

# 高信頼度の道路網における 新たな重要度指標の利用

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

近年、わが国では「国土強靱化計画」に謳われるように災害に強い国づくりが求められており、道路などのインフラについても同様である。道路網は、その一部が寸断されても代替路があれば、目的地までの到達性を保証できる。道路網の機能維持には、リンクの信頼性向上が不可欠だが、費用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。そこで用いられるのが重要度指標である。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、単純なネットワークで従来の方法との比較分析を行う。さらに、より現実的な信頼度の値で改善対象リンクを選定する際に必要となる重要度指標を考察・提案する。

**Key Words:** Highway network reliability, Importance index, Cost-benefit analysis, Fussell Vesely, Risk Achievement Worth.

## 1. はじめに

地震・水害など自然災害の多い我が国では、道路網の一部が寸断されることがしばしばある。その際、代替路があれば道路網としての機能を維持(連結信頼性を確保)することが可能となる。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。

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。一方で、現実の道路網は航空機・宇宙船ほどではないにしても、比較的高信頼度のシステムである。このようなシステムにおける重要度指標の必要要件を探るため、今回新たに現実的なリンク信頼度の値を用いて重要度指標の計算結果の比較を行う。さらに、他分野で用いられている重要度指標(FV, RAW 指標)での試算を行う。

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、より現実的なリンク信頼度で重要度を計算するのに必要な指標を新たに検討し、基本的な概念と田の字型ネットワークでの計算例を示す。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>やクリティカルリティ重要度<sup>7)</sup>などが提案されている。重要度は、シ

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)とで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。

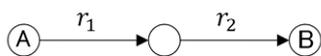


図-1 直列ネットワーク

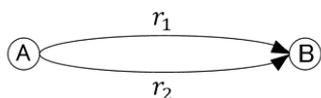


図-2 並列ネットワーク

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。

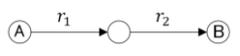
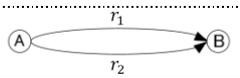
なお、改善リンクの選定には別の基準が必要であり、本論文で 4.以下で Nicholson<sup>14)</sup> と同様の考え方である、『コストーリンク信頼度関数』を用いてノード間信頼度の『改善パス』を考察する。

#### (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 $r_1 < r_2$
	$R_{h1} > R_{h2}$	$C_{h1} = C_{h2}$	$IC_{h1} > IC_{h2}$
判定	Good	NG	Good
並列ネットワーク	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$
	$R_{h1} < R_{h2}$	$C_{h1} < C_{h2}$	$IC_{h1} = IC_{h2}$
判定	NG	NG	It says nothing

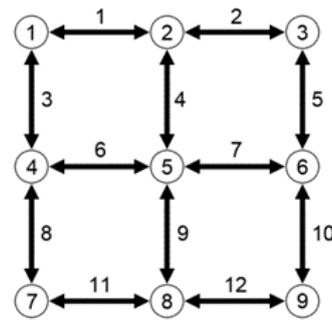


図-3 田の字型ネットワーク

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、利子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るものとした( $0.3 \leq r < 0.7$  と  $0.4 \leq r < 0.6$  の範囲でそれぞれ1000組ずつ)。具体的な改善の手順は以下のようになる。

- 手順1. 重要度評価(*RI* or *ICI*)を用いて各々のリンクの重要度を計算
- 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(max-min, var)
  - ・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

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れているといえる。

(3) リンク信頼度の値による計算結果の変化

ここまで重要度指標の比較をしてきたが、いずれも用いた値は現実に想定されるリンクの信頼度よりも大幅に低いものである。したがって、今回新たにリンク信頼度の初期値の範囲を変えて、 $RI$ ,  $ICI$  の計算結果がどうなるかを比較した。今回は、リンク信頼度の大小によって重要度の計算結果がどう変化するかを比較するため、与える乱数の範囲はいずれも 0.1 の幅となるようにした。0.1 の幅に収まるように乱数を 0.3 以上 0.9 未満の間でそれぞれ 100 組ずつ発生させた(全部で 600 組)。リンク信頼度の改善幅を 1 回につき 0.01 として、それを 6 回繰り返すようにした。その結果を表-2、図-4 に示す。

比較する項目は表-2 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( $Eff_B, Eff_C$ )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 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。

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  $ICI$  より優れている。ただし、値は両方でそれほど差は見られない。例えば、表-2 の(0.3 $\leq r <$ 0.4)を見ると、ノード間信頼度( $R_{AB}$ )の初期値が 0.0811 だったのが  $RI$  による改善では 0.0869、 $ICI$  による改善では 0.0868 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、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-2 の(0.4 $\leq r <$ 0.5)を見ると、max-min の初期値が 0.0847 だったのが  $RI$  による改善では 0.0997、 $ICI$  による改善では 0.0859 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-2 の(0.5 $\leq r <$ 0.6)を見ると、 $RI$  による改善では 18702.9 と 76771.0、 $ICI$  による改善では 17875.8 と 70847.7 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。

しかし、費用対効果関数( $Eff$ )の計算結果( $Eff_B, Eff_C$ )は、 $ICI$  が  $RI$  より優れているとは言い切れない。例えば、表-2 の(0.7 $\leq r <$ 0.8)を見ると、 $RI$  による改善では 0.29350 と 0.05707、 $ICI$  による改善では 0.28473 と 0.05748 であり、CaseC でその差が僅少となり、CaseB では  $RI$  の方が優る

表-2 リンク信頼度の値による  $RI$  と  $ICI$  の比較(100 組の平均)

		初期値	$RI$	$ICI$
0.3 $\leq r <$ 0.4	R	0.0811	0.0869	0.0868
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.0847	0.0974	0.0876
	var	0.0007	0.0009	0.0008
LinkReliability-Cost関数	CaseB		12428.2	12027.4
	CaseC		37934.3	35868.3
費用対効果関数( $Eff$ )	CaseB		0.23442	0.23977
	CaseC		0.07725	0.08073
0.4 $\leq r <$ 0.5	R	0.1976	0.2078	0.2076
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.0847	0.0997	0.0859
	var	0.0007	0.0009	0.0007
LinkReliability-Cost関数	CaseB		15533.6	14941.0
	CaseC		55519.2	51870.5
費用対効果関数( $Eff$ )	CaseB		0.32812	0.33508
	CaseC		0.09221	0.09676
0.5 $\leq r <$ 0.6	R	0.3749	0.3891	0.3887
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.0847	0.1038	0.0847
	var	0.0007	0.0010	0.0007
LinkReliability-Cost関数	CaseB		18702.9	17875.8
	CaseC		76771.0	70847.7
費用対効果関数( $Eff$ )	CaseB		0.37929	0.38622
	CaseC		0.09271	0.09761
0.6 $\leq r <$ 0.7	R	0.5885	0.6045	0.6038
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.0847	0.1086	0.0842
	var	0.0007	0.0010	0.0007
LinkReliability-Cost関数	CaseB		21860.4	20848.3
	CaseC		101277.2	93001.8
費用対効果関数( $Eff$ )	CaseB		0.36800	0.36887
	CaseC		0.07966	0.0828
0.7 $\leq r <$ 0.8	R	0.7908	0.8054	0.8044
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.0847	0.1119	0.0837
	var	0.0007	0.0011	0.0007
LinkReliability-Cost関数	CaseB		24988.2	23829.5
	CaseC		128823.1	118179.6
費用対効果関数( $Eff$ )	CaseB		0.29350	0.28473
	CaseC		0.05707	0.05748
0.8 $\leq r <$ 0.9	R	0.9331	0.9432	0.9418
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.0847	0.1131	0.0833
	var	0.0007	0.0011	0.0007
LinkReliability-Cost関数	CaseB		28024.9	26810.3
	CaseC		158689.6	146314.4
費用対効果関数( $Eff$ )	CaseB		0.18030	0.16166
	CaseC		0.03192	0.02966

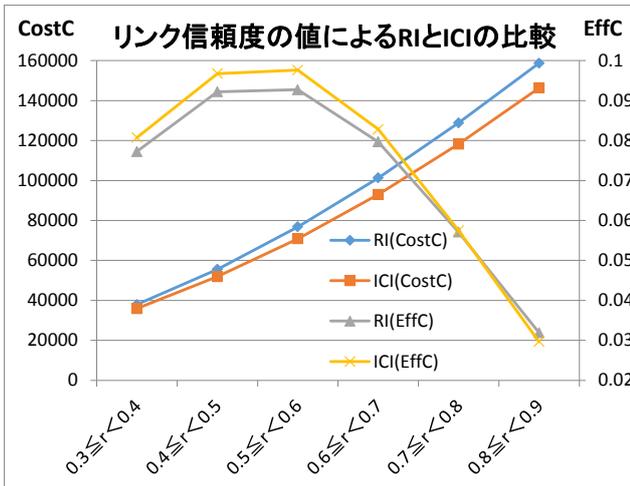


図-4 総コスト・費用対効果の比較(100組の平均)

結果となっている。(0.8 ≤ r < 0.9)ではその傾向がより顕著となってCaseB, CaseCともにRIの方が優る結果となった。したがって、費用対効果についてはリンク信頼度が高くなるとICIよりもRIの方が、優れていることがわかる。

図-4は、ケースCにおける総コスト・費用対効果関数の計算結果がリンク信頼度によってどのように変化するかを表したものである。元々のリンク信頼度が高ければ、改善にかかる費用は増大するので総コストはRI, ICIともに右肩上がりとなっている。総コストに関しては、ICIの優位性は変わっていない。一方、費用対効果についてはパラメータの設定する値にも左右されると考えられるが、リンク信頼度の値が高くなるとRI, ICIの差は縮まり、(0.8 ≤ r < 0.9)ではICIよりもRIの方が良い結果となっている(表-2)。高信頼度の道路網においては、各々のリンク信頼度にそれほど差がないので信頼度の低いリンクを改善することよりも、ノード間信頼度の向上が費用対効果関数に与える影響が大きいことが考えられる。ただし、どの程度の信頼度でRI, ICIの費用対効果の優劣が入れ替わるかの詳細な値については今後の検証が必要である。

これまで、RIよりもICIの方が、道路のリンク改善に適した重要度指標であると述べてきたが、高信頼度のネットワークにおいては必ずしもそうとはいえないことが判明した。したがって、次節以降では高信頼度のシステムで用いられる重要度指標を用いて、新たに道路網においてリンクの重要度を計算できないかを検討する。

## 5. 高信頼度の道路網への重要度分析の適用

### (1) FV, RAW 指標の定義とその利用

ここまで道路網に適用するための重要度指標について検討を行ってきたが、このような指標はむしろ他の分野で発達した面も大きい。例えば、航空・宇宙・原子力等である。これらは複雑なシステムを擁しているが、故障

表-3 確率的安全評価(PSA)に基づく重要度指標

指標	略称	定義
Fussell-Vesely	FV	$\frac{Q(\text{base}) - Q(q_i = 0)}{Q(\text{base})}$
Risk Reduction Worth	RRW	$\frac{Q(\text{base})}{Q(q_i = 0)}$
Risk Achievement Worth	RAW	$\frac{Q(q_i = 1)}{Q(\text{base})}$
Bimbaum Importance	BI=RI	$Q(q_i = 1) - Q(q_i = 0)$

略称の記法でイタリックを使用していないものは、PSAの記述に従ったものである。

した際のリスクが大きいため非常に高い信頼度を要求されている。したがって、高信頼度のシステムを構築するための重要度指標が開発・研究されており、本研究ではそれを道路網に適用することを提案する。

かねてより原子力分野等では、炉心損傷等の重大事象を防止するためにシステム中のどの機器が重要かを判断するための確率的安全評価(PSA: Probabilistic Safety Assessment)が用いられている<sup>16)</sup>。本研究では、高信頼度の道路網においてPSAで用いられている重要度指標を利用できるかどうかを検討する。

まず、PSAで利用されている重要度指標をまとめた(表-3)。ここでQ(base)はシステム全体の元々の故障確率、Q(q<sub>i</sub>=1)は当該ユニットの故障確率を1と仮定したときのシステム全体の故障確率、Q(q<sub>i</sub>=0)は当該ユニットの故障確率を0と仮定したときの故障確率である。PSAでよく利用されている重要度指標はFV, RAWである<sup>17)</sup>。

Fussell Vesely (FV)は、対象ユニットの故障確率を0とおいた時(言い換えると、対象ユニットが必ず機能すると仮定した場合)に、システム全体の故障確率がどの程度低下するかを示す指標である。つまり、FVの値が大きいユニットは改善対策の効果が大きいことを意味する。

Risk Achievement Worth (RAW)は、対象ユニットの故障確率を1とおいた時(言い換えると、対象ユニットが必ず故障すると仮定した場合)に、システム全体の故障確率がどの程度増加するかを示す指標である。つまり、RAWの値が大きいユニットは、安全上の重要度が高いことを意味する。

上記の2つの重要度指標を用いてユニットの重要度を計算し、二次元座標上にプロットすることで重要なユニットを分類する試みも提案されている<sup>17)</sup>。

### (2) FV, RAW 指標を道路網に用いる意義

FVとRAWにはそれぞれ以下のような特徴があるので、高信頼度の道路網においてこれら2つを用いて重要度を

計算することは有用であると考えられる。

まず、FV については直列・並列ネットワークで ICI と同様の性質を持っていることが挙げられる。すなわち、直列ネットワークでは信頼度の低いリンクの重要度が高く、並列ネットワークではリンク信頼度に関わらず重要度の値が同じになるということである。以下、直列・並列ネットワークでの FV と RAW の大小関係について述べる (FV, RAW の計算式は表-3 参照)。

図-1 のような直列ネットワークの場合、AB 間のリンク故障確率を  $q_1, q_2$ 、システム全体の故障確率を  $Q$  (base) とすると、

$$Q(\text{base}) = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2) \quad (13)$$

となる。  $Q(q_1 = 1)$  と  $Q(q_1 = 0)$  はそれぞれ

$$Q(q_1 = 1) = 1 - (1 - 1)(1 - q_2) = Q(q_2 = 1) \quad (14)$$

$$Q(q_1 = 0) = 1 - (1 - 0)(1 - q_2) = q_2 \quad (15)$$

となるので、仮に  $q_1$  と  $q_2$  の関係が  $q_1 > q_2$  ならば、

$$FV_1 > FV_2 \quad (16)$$

となる。また、 $q_1$  と  $q_2$  の値に関わらず

$$RAW_1 = RAW_2 \quad (17)$$

となる。したがって、直列ネットワークにおいて FV は ICI と同様の性質を持っていることがわかる。

また、図-2 のような並列ネットワークの場合、AB 間のリンク故障確率を  $q_1, q_2$ 、システム全体の故障確率を  $Q$  (base) とすると、

$$Q(\text{base}) = q_1 \cdot q_2 \quad (18)$$

となる。  $Q(q_1 = 1)$  と  $Q(q_1 = 0)$  はそれぞれ

$$Q(q_1 = 1) = q_2 \quad (19)$$

$$Q(q_1 = 0) = 0 = Q(q_1 = 2) \quad (20)$$

となるので、 $q_1$  と  $q_2$  の値に関わらず

$$FV_1 = FV_2 \quad (21)$$

となる。また、仮に  $q_1$  と  $q_2$  の関係が  $q_1 > q_2$  ならば、

$$RAW_1 < RAW_2 \quad (22)$$

となる。したがって、並列ネットワークにおいても FV は ICI と同様の性質を持っていることがわかる。

次に、RAW を道路網の重要度指標に用いる理由について述べる。直列・並列ネットワークにおいて RAW は上記の計算結果となるため、CI と同様の特徴を持っているといえる。そのため、RAW 単体で用いるのには問題がある。

ただし、RAW は表-3 の式で定義されるため、故障確率のわずかな値の違いで計算結果が大きく変化するという特徴がある。したがって、高信頼度のシステムにおいて重要なユニットを発見する際には有用な指標と考えられる。次節で、FV と RAW を併用したリンクの重要度の計算例を紹介する。

### (3) FV, RAW 指標を併用した改善対象リンクの選定方法

前節では、直列・並列ネットワークにおける FV と RAW の重要度の計算の特性を示したが、これを田の字型ネット

トワーク (図-3) へ拡大して計算結果の考察を行う。

今回は、初期的な検討例としてリンク信頼度を 0.9 以上にしたものを設定して RI, ICI と FV, RAW を用いて重要度の計算を行った。その結果を表-4 に示す。

表-4 を見ると、RAW, FV はそれぞれ RI, ICI と同じものが最小値、最大値を示す結果となった。したがって、FV, RAW は概ね RI, ICI と類似した特性を持っているといえる。ただし、RAW は前述したように高信頼度のシステムで値の差が特に大きくなるという特徴があり、表-4 の最下部の重要度の最大値と最小値の差でも結果として現れている。また、FV についても ICI に比べると重要度の数値に差があるため、FV, RAW は RI, ICI と比較して高信頼度のシステムに向けた重要度指標であることがわかる。

この規模のネットワークでは、RI, ICI でも FV, RAW でもリンク信頼度よりもリンクのネットワーク中の位置の方が重要度の値に影響を与えていると思われる。そのため、最大値を示すリンクはどの指標でも同じとなっている (表-4 の水色部分)。そのことは、図-5 を見ても裏付けられる。図-5 は、FV と RAW の値を二次元座標上にプロットしたものである。これを見る限り、FV, RAW とともに重要度の値が大きくなっているのは起点・終点に直接繋がっているリンクであることがわかる。したがって、FV と RAW の計算結果の差異、特に重要度の値が最大となるリンクに違いが出るかどうかは現在よりも多くのサンプルおよびネットワークの拡大が必要であると考えられる。

表-4 田の字型での各種重要度指標の値の比較

リンクNo.	リンク信頼度RI	ICI	RAW	FV	
r1	0.9700	0.041768	0.001257	14.114712	0.405610
r2	0.9620	0.005175	0.000197	2.611364	0.063651
r3	0.9660	0.034648	0.001182	11.834319	0.381332
r4	0.9360	0.003239	0.000208	1.981386	0.067103
r5	0.9600	0.005185	0.000208	2.611364	0.067140
r6	0.9320	0.004105	0.000280	2.238437	0.090358
r7	0.9340	0.003392	0.000225	2.025549	0.072469
r8	0.9400	0.004465	0.000269	2.358530	0.086715
r9	0.9300	0.004336	0.000304	2.305449	0.098260
r10	0.9680	0.043952	0.001411	14.771874	0.455269
r11	0.9380	0.004474	0.000278	2.358530	0.089796
r12	0.9640	0.036749	0.001327	12.467239	0.428237
max-min		0.040713	0.001214	12.790487	0.391618

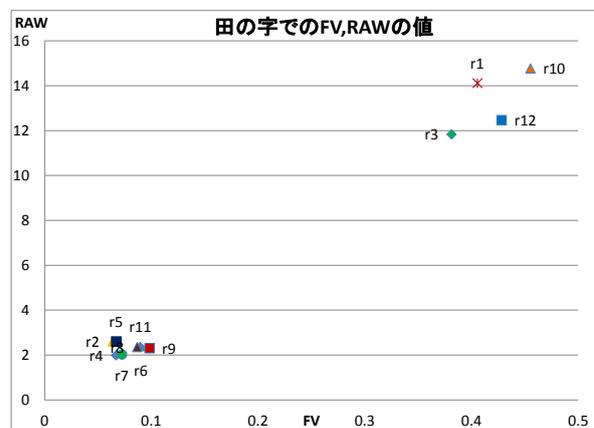


図-5 FV, RAW での重要度の値

## 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。

しかし、より現実的なリンク信頼度を想定した場合、両者の差異が見られなくなる傾向にあることが判明したため、今回新たに *FV*, *RAW* 指標の定義と特徴について整理し、田の字型ネットワークで試算を行った。その結果、*RAW*, *FV* は概ね最大値・最小値のリンクが *RI*, *ICI* に類似したものとなった。また、*FV*, *RAW* は *RI*, *ICI* に比べると重要度の数値に差があるので、高信頼度のシステムに好適な重要度指標であることが示唆される。

今後の課題として、重要度指標について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を行い、*FV*, *RAW* 指標の実用性を検証する必要があると考えられる。

謝辞：本研究は JSPS 科研費（基礎研究(C), 課題番号:26420522）の助成を受けたものです。記して謝意を表します。

### 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](http://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.tpro.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.
- 16) Van der Borst, M.; Schoonakker, H. : An overview of PSA importance measures Reliability Engineering and System Safety, Volume 72, Number 3, June 2001, pp.241-245(5) Elsevier.
- 17) 嶋田善夫:確率的安全評価による安全上重要な海外原子力発電所不具合情報抽出法 INSS journal 11, 87-94, 2004 原子力安全システム研究所

(2016.?? 受付)

## UTILIZATION OF PRACTICAL IMPORTANCE INDICES FOR EFFECTIVE HIGHWAY NETWORK RELIABILITY IMPROVEMENT

Takahiro NAGAE, Hiroshi WAKABAYASHI