい場合などであり，入手できる情報の数や種類・評価したい脆弱性・評価対象によって異なることが明ら

**表-8** 評価結果（リンクに関する評価手法）

| 使用できないリンクの割合 | | | 0% | | | 25% | | | 50% | | | 75% | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ネットワーク | | |  | | |  | | |  | | |  | | |
| 基本統計量（リンク） | | | 最大 | 最小 | 平均 | 最大 | 最小 | 平均 | 最大 | 最小 | 平均 | 最大 | 最小 | 平均 |
| 中南ら(2018) | リンク端点の固有ベクトル成分差 | | 1.41 | 0.41 | 0.81 | 0.51 | 0.01 | 0.24 | - | - | - | - | - | - |
| | カット本数 | | 4 | | | 2 | | | - | | | - | | |
| 大澤ら(2021) | 対策注目度 | $E_{a1}$ | 0.40 | 0.10 | 0.23 | 0.50 | 0.20 | 0.40 | - | - | - | - | - | - |
| | | $E_{a2}$ | 40.00 | 10.00 | 23.3 | 50.00 | 20.00 | 40.00 | - | - | - | - | - | - |
| | | $E_{a1}'$ | 0.65 | 0.40 | 0.48 | 0.75 | 0.45 | 0.62 | - | - | - | - | - | - |
| | | $E_{a2}'$ | 65.00 | 40.00 | 47.71 | 75.00 | 45.00 | 61.94 | - | - | - | - | - | - |

かになった．この研究成果は，評価したいネットワークや評価したい内容を基に，適用すべき評価手法を選択する際に活用できる．

今後の課題は，一部の OD ペア間の経路がないなどの疎なネットワークを評価できる手法の開発や，適用条件に基づく評価手法の選択方法の提案である．

**参考文献**


1) 中南孝晶，中山晶一朗，小林俊一，山口裕通：固有値解析による固有ベクトルを利用した緊急輸送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.74，No.5，pp. I_1141-I_1148，2018.
2) 鎌谷崇史，中尾聡史，樋野誠一，毛利雄一，片山慎太朗，東徹，川端祐一郎，藤井聡：大規模震災に対する各地域の道路ネットワークレジリエンス評価，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.75，No.5，pp. I_353-I_363，2019.
3) 堀井雅史：迂回度を用いた自然災害時における道路網の代替機能に関する評価方法，都市計画論文集，Vol.31，pp.769-774，1996.
4) 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.
5) 山口裕通，小泉奏子，大澤脩司，中山晶一朗：道路ネットワークの接続性強化に向けた防災拠点の重要度ランクの推定，土木学会論文集 D3（土木計画），Vol.74，No.5，pp. I_303-I_314，2018.
6) 嶋田喜昭，加藤哲男，本多義明：自然災害を考慮した道路網評価に関する基礎的考察，都市計画論文集，Vol.30，pp.97-102，1995.
7) 田島雅己，本間裕大：複数経路の空間的関係に着目した交通ネットワークの頑健性評価，都市計画論文集，Vol.53，No.2，pp.199-205，2018.
8) 大澤脩司，藤生慎，高山純一：災害危険箇所に基づく災害対応の拠点施設間の道路の接続性評価に関する研究，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.76，No.5，pp. I_281-I_296，2021.


(?)