

# 道路網の効率的な連結信頼性向上のための重要度指標の大規模ネットワークの適用性

長江貴弘<sup>1</sup>・若林拓史<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 名城大学大学院 都市情報学研究科 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘4-3-3)  
E-mail: 133781501@c alumni.meijo-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 名城大学教授 都市情報学部 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘4-3-3)  
E-mail: wakabaya@meijo-u.ac.jp

わが国では災害が多いため、道路網の一部が寸断されることがしばしばある。その際、代替路があれば、目的地までの到達性が保証される。道路網の機能維持には、リンクの信頼性向上が必要だが、費用的制約から信頼度を向上させるリンクの選定が必要となる。そこで必要となるのが重要度指標である。道路網の重要度指標には主に2つの課題があり、それは道路網に適した重要度指標の開発と、計算量の削減である。従来から、並行リンクの公平性や費用対効果などを鑑みた道路網に適用しやすい計算法を検討してきた。本研究では、既存の重要度指標と筆者らが提案している重要度指標を紹介し、Sioux Falls ネットワークで従来の方法との比較分析を行う。さらに、大規模ネットワークで重要度を計算する際に必要となる計算量の削減方法(近似解法)を考察・提案する。

**Key Words:** Highway network reliability, Importance index, Probability Importance, Cost-benefit analysis, Partial minimal path set.

## 1. はじめに

我が国では、地震・水害などの自然災害にたびたび見舞われており、道路網の一部が寸断されることも珍しくない。その際に代替路があれば、道路網としての機能を維持することができる(連結信頼性の確保)。信頼性の高い道路網を形成することが社会的な要請として存在する(「国土強靱化計画」など)が、すべての経路を強化することは費用的制約から困難である。したがって、どの経路を強化するのが望ましいか判断・評価するための客観的な基準が必要である。これは重要度評価<sup>1)</sup>と呼ばれている。道路網の重要度評価には主として2つの課題がある。1つは、道路網に適した重要度評価指標の開発であり、もう1つは、効率的な重要度の計算方法と計算量の削減(近似解法)である。

重要度評価については、既にいくつかの指標が提案されており、それらは筆者らによって整理されている<sup>2,3)</sup>が、どのような指標が道路網に用いるのに適しているかの検証と計算結果の蓄積が十分ではない。したがって、本論文ではリンク信頼度の組み合わせを乱数を用いて大量に発生させて単純なネットワークで重要度指標の比較分析を行う。また、このような重要度評価を大規模ネットワークに適用した際の必要要件を探るため、計算量の削減

方法の比較とネットワークを拡大した際の重要度評価の試算を新たに行う。

以下、本論文の構成を述べる。2.では、道路網の信頼性と重要度評価に関する研究をレビューし、各種指標の位置づけや問題点を略述する。3.では、連結信頼性の定義と従来の重要度評価の問題点を述べる。4.では、並列ネットワークと田の字型ネットワークにおいて2種類の重要度指標を用いてノード間信頼度と費用対効果の計算・比較を行う。5.では、大規模ネットワークでの重要度解析に必要な近似解法を提案し、Sioux Falls ネットワーク(後述)での計算例を示す。6.では、2.で提起した課題に対する本研究での成果を取りまとめる。

## 2. 道路網の信頼性と重要度評価：研究のレビュー<sup>2)</sup>

道路網の信頼性には、連結信頼性、旅行時間信頼性、容量信頼性などが提案されている<sup>1)</sup>が、本論文では連結信頼性とその重要度評価について取り上げる。

信頼性とは、「システム等が規定の使用期間中、所定の機能を遂行しうる状態にあること」を意味し<sup>4)</sup>、信頼度とはその確率表現であると定義されている<sup>5)</sup>。

重要度指標の目的は、システムの信頼度を効率的に向上

させるためのものであり、後述する確率重要度<sup>6)</sup>やクリエイティビティ重要度<sup>7)</sup>などが提案されている。重要度は、システムの構成要素の信頼度を向上させた際のシステムの信頼度への寄与の程度と解釈することができる。文献 4)においても、『直感的に、要素の信頼度を向上させた場合のシステム信頼度向上への寄与度を、当該要素の重要度として計測することは妥当である』と述べている。本論文でも、道路網の連結信頼性の重要度を、リンク信頼度を向上させた際のノード間信頼度への寄与度と定義する。道路網において重要度評価を用いて連結信頼性を改善するには以下のような手順が必要と考えられる。

- 手順 1. 改善対象となる道路網の範囲の設定
- 手順 2. 設定範囲内での各々のリンク信頼度の算出
- 手順 3. 対象とするノード間信頼度の算出
- 手順 4. 重要度評価を用いてリンクの重要度を算出
- 手順 5. 重要度の高いリンクの信頼度を向上させる
- 手順 6. 改善後のノード間信頼度・改善費用等の算出
- 手順 7. 手順 2.に戻る

手順 2.でのリンク信頼度については、想定する災害や設定対象となる道路によって算出の方法が変わると考えられるので、本論文では簡単のためリンク信頼度は与件とする。手順 4.で使用する重要度評価の種類によってリンクの重要度、すなわち改善対象となるリンクは異なってくる。したがって、手順 5.でリンク信頼度を実際に改善させた後に手順 2.に戻り、重要度の再計算を行う際は、前回の改善結果の影響を受けることになる。

次に、現状において用いられている重要度評価についての課題について述べる。

- 1) 確率重要度  $RI$  (後述) では、信頼度の高いリンクの改良が、信頼度の低いリンクの改良より困難であることを考慮できない欠点がある。
- 2) 並列システムでは一般に、信頼度の高い側の改善が有効とされ、低い側の信頼度改善は無視される。
- 3) 重要度評価のみでノード間信頼度の妥当な改善が可能なのか保証がない。費用対効果の視点も必要である。

1),2)については、これらの課題を解消するために新たに  $ICI$  指標(後述)<sup>8)</sup>が提案されているが、ネットワークに当てはめて計算した際の結果の検証や  $RI$  指標との比較がまだ十分になされているとはいえないので、本論文ではそれらを取り上げる。

3)については、従来の重要度評価指標によってネットワークの改善を行った際の、結果として得られるノード間信頼度にどのような差異が出るかという比較がほとんどなかった点である。これについて費用とリンク信頼度の関係を表した  $Cost-Reliability$  関数を設定すれば、リンク信頼度が大きくなればなるほど災害対策にかかる費用は増大し、リンク信頼度の低いリンクを強化する費用は低い

という仮説を設定可能である<sup>8)</sup>。

本研究では、2),3)の問題に対し、数学的合理性のある解、つまり最適解と公平性満足のある解(ここでいう「公平性」とは、後述の 3.(2)の問題 2.に示すように、並行する経路がどちらも改善対象となる状態のことをいう)とどの程度の乖離があるのかを理論的に明らかにすることを目的とする。この差が大きくなければ、重要度指標による数学的合理性のある解に必ずしもこだわらなくてもよいという考え方も可能だからである。さらに、複数の費用・リンク信頼度関数を設定し、数学的合理性のある解と公平性満足および費用便益分析を用いた解とを比較し、その違いが費用・リンク信頼度関数との関係でどのようになるのかを明らかにする。そして、試験的なネットワークを設定して重要度評価および費用便益分析による『初期値』から『最適解』に至る『改善パス』を計算する。比較のための評価指標は、ノード間信頼度およびノード間信頼度/費用比率を用いる。

以上を踏まえて従来の研究をレビューする。

道路網において重要度評価を扱った論文の事例は、阪神淡路大震災前後のネットワーク評価<sup>9)</sup>、交通制御の観点から重要なリンクを発見する方法<sup>10)</sup>、費用・リンク信頼度関数による方法<sup>11)</sup>、連結強度と連結迂回率により強化すべきリンクを指摘する方法<sup>12)</sup>などがある。最近では、中山<sup>13)</sup>が膨大な既存研究の整理と今後の課題をまとめている。さらに、旅行時間信頼性と連結信頼性を統合した費用便益分析による方法を提案している。文献 11)では、リンク信頼度は交通量の関数で与えているので、信頼度向上のためのコストの概念が明示的に考慮できていない。また、文献 12)では、汎用的なコスト・リンク信頼度関数は与えているものの、1種類のみであり、かつリンク信頼度の改善に伴う費用は余り増加していないので実効性のある結論を得ているのか疑問がある。また、11), 12)どちらの研究も、ノード間信頼度の改善を効果的に与える評価指標に焦点を当てているが、各重要度指標による改善の際や費用との関係評価にまでは至っていない。文献 13)では、便益を捉える視点が増えるため重複計算がないようにするのが課題であり、リンクが途絶する期間によって道路利用者の行動基準が変化することを基に、連結信頼性を旅行時間短縮による便益に置き換えて評価している。この指標については現段階では端緒についたばかりであり、道路網の形態によって便益がどのように算出されるかは未知数である。

このため、本研究では費用・リンク信頼度関数を明示的に 3 種類設定する。その上で、従来の指標による改善の結果と、新たに提案する公平性満足の解を得られやすい指標による改善の結果を比較評価する。本論文では、3 つの重要度評価指標を比較する。

### 3. 連結信頼性の定義と従来の重要度評価の問題点<sup>2)</sup>

#### (1) 道路網における連結信頼性の定義

道路網において、特定のノード AB 間を結ぶリンク  $a$  に二値確率変数  $X_a$  を次のように定義する。

$$X_a = \begin{cases} 1, & \text{リンク } a \text{ での円滑な走行移動が保証される場合} \\ 0, & \text{そうでない場合} \end{cases} \quad (1)$$

リンク信頼度  $r_a$  は以下のように与えられる。

$$r_a = E[X_a] \quad (2)$$

システム全体の構造関数の定義は以下ようになる。

$$R(\mathbf{r}) = E \left[ 1 - \prod_{s=1}^p (1 - \prod_{a \in P_s} X_a) \right] \quad (3)$$

ここで、 $R(\mathbf{r})$  はノード AB 間のノード間信頼度、 $p$  はパス総数、 $a$  はリンク番号、 $P_s$  はリンク信頼度 ( $s$  番目のミニマルパス) を表している。

ノード間信頼度を向上させることが、道路網の連結信頼性の向上に必要なが、そのためにどのリンクを改善すればよいかを判断するのに用いるのが、重要度評価となる。

#### (2) 従来の重要度の定義とその特徴

従来より以下のような重要度が提案・利用されているので簡単に紹介する。

確率重要度  $RI$  (Birnbau's Reliability Importance)<sup>9)</sup> は、以下に定義される測度であり、ノード間信頼度を当該リンク信頼度で偏微分したものである。

$$RI_a = \partial R_{AB}(\mathbf{r}) / \partial r_a \quad (4)$$

クリティカルリティ重要度  $CI$  (Criticality Importance)<sup>7)</sup> は、リンク信頼度のパーセント変化に対するノード間信頼度のパーセント変化の比として定義される。

$$CI_a = \lim_{\Delta r_a \rightarrow 0} \left\{ \frac{\Delta R_{AB}(\mathbf{r}) / R_{AB}(\mathbf{r})}{\Delta r_a / r_a} \right\} = RI_a \times \frac{r_a}{R_{AB}(\mathbf{r})} \quad (5)$$

ここで  $R(\mathbf{r})$  はノード AB 間のノード間信頼度、 $a$  はリンク番号、 $r_a$  はリンク信頼度である。この値が大きければ大きいほど重要、つまりノード間信頼度の改善への寄与度が高いことを表す。



図-1 直列ネットワーク

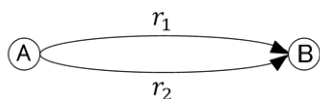


図-2 並列ネットワーク

しかし、これらの重要度を道路網に適用すると以下の問題がある。

問題 1.  $CI$  は、直列ネットワーク(図-1)においてリンク信頼度の値に関わらず、重要度が同じになる。

問題 2.  $RI, CI$  とともに、並列ネットワーク(図-2)において信頼度の低いリンクが放置される。

問題 3.  $RI, CI$  とともに並列ネットワークにおいて、より高い信頼度のリンクを改善することが、低い信頼度のリンクを改善することよりも、費用的・技術的に困難であることを反映していない。

これらの問題を解決するために提案するのが、次節で述べる改良型クリティカルリティ重要度( $ICI$ )である。

#### (3) 改良型クリティカルリティ重要度の定義とその特徴

クリティカルリティ重要度を参考に、リンク不信頼度を

$$q_a = 1 - r_a \quad (6)$$

として、改良型クリティカルリティ重要度を以下の式のように定義される<sup>8)</sup>。

$$ICI_a = \lim_{\Delta q_a \rightarrow 0} \left\{ \frac{\Delta R_{AB}(\mathbf{r}) / R_{AB}(\mathbf{r})}{\Delta q_a / q_a} \right\} = RI_a \times \frac{(1 - r_a)}{R_{AB}(\mathbf{r})} \quad (7)$$

よって、 $ICI_a$  と  $RI_a$  の間には、

$$ICI_a = \frac{(1 - r_a)}{R} RI_a \quad (8)$$

の関係が成り立つ。したがって、2つのリンクの確率重要度( $RI$ )の値が同じだったとしても、信頼度の低いリンクの方が  $ICI$  の値が大きくなることを示している。これにより、 $ICI$  は信頼度の高いリンクの改善は低いリンクの改善よりも困難であることを反映しているといえる<sup>8)</sup>。

また、並列ネットワークでは  $ICI$  の値は等しくなるため、信頼度の低いリンクが放置される問題が解消される。

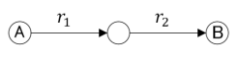
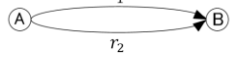
なお、改善リンクの選定には別の基準が必要であり、本論文で 4.以下で Nicholson<sup>14)</sup> と同様の考え方である、『コストーリンク信頼度関数』を用いてノード間信頼度の『改善パス』を考察する。

#### (4) 各種重要度指標の利害得失

以上述べてきた 3 種類の重要度指標の利害得失をまとめると以下の通りとなる(表-1)。

改良型クリティカルリティ重要度( $ICI$ )は、 $RI$  の欠点を克服し、信頼度の高いリンクの改善がより困難であることを反映できる。直列ネットワークでは  $CI$  の欠点を克服しており、並列ネットワークではリンク間での公平な改善をもたらす可能性がある。

表-1 重要度指標の利害得失

	<i>RI</i>	<i>CI</i>	<i>ICI</i>
直列ネットワーク	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$
	$R_{h1} > R_{h2}$	$C_h = C_h$	$IC_{h1} > IC_{h2}$
判定	Good	NG	Good
並列ネットワーク	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$
	$R_{h1} < R_{h2}$	$C_h < C_h$	$IC_h = IC_h$
判定	NG	NG	It says nothing

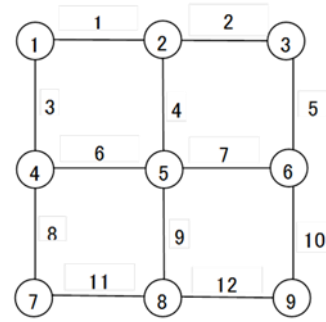


図-3 田の字型ネットワーク

4. 重要度指標の比較分析

(1) Cost-Reliability 関数と費用対効果関数の設定<sup>2)</sup>

改良型クリティカリティ重要度(*ICI*)では、並列ネットワークにおいて重要度が同じとなる。したがって、改善するリンクを選択するために別の指標が必要となる。そのため、改善するリンクの信頼度とそれにかかる費用の関係を表した3種の Cost-Reliability 関数を設定した<sup>8)</sup>。

a) ケース A:費用一定型

$$CostA = 1000 \tag{9}$$

このケースでは、リンク信頼度の大小にかかわらず、信頼度改善費用は一定である。

b) ケース B:費用線形増加型

$$CostB = 5000 \times (r_a + 0.1) \tag{10}$$

リンク信頼度が増加するにつれて、改善費用が線形に増加するケースである。

c) ケース C:費用2次関数増加型

$$CostC = 500 \times (50 \times r_a^2 + 15 \times r_a + 1) \tag{11}$$

リンク信頼度が増加するにつれて、改善費用が2次関数として増加するケースである。

また、リンクの信頼度改善の費用対効果を測るために、以下の費用対効果関数(*Eff*)を設定した<sup>8)</sup>。

$$Eff(Y, F) = \frac{R_{AB} - R_{AB0}}{Cost_{AB}} \times Y \times F \tag{12}$$

ここで、*Y*は道路網の信頼性を評価する期間であり、*F*は信頼度改善によって得られる年間の輸送交通量を費用換算したものである。 $R_{AB0}$ と $R_{AB}$ は、初期と改善後のノード間信頼度であり、 $Cost_{AB}$ は、改善にかかる総費用である。計算の単純化のため、利率は考慮していない。

(2) 並列、田の字型ネットワークによる計算例

直列ネットワークの場合、3.(2)で述べたように *CI* による改善に問題があり、*RI* でも *CI* でも信頼度の低いリンクを改善させるのが効果的なのは自明なため、省略する。

ここでは、並列ネットワーク(図-2)と田の字型ネットワーク(図-3)による *RI* と *ICI* の選択する改善リンクと費用

対効果の比較を行った。

a) 並列ネットワークでの *RI* と *ICI* の比較<sup>2)</sup>

まず、並列ネットワーク(図-2)での *RI* と *ICI* の比較である。*ICI* の場合、並列では重要度の値が同じになるため、Cost-Reliability 関数を利用して費用が安い方を改善リンクとして選択するようにした。リンク信頼度の初期値は(0.4,0.5)とし、1回に改善するリンク信頼度の改善幅を0.1として、4段階に渡って改善を行った。

その結果、3.(2)の問題 2.の性質により、*RI* による改善はリンク信頼度の差が拡大するのみで、信頼度の低いリンクが放置されることが判明した。ノード間信頼度については *RI* の方が優るが、改善にかかる総費用は *ICI* の方が安く済む結果となった。また、費用対効果(*Eff*)では、もっとも現実的な仮定と考えられるケース C で *ICI* の方が効果が大きい結果となった。

b) 田の字型ネットワークでの *RI* と *ICI* の比較<sup>15)</sup>

次に、田の字型ネットワーク(図-3)で乱数のサンプルを用いて *RI* と *ICI* で選択されるリンクと費用対効果の比較を行った。リンク信頼度の初期値は2000組の乱数を発生させて与え、1回に改善するリンク信頼度の改善幅を0.05として、6段階に渡って改善を行った。

その結果、*RI* による改善では、同じリンクを改善する傾向が強いことが判明した。道路整備の観点からは *RI* の結果は良いとはいえず、それが総費用、費用対効果の数値に表れた。すなわち、総費用ではケース B,C ともに *RI* の方が数値が大きく(費用がかかる)、費用対効果ではケース B,C ともに *RI* は値が小さい。*RI* による改善では、ノード間信頼度( $R_{AB}$ )の改善の割には費用がかかるということである。それを裏付けるように、ノード間信頼度( $R_{AB}$ )の改善後の値は *RI* と *ICI* でそれほど差はない。

総費用・費用対効果は *ICI* は *RI* より優れており、*RI* と *ICI* でノード間信頼度の数値にそれほど差はない傾向にある。全体として見ると、道路網におけるリンクの重要度指標は *RI* よりも *ICI* の方が費用対効果・リンク改善の公平性の観点で優っているといえる。

## 5. 大規模ネットワークへの重要度分析の適用

### (1) 近似解法の必要性とその比較

連結信頼性の計算は、ネットワークの規模が拡大すると計算量が膨大になるため、その削減が必要となる。その一つの方法が一部のパスセットを用いて近似値を計算する方法である<sup>8)</sup>。

その初期的な検討例としては、田の字型ネットワーク(図-3)において、パスの生起確率順にパス数を減じていったものがある<sup>8)</sup>。道路網の連結信頼性の重要度評価で重視すべき点は、厳密値と近似値で、リンクの重要度の順序に変化がないことである。ここが変化すると、近似値を用いる意味が薄くなる。ICIの計算結果として、全パス12本から7本程度まで減らすのなら、順序に大きな変化がないことが判明している。これは、ノードペア間(1,9)の中ですべてのリンクが含まれる範囲でパス数を減じれば、重要度の順位にあまり変化がないことを示唆しているといえる<sup>8)</sup>。

本研究ではそれを踏まえ、パスを減らす方法として新たに距離順を加えて生起確率順との比較を行うことにした。距離順で選択する理由としては、実際の道路網では距離の短いパスから利用されると考えられることが挙げられる。今回使用したのは、田の字型ネットワークで、リンク信頼度を $0.3 \leq r < 0.7$ 、 $0.4 \leq r < 0.6$ として乱数を発生させたものを用意し、パス数を生起確率順と距離順で減じてゆき、ノード間信頼度の値を比較することとした。今回は、新たに50組分の近似解法の比較を行った。その結果を図-4、図-5に示す。

図-4のグラフは、生起確率順と距離順のリンクの重要度の値を比較したものである( $0.3 \leq r < 0.7$ の50組の平均値)。右端のpath12がパスをすべて用いた厳密値となる。折れ線は、各々のリンクの重要度の値である。図-5のグラフは、生起確率順と距離順のノード間信頼度の近似値を比較したものである( $0.3 \leq r < 0.7$ および $0.4 \leq r < 0.6$ の50組の平均値)。

図-4を見ると、9パス程度までならリンクの重要度の順位にはあまり変化がないことがわかる。図-4では( $0.4 \leq r < 0.6$ )のグラフは省略したが、傾向としては同様である。また、5パスのあたりで順位が大きく変動していることがわかる。

図-5を見ると、ノード間信頼度の近似値は生起確率順、距離順であまり違いはないことがわかる。したがって、部分パスセット選択の方法は、生起確率順のみならず距離順にも実用の可能性があることを、この結果は示唆している。また、いずれの方法でも5パスのあたりでリンクの重要度(図-4)、ノード間信頼度の近似値の値が大きく変動している。これは、パスを選択する際に一部のリンクが含まれないことが原因と考えられる。したがって、

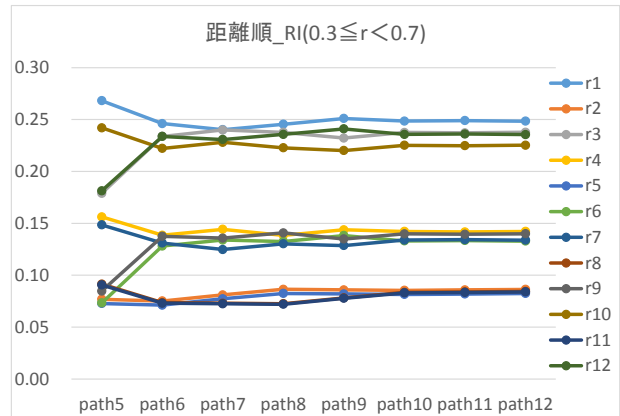
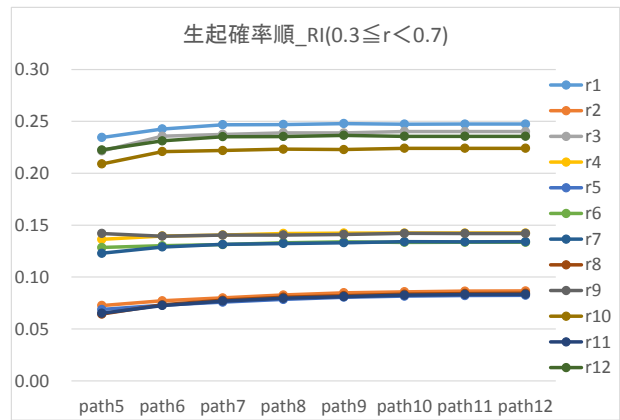


図-4 近似解法を用いたリンクの重要度の比較(50組の平均)

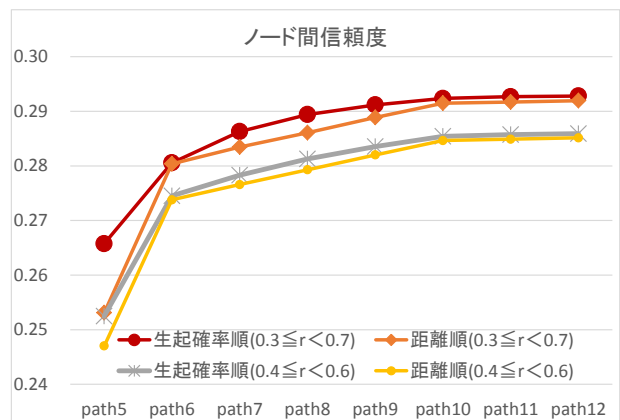


図-5 近似解法を用いたノード間信頼度の比較(50組の平均)

部分パスセット選択を用いるにはすべてのリンクが含まれるようにパスを選ぶのが望ましいといえる。

### (2) Sioux Falls ネットワークでの近似解法の利用

前節までの結果を踏まえ、本論文では新たにネットワークの規模を拡大して近似解法を用いてリンクの重要度の計算などを行った。用いたネットワークはSioux Falls ネットワーク(図-6)である。ただし、Sioux Falls ネットワークは、以下の理由から無向グラフにしている。まず、計算の簡略化である。リンク数を半分にする事で、パス数としてはそれ以上に減少し、ノード間信頼度などの

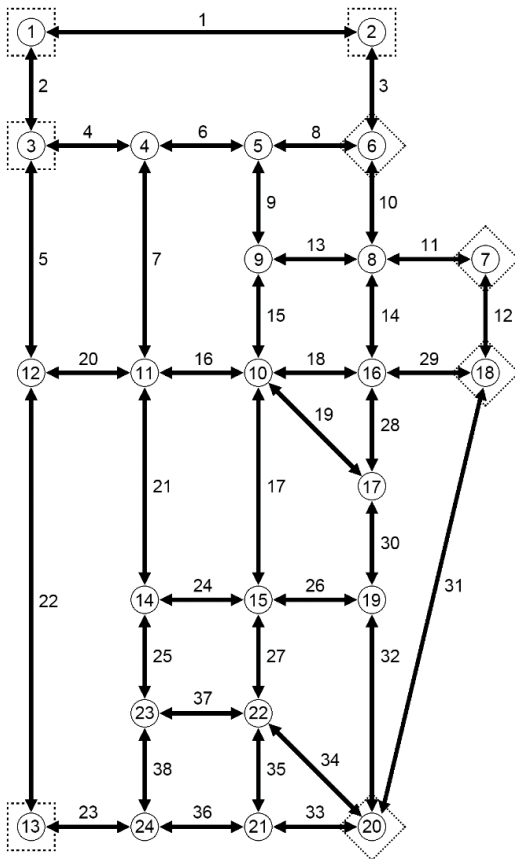


図-6 Sioux Falls ネットワーク

計算がしやすくなるからである。また、実際の道路は方向別で完全に独立していることは少なく、リンク信頼度の値を別々に与えることが合理的でないと考えられている。

Sioux Falls ネットワークでは、すべてのパスを用いてノード間信頼度の厳密値を求め、リンクの重要度の計算を行うのは困難なため、部分パスセット選択を行った。前節の田の字型ネットワークでの近似解法の結果から、全てのリンクがパスに含まれるようにしつつ、パス数が少なくなるように選択した。これは、厳密値に近いノード間信頼度を得るためと、計算時間の短縮を目的としたものである。今回選択したのはノード1からノード20間(図-6)の24パスで、以下の3つの方法でパス選択を行った。

a) パス選択方法 I

経由するリンク数の少ない経路(パス)から順に並べて、24本のパスを選択する。しかし、そのままではすべてのリンクが含まれないため、パスの並びはそのままにして、1本置きにパスを選択してすべてのリンクが含まれるようにする。

b) パス選択方法 II

距離の短い経路(パス)から順に並べて、24本のパスを

選択する。しかし、そのままではすべてのリンクが含まれないため、パスの並びはそのままにして、同じ距離となるパスの1本目をそれぞれ選んですべてのリンクが含まれるようにする。

c) パス選択方法 III

距離の短い経路(パス)から順に並べて、24本のパスを選択する。同じ距離のパスから2本ずつ、かつ最初のリンクが異なるものを選んですべてのリンクが含まれるようにする。

このネットワークで部分パスセット選択を行い  $RI, ICI$  を比較した結果を示す。リンク信頼度の初期値は、最小値と最大値の差が大きいもの Case1:  $0.3 \leq r < 0.7$  (表-2) と、差が小さいもの Case2:  $0.4 \leq r < 0.6$  (表-3) と、初期値の大きいもの Case3:  $0.5 \leq r < 0.7$  (表-4) を用意し、乱数を50組発生させるものとした。リンク信頼度の改善手順は以下ようになる。

- 手順1. 重要度指標( $RI$ と $ICI$ )を用いて各々のリンクの重要度(ノードペア間1,20)を計算
- 手順2. 重要度が最大となったリンクの信頼度を0.05向上させる
- 手順3. 各種計算を行う
  - ・ノード間信頼度
  - ・リンク信頼度を用いた計算(最大-最小, 分散)
  - ・信頼度改善に伴う費用( $CostB, CostC$ )
  - ・費用対効果関数( $Eff_B, Eff_C$ )
- 手順4. 手順1に戻る
- 手順5. 1~4.の手順を6回繰り返す

比較する項目は表-2~4のそれぞれ上から順に、ノード間信頼度( $R_{AB}$ )、リンク信頼度を用いた計算結果(max-min, var), Cost-Reliability 関数を用いて計算したリンク改善の総コスト( $CostB, CostC$ )、費用対効果関数( $Eff$ )の計算結果( $Eff_B, Eff_C$ )、改善対象リンクの本数である。Cost-Reliability 関数のうち、改善回数のみで費用が決まるケース A は省略した。計算結果の欄は、表-2~4のそれぞれ左から順に初期値、 $RI$ による改善結果、 $ICI$ による改善結果である。緑色に塗られている欄が、結果として優れていることを意味する。

表-2~4を見ると、パス選択方法によってノード間信頼度の近似値(初期値)が変動していることがわかる。この差が大きいかどうかの判断はサンプルがまだ少ないので今後の課題とする。また、それを用いて計算した総コスト・費用対効果などの値も当然変動する。ただし、これらの値を用いて  $RI, ICI$  の傾向を見ることは可能である。

したがって、この計算結果を基に  $RI, ICI$  の比較を行う。

ノード間信頼度( $R_{AB}$ )については、リンク信頼度のすべてのケースで  $RI$  が  $ICI$  より優っている。ただし、値は両者

表-2 Sioux Falls ネットワークでの信頼度改善比較  
(50組の平均値, Case1:  $0.3 \leq r < 0.7$ )

パス選択方法 I		初期値	RI	ICI
ノード間信頼度	R	0.0927	0.1209	0.1183
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.3786	0.4700	0.3851
	var	0.0126	0.0143	0.0124
LinkReliability-Cost関数	CaseB	19238.9	15640.0	
	CaseC	83352.4	57441.6	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	0.74489	0.81123	
	CaseC	0.17963	0.22265	
改善対象リンクの本数			1.60	2.66
パス選択方法 II		初期値	RI	ICI
ノード間信頼度	R	0.0614	0.0813	0.0805
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.3786	0.3915	0.3768
	var	0.0126	0.0131	0.0123
LinkReliability-Cost関数	CaseB	16812.0	15335.9	
	CaseC	64940.8	55108.4	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	0.59228	0.62128	
	CaseC	0.15614	0.17480	
改善対象リンクの本数			2.40	2.72
パス選択方法 III		初期値	RI	ICI
ノード間信頼度	R	0.0799	0.1042	0.1026
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.3786	0.4246	0.3811
	var	0.0126	0.0136	0.0124
LinkReliability-Cost関数	CaseB	17904.1	15485.6	
	CaseC	73027.0	56281.7	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	0.68139	0.72862	
	CaseC	0.17113	0.20237	
改善対象リンクの本数			1.98	2.72

表-3 Sioux Falls ネットワークでの信頼度改善比較  
(50組の平均値, Case2:  $0.4 \leq r < 0.6$ )

パス選択方法 I		初期値	RI	ICI
ノード間信頼度	R	0.0906	0.1174	0.1153
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.1893	0.3962	0.2776
	var	0.0031	0.0055	0.0039
LinkReliability-Cost関数	CaseB	20312.4	17408.8	
	CaseC	90247.8	68381.5	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	0.66375	0.70772	
	CaseC	0.15141	0.18068	
改善対象リンクの本数			1.12	2.72
パス選択方法 II		初期値	RI	ICI
ノード間信頼度	R	0.0596	0.0769	0.0761
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.1893	0.2802	0.2165
	var	0.0031	0.0044	0.0035
LinkReliability-Cost関数	CaseB	18209.1	16601.6	
	CaseC	73884.5	62599.4	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	0.47573	0.49505	
	CaseC	0.11818	0.13152	
改善対象リンクの本数			2.10	3.46
パス選択方法 III		初期値	RI	ICI
ノード間信頼度	R	0.0776	0.0991	0.0977
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.1893	0.3754	0.2363
	var	0.0031	0.0053	0.0037
LinkReliability-Cost関数	CaseB	19952.8	16885.2	
	CaseC	87446.4	64577.2	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	0.54183	0.59408	
	CaseC	0.12577	0.15555	
改善対象リンクの本数			1.24	3.30

でそれほど差は見られない。例えば、表-2 のパス選択方法 I を見ると、ノード間信頼度( $R_{AB}$ )の初期値が 0.0927 だったのが RI による改善では 0.1209, ICI による改善で

表-4 Sioux Falls ネットワークでの信頼度改善比較  
(50組の平均値, Case3:  $0.5 \leq r < 0.7$ )

パス選択方法 I		初期値	RI	ICI
ノード間信頼度	R	0.2670	0.3298	0.3233
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.1893	0.4048	0.2832
	var	0.0031	0.0056	0.0040
LinkReliability-Cost関数	CaseB	23560.2	20447.9	
	CaseC	117288.0	90638.0	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	1.34119	1.37665	
	CaseC	0.27293	0.31122	
改善対象リンクの本数			1.00	2.68
パス選択方法 II		初期値	RI	ICI
ノード間信頼度	R	0.1883	0.2310	0.2288
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.1893	0.2849	0.2237
	var	0.0031	0.0045	0.0037
LinkReliability-Cost関数	CaseB	21476.9	19864.8	
	CaseC	98787.8	85738.2	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	0.99879	1.01899	
	CaseC	0.21921	0.23650	
改善対象リンクの本数			1.86	3.06
パス選択方法 III		初期値	RI	ICI
ノード間信頼度	R	0.2315	0.2813	0.2757
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.1893	0.3948	0.2355
	var	0.0031	0.0055	0.0037
LinkReliability-Cost関数	CaseB	23407.9	19889.5	
	CaseC	115868.1	86000.0	
費用対効果関数(Eff)	CaseB	1.07116	1.11044	
	CaseC	0.21924	0.25733	
改善対象リンクの本数			1.10	3.30

は 0.1183 となっている。したがって、ノード間信頼度の値のみで信頼度改善を評価するのならば、RI は ICI より優れているといえる。ただし、前述したようにリンク改善の公平性や費用対効果についても評価する必要がある。

次に、リンク改善の公平性について比較する。そのために、リンク信頼度を用いて計算(max-min, var)を行った。これらの値が大きい場合、信頼度の低いリンクが放置される、あるいは同一のリンクが改善対象として選ばれやすいことを意味する。全体としては、すべてのケースで ICI が RI より優る結果となった。例えば、表-3 のパス選択方法 I を見ると、max-min の初期値が 0.1893 だったが RI による改善では 0.3962, ICI による改善では 0.2776 となっている。したがって、RI よりも値が小さい ICI の方が、並行リンクに配慮した指標であることがいえる。

費用対効果について RI と ICI を比較する前に、まずは Cost-Reliability 関数を用いて計算したリンク改善の総コスト(CostB, CostC)の結果について述べる。全体としては、すべてのケースで ICI が RI より優っている。例えば、表-4 のパス選択方法 I を見ると、RI による改善では 23560.2 と 117288.0, ICI による改善では 20447.9 と 90638.0 となっている。したがって、RI よりも ICI の方が、改善にかかる費用が安く済むことがわかる。

そして、費用対効果関数(Eff)の計算結果(Eff\_B, Eff\_C)は、すべてのケースで ICI が RI より優っている。例えば、表-4 のパス選択方法 III を見ると、RI による改善では 1.07116

と 0.21924, *ICI* による改善では 1.11044 と 0.25733 となっている。したがって, *RI* よりも *ICI* の方が, リンク改善の費用対効果が大きいことがわかる。

改善対象リンクの本数は, すべてのケースで *ICI* が *RI* より優っている。表中の値が 1 の場合は, 6 回とも同じリンクを改善することを意味し, 値が 6 の場合は 6 回とも別のリンクを改善することを意味する。具体的な結果としては, 例えば表-4 のパス選択方法Ⅲを見ると, *RI* による改善では 1.10, *ICI* による改善では 3.30 となっている。したがって, *RI* よりも *ICI* の方が改善対象リンクの本数が多く, 並行リンクに配慮した指標であることがいえる。

概ね, 田の字型ネットワークと同様の結果を得た。すなわち, *RI* は *ICI* と比較すると同じリンクを改善する傾向が強く, max-min, var の計算結果はともに *RI* の方が値が大きい。*RI* は, 並行リンクに配慮した指標とはいえない。総費用・費用対効果は *ICI* は *RI* より優れており, *RI* と *ICI* でノード間信頼度の値にあまり差は見られない。

今回は, 限られたパス数でノード間信頼度の近似値を計算したが, その値が妥当であるかどうかパス数を増やして再度計算するなど今後の検証が必要である。また, *RI/ICI* の比較においてもサンプル数を増やすなどして計算結果の蓄積を行う必要がある。

実際のネットワークへ用いる時の課題としては, リンク信頼度をどう与えるか, あるいはリンク信頼度が高い値での *RI/ICI* の比較が必要と考えられる。

## 6. 研究成果のまとめ

本研究では, 道路網に適した重要度指標の開発を目的として, 各種の重要度指標と近似解法の比較分析を行った。

その結果, 田の字型ネットワークにおいて *ICI* は, 改善対象リンクの公平性と費用対効果の 2 点で *RI* よりも優れていることが判明した。

また, 部分パスセット選択を用いた近似解法については, パス数によっては生起確率順のみならず距離順も使用可能であるという結果を得た。

今回新たに, Sioux Falls ネットワークで近似解法を用いて重要度指標の比較を行ったが, どの程度のパス数を用いれば近似解法として実用性があるかはまだ明らかでない。

ただし, *RI* と *ICI* の数値については田の字型ネットワークと同様の結果を得ることが出来た。

今後の課題として, 重要度指標については計算例の増加やネットワークの拡大などによるデータの蓄積, また, より現実的なリンク信頼度の値に基づいた指標間の比較が考えられる。近似解法については, Sioux Falls ネット

ワークでパス数を増やしたもので計算し, パス数やパス選択方法がどの程度近似解の精度に影響を与えているか検証することが必要である。

## 参考文献

- 1) Nicholson, A. Schmoeker, J. Bell, M.G.H. and Iida, Y (2003). Assessing Transport Reliability: Malevolence and User Knowledge In: Michael G. H. Bell and Yasunori Iida(Ed.) The Network Reliability of Transport, Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR), pp.1-22, Pergamon, 2003.
- 2) 長江貴弘・若林拓史: 道路網の連結信頼性向上法と各種重要度指標による改善対象リンクの相違, 土木計画学研究・講演集, No.50, CD-ROM(No.268), 2014.
- 3) Takahiro Nagae and Hiroshi Wakabayashi (2015). Differences in Network Reliability Improvement by Several Importance Indices. Available online at www.sciencedirect.com ScienceDirect, Transportation Research Procedia, Volume 10, 2015, 155-165, Peer-review under responsibility of Delft University of Technology, ISSN 2352-1465, doi: 10.1016/j.trpro.2015.09.065.
- 4) Barlow, R. E. and Proschan, F. (1965). Mathematical Theory of Reliability, p.6. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 5) 高木 昇: 信頼性に使われる用語, 日本機械学会誌, Vol.74, No.633 pp.1326-1330, 1971.
- 6) Bimbaum, Z. W. (1969) On the Importance of Different Components in Multi-Component System. Multivariate Analysis II (P. R. Krishnaiah Ed.), Academic Press, New York.
- 7) Henley, E.J. and Kumamoto, H. :Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, Inc., 418-436, 1981.
- 8) 若林拓史・後藤康佑・方樹名・長江貴弘: 部分的ミニマルパスを用いた道路ネットワークの重要度評価の簡便法, 土木計画学研究・講演集, No.48, CD-ROM(No.229), 2013.
- 9) 若林拓史: 阪神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, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.391-400, 1996.
- 10) 若林拓史・大野隆晴・鈴木宏章: 道路ネットワークの重要度評価: 確率重要度とクリティカリティ重要度による信頼性向上効果, 土木計画学研究・論文集, Vol.22, No.4, pp.751-759, 2005.
- 11) Nicholson, A. (2007). Optimising Network Terminal Reliability. Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability, CD-ROM, 2007.
- 12) 栄徳洋平・横井祐治・溝上章志: 連結強度による道路ネットワーク評価方法の提案, 第 28 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.169-172, 2008.
- 13) 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.



14) Nicholson, A. (2007). Optimising Network Terminal Reliability. Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability, CD-ROM, 2007.

15) 長江貴弘・若林拓史：道路網の連結信頼性の改善過程における重要度指標の種類による差異, 土木計画学研究・講演集, No.52, CD-ROM(No.245), 2015.

(2016.?.? 受付)

DEVELOPMENT OF AN IMPORTANCE INDEX  
FOR EFFECTIVE HIGHWAY NETWORK RELIABILITY IMPROVEMENT

Takahiro NAGAE, Hiroshi WAKABAYASHI