

# 脆弱性の概念を用いた道路網接続性評価に関する研究\*

## Network connectivity evaluation by concept of vulnerability\*

瀬戸裕美子\*\*・倉内文孝\*\*\*・宇野伸宏\*\*\*\*

By Yumiko SETO\*\*・Fumitaka KURAUCHI\*\*\*・Nobuhiro UNO\*\*\*\*

### 1. はじめに

高度に成熟した現代社会において、想定外の事象が発生したとしても深刻な遅延が生じないような信頼性の高いネットワークの構築が非常に重要である。従来提案されている交通ネットワーク信頼性指標においては、事象発生確率を推定することは容易でないという認識により、本研究では、最悪ケースを想定しその影響を最小化する、脆弱性の概念を援用した道路ネットワークの評価手法を構築することを目的とする。具体的には、平均所要時間に閾値を設定しその値以下を満たす OD ペア間に重複のない経路を数え上げるアルゴリズムを開発し、非重複経路数より道路ネットワークを評価する。併せて、同モデルを活用したクリティカルリンク特定方法を提案する。提案した手法を京阪神道路ネットワークに適用し、提案手法の妥当性を検証する。

### 2. 接続性評価の方法

#### (1) N-Edge-connected Network

事象発生確率を考慮せずそのインパクトのみを評価するために、N-edge-connected network<sup>1)</sup>の概念を援用する。N-edge-connected network とは、全ての OD ペアについて、非重複経路が最低 N 本存在するようなネットワークを意味し、最大 N-1 本のリンクが途絶したとしても全ての OD ペアの連結性が保たれるネットワークを表す。つまり、最も都合の悪い N-1 本のリンクが途絶したとしても OD 間の接続性が確保されるという評価となり、最悪ケースを想定する脆弱性解析と整合する評価手法を構成できる。ただし、道路ネットワークにおいてはあまりに長大な迂回路は非現実的であるため、経路本数算定の

際には経路のサービス上限の設定も考える。

#### (2) 変数および記号の定義

$V$	: ノード集合
$E$	: 有向リンクの集合
$rs$	: 任意の OD ペア ( $r \neq s, r, s \in V$ )
$n_{rs}$	: $rs$ 間のリンク重複のない経路本数
$E_{rs}$	: $rs$ 間のリンク重複のない経路セットを構成するリンク集合 ( $E_{rs} \subset E$ )
$x_a$	: リンク $a$ ( $a \in E$ ) が $a \in E_{rs}$ ならば 1, $a \notin E_{rs}$ ならば 0 の 0-1 変数
$\text{in}(i)$	: ノード $i$ への流入リンク集合
$\text{out}(i)$	: ノード $i$ からの流出リンク集合
$c_a$	: リンク $a$ の所要時間
$\tilde{c}_{rs}$	: OD ペア間の最短経路所要時間
$\alpha$	: 許容可能な経路所要時間の上限を表す定数

#### (3) 非重複経路数算出モデル

非重複経路数算出モデルの決定変数は各リンクが非重複経路を構成する集合に含まれるか否かを示す二値変数  $x$  である。ネットワーク形状が与えられた時、OD ペア間のリンク重複のない経路は次の条件を満たしている必要がある。

1. 出発地  $r$  からの経路構成リンク数および到着地  $s$  への経路構成リンク数は、非重複経路数  $n_{rs}$  に等しい。
2. 出発地  $r$  への流入リンク、および到着地  $s$  からの流出リンクは経路構成リンク集合には含まれない。
3. 途中ノード  $i$  ( $i \in V, i \neq r, s$ ) において、流入する経路構成リンク数と流出する経路構成リンク数は等しい。

上記の元に、非重複経路数  $n_{rs}$  を最大とする問題として、非重複経路数算出モデルは次のように記述できる。

Max  $n_{rs}$

subject to

$$\sum_a c_a x_a^* \leq \alpha \tilde{c}_{rs} n_{rs} \quad \text{①}$$

$$\mathbf{x}^* = \arg \min_x \sum_a c_a x_a \quad \text{②}$$

subject to

\* キーワード：道路計画，脆弱性評価，クリティカルリンク

\*\* 学生員，京都大学工学研究科都市社会工学専攻  
(京都市西京区京都大学桂，Tel:075-383-3237,  
seto@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

\*\*\* 正員，博士（工学），岐阜大学工学部社会基盤  
工学科

\*\*\*\* 正員，博士（工学），京都大学経営管理大学院

$$\left. \begin{aligned} \sum_{a \in \text{out}(r)} x_a &= n_{rs}, \quad \sum_{a \in \text{out}(s)} x_a = 0 \\ \sum_{a \in \text{in}(s)} x_a &= n_{rs}, \quad \sum_{a \in \text{in}(r)} x_a = 0 \\ \sum_{a \in \text{in}(i)} x_a - \sum_{a \in \text{out}(i)} x_a &= 0 \quad i \in V, i \neq r, s \end{aligned} \right\} \textcircled{3}$$

①の制約条件は、「全経路の所要時間の平均値が、最短経路所要時間の $\alpha$ 倍まで」に規定するものである。②の制約条件は、複数ある最大の $n_{rs}$ を実現する構成リンク集合の中で最適なものを求めるための問題であり、この問題の目的関数値が1番目の制約条件の左辺となっている。この問題は、簡単な線形整数計画問題で記述可能である。

非重複経路算定モデルを適用した結果より非重複経路数が比較的少ないODペアが脆弱といえ、また全ODペアの非重複経路数の累積分布をみることで異なるネットワークの接続性能を比較することも可能である。

#### (4) クリティカルリンクの特定方法

その途絶がネットワークの接続性に深刻な影響を及ぼすリンク、すなわちクリティカルリンクを特定することもできる。クリティカルリンクを求めるためには、各リンクを1本ずつ途絶( $x_a=0$ )とする制約条件を加えて上記のモデルを再計算し、その結果得られる $n_{rs}$ を用いて以下のリンク重要度指標 LCI (link criticality index) を計算する。この値が大きければ、途絶時に非重複経路数が減少するODペアが多いという意味でクリティカルといえる。

$$LCI_a = \sum_{rs} \left( 1 - \frac{\text{リンク } a \text{ 途絶後の } n_{rs}}{\text{リンク } a \text{ 途絶前の } n_{rs}} \right)$$

以上のアルゴリズムの計算手順は、図1に示す通りである。まず、ネットワーク形状のみによって決まる最大の経路本数を求め、次に経路所要時間が許容範囲である経路本数を求める。最後に、上記の計算方法で LCI の値を求める。

### 3. 京阪神ネットワークへの適用

#### (1) 設定条件

対象ネットワークは、図2に示すように、現在の京阪神地域的高速道路及び一般国道からなる実際に即したネットワークである。ノードは交差点を表しており、そのうちネットワーク上で主要地点と考えられる18箇所をセントロイドとしている。近辺の具体的な地名およびセントロイドに接続するリンクの本数は表1のとおりである。これらのセントロイドを起終点に設定してネットワーク

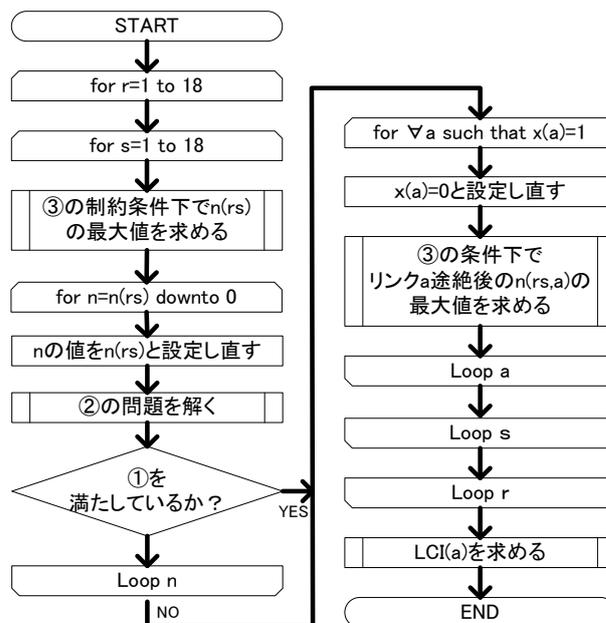


図1 アルゴリズム計算手順

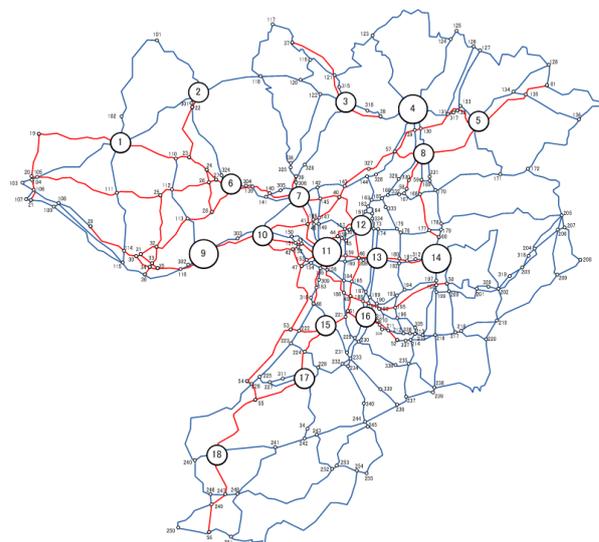


図2 京阪神ネットワーク

表1 セントロイドの地名と接続リンク本数

番号	地名	接続リンク	番号	地名	接続リンク
1	滝野社	6本	10	西宮市	7本
2	篠山市	5本	11	大阪市	13本
3	亀岡市	6本	12	守口市	7本
4	京都市	7本	13	東大阪市	8本
5	大津市	6本	14	奈良市	6本
6	西宮名塩	5本	15	堺	5本
7	池田市	10本	16	羽曳野市	7本
8	城陽市	8本	17	岸和田市	6本
9	神戸市	5本	18	和歌山市	4本

の接続性を評価する。道路リンクは実際のリンク1本に対して双方向に2本ずつ設定している。

(2) ODペア間の接続性評価

京阪神ネットワークのセントロイド間の非重複経路数は、提案したモデルでの計算の結果、図3に示すとおりとなった。出発地を行、到着地を列として表示しているが、本研究では同ノード間の両方向2本のリンク所要時間を等しく設定しているため、マトリックスは対称になっている。ここで、サービス上限を定める定数 $\alpha$ について、 $\alpha=1, 2, \infty$ の3パターンで計算した。 $\alpha=1$ の時、許される経路は最短経路のみである。最短経路が複数本存在する場合は、その本数が経路数となる。また、 $\alpha=\infty$ の時、所要時間の制限がない場合の経路数、つまり真にネットワーク形状のみに依存する経路数が得られる。 $\alpha$ をえることによる経路構成リンクの変化は、例えばODペア10-12(西宮市-守口市)の場合は図4のようになっている。対象とするネットワークでは、 $\alpha=1$ の時、全てのODペア間の経路が1本である。 $\alpha=2$ の時、ほとんどのODペア間の経路数が複数確保される。しかしODペア13-14と15-16に関しては依然として経路が1本のみである。一方、全てのODペアの中で最大の経路数を確保するのは4-13と8-13のペアで、どちらのペア間にもリンク重複の全くない経路が6本存在する。さらに $\alpha=\infty$ の時、最も経路数が少ないのはセントロイド18が発着地のどちらかに含まれる場合で、4本のみである。ここでセントロイ

ド18というのは和歌山市に対応し、ネットワークを見るとこのセントロイドに接続するリンクが4本しかないのでその原因である。このように、所要時間の制限がない場合のODペア間経路数は、発着地セントロイドの小さい方のリンク接続数に依存すると考えられる。しかし、それよりも経路数が小さくなる場合もあり、その場合ネットワークのどこかに問題箇所があるのだと想定される。例えば発着地のいずれかにセントロイド1, 3および17を含むODペアがそれに該当する。以上に挙げたODペアやセントロイドについて、より詳細に考察する。

a) OD ペア 13-14 (東大阪市-奈良市)

東大阪市と奈良市は第二阪奈有料道路でつながっていて、最短所要時間は約10分であるが、2本目以降の経路は40分以上かかるため、サービス上限の制約から $\alpha=2$ の時には2本目の経路は許容されないことが明らかとなった。比較的隣接したペアでおかつ高速道路で接続されている場合、最短所要時間が非常に短い、一般道を利用すると所要時間が長いため、接続性が低いという結果となる。このように、本研究で提案している方法論は $\alpha$ を小さく設定した場合、改善経路のサービスレベル評価にも活用できるといえる。

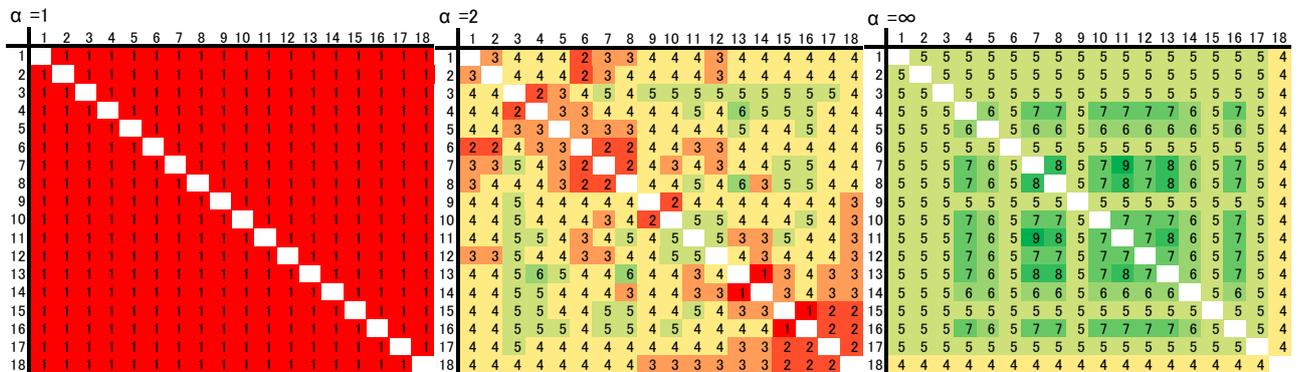


図3 ODペア間経路数

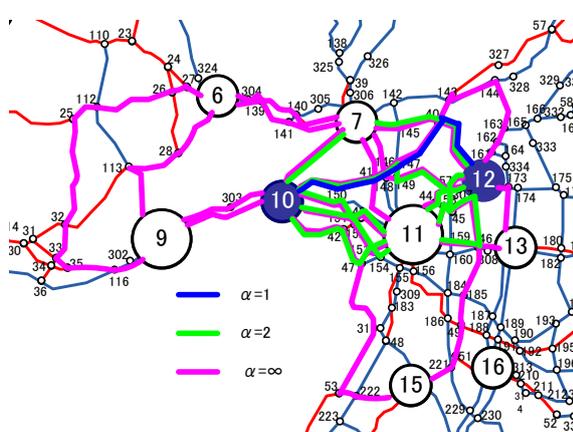


図4 西宮市-守口市の経路構成リンク ( $\alpha=1,2,\infty$ )

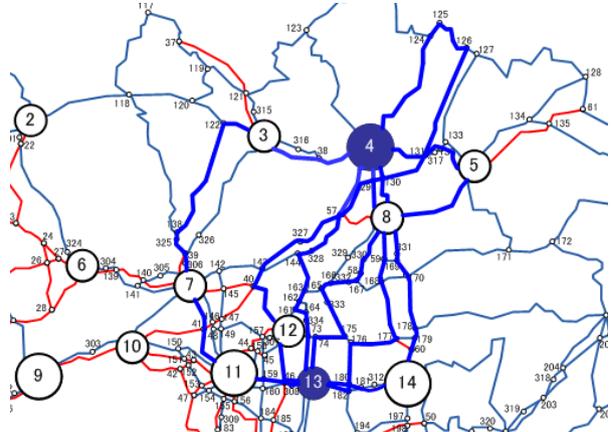


図5 京都市-東大阪市間の経路構成リンク ( $\alpha=2$ )

b) OD ペア 4-13 (京都市-東大阪市)

$\alpha=2$  の時、京都市-東大阪市間には 6 本の経路が確保される (図 5)。このモデルでは経路構成リンクや経路数は決まるが、経路は一意には定まらない。しかし図を見ると明らかに北へ大きく迂回する経路が存在する。a) では最短経路所要時間が小さいため迂回経路がサービス上限に収まらなかったが、京都市-東大阪市間は現状の道路網の整備が比較的遅れているためこのような結果となったとも考えられる。このように、結果が最短経路所要時間に依存している点に注意が必要である。

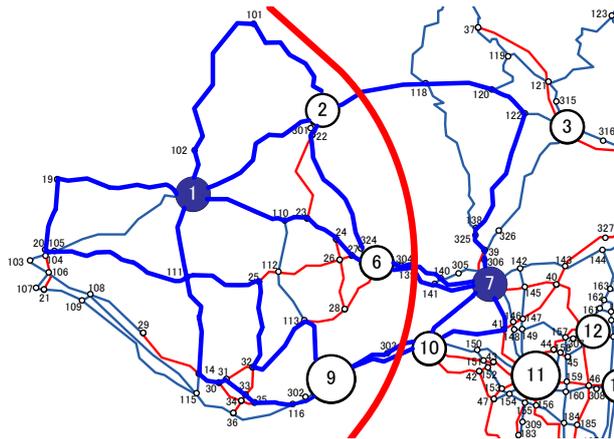


図 6 滝野社-池田市間の経路構成リンク ( $\alpha=\infty$ )

表 2 LCIの計算結果

$\alpha=1$			$\alpha=2$			$\alpha=\infty$		
順位	LinkNo.	LCI(a)	順位	LinkNo.	LCI(a)	順位	LinkNo.	LCI(a)
1	31	0.131	1	243	0.029	1	277	0.044
1	32	0.131	2	244	0.029	1	278	0.044
1	37	0.131	3	45	0.028	3	45	0.04
1	38	0.131	3	46	0.028	3	46	0.04
1	243	0.131	5	11	0.026	3	329	0.04
1	244	0.131	6	12	0.026	3	330	0.04
7	85	0.127	7	31	0.024	3	333	0.04
7	86	0.127	8	32	0.024	3	334	0.04
7	167	0.127	9	301	0.023	9	32	0.036
7	168	0.127	9	529	0.023	9	244	0.036

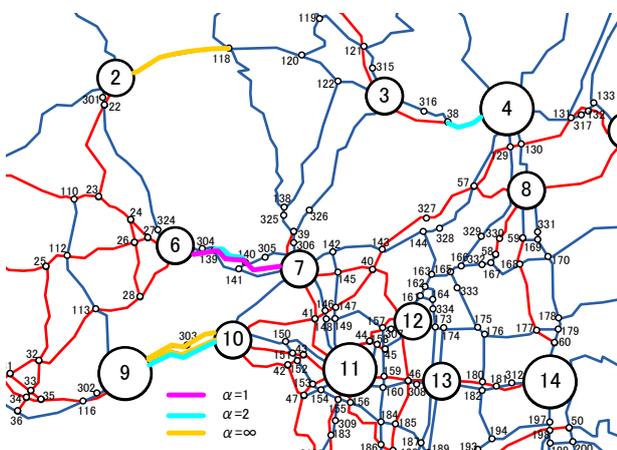


図 7  $\alpha$  の値別のクリティカルリンク

c) セントロイド 1 (滝野社)

滝野社を発着地のいずれかに含む OD ペア間の経路数は、 $\alpha=\infty$ の場合にも、発着地セントロイドのリンク接続数より小さい。これは OD 間のどこかに、経路を限定する原因があると考えられる。滝野社を発着地に含む OD ペアのひとつ、1-7 (滝野社-池田市) の 5 本の経路を構成するリンクを図 6 に示す。滝野社に接続するリンクは 6 本、池田市に接続するリンクは 10 本あるのだが、滝野社からほかのセントロイドを経由する際に経路数が限定される。図をみれば明らかのように、セントロイド 2, 6, 9 の東側に 5 本のリンクでネットワークが分断されるカットが抽出できる。そのため、セントロイド 1, 2, 6, 9 とその他のセントロイドを接続する経路数はせいぜい 5 となるのである。このように、提案する手法により、カットセットの抽出も可能である。

(3) クリティカルリンクの特定

続いて、LCIの計算結果を表 2 に示す。この結果から、 $\alpha$ の値によってクリティカルリンクが変化することがわかる (図 7)。 $\alpha=1$ ,  $\alpha=2$ の時は、所要時間の短い高速道路がクリティカルとされるが、 $\alpha=\infty$ の時は所要時間に依存せず、ネットワーク形状によってのみ決まるため、一般国道もクリティカルとなる。この結果は、災害を想定した場合やあるいは次善経路の評価の際など評価の目的によってクリティカルとされるリンクが異なることを示しており、本研究で示した手法は、様々な状況に応じた接続性の評価に活用可能といえる

4. おわりに

本稿で提案した接続性評価手法は、許容可能な経路所要時間に上限を用いることで現実的な評価が可能であり、簡単な線形最適化問題で記述できるため大規模ネットワークにも適用可能といえる。実際に即した京阪神ネットワークに適用しその接続性を分析したが、今後は将来に建設予定の高速道路を加えた京阪神ネットワークに適用し、現在のものと比較することで新規道路建設の効果について評価・考察していきたい。

参考文献

1) Grötschel, M : Design of survivable networks. Handbook in Operations Research and Management Science, 7, pp.617-672, 1995