

道路網の信頼性改善のための 各種重要度指標の特性分析

長江貴弘¹・若林拓史²

¹学生会員 名城大学大学院 都市情報学研究科 (〒461-0048 愛知県名古屋市東区矢田南4-102-9)
E-mail: 133781501@c alumni.meijo-u.ac.jp

²正会員 名城大学教授 都市情報学部 (〒461-0048 愛知県名古屋市東区矢田南4-102-9)
E-mail: wakabaya@meijo-u.ac.jp

わが国では、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。重要度指標を道路網に適用する際は、単純にシステム全体の信頼度の向上だけでなく、並行リンクの公平性や費用対効果などを鑑みる必要があり、既存の重要度指標と筆者らが提案している指標とで比較分析を行ってきた。本研究では、実際の道路に近いと考えられる信頼度の値で改善対象リンクを選定する際に、各種重要度指標がどのような特性を持っているか比較・考察する。

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

1. はじめに

わが国では、地震・水害などの災害が頻発しており、その被害は広範囲にわたる。社会基盤においてもそれは同様であり、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、すべての経路の強化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¹⁾と呼ばれている。

筆者らは、以下に示すように、重要度評価に関して成果を上げており、かつ、今後の課題についてまとめている。

(1) 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²⁾、これまでに試験的なネットワークで計算を行った結果、改善に要するコスト・費用対効果・改善対象リンクの公平性(後述)の3つの観点で筆者らの提案している指標が従来の指標より優っていることを確認した³⁾。

(2) しかし、リンクの信頼度が高くなると費用対効果の面で両者の指標の差が縮まるという課題が生じた。そのため、高信頼度のシステム(航空・原子力等)で用いられている重要度指標(FV, RAW 指標)での計算方法を整理している⁴⁾。

(3) 本論文では、これらの指標も併せて新たに信頼性改善の試算を行うことで、道路網の重要度指標の必要要件を探ることとする。

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信頼性改善の例を示す。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⁵⁾

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⁶⁾が、本論文では連結信頼性と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⁶⁾、信頼度とはその確率表現であると定義されている⁷⁾。

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⁸⁾やクリティカリティ重要度⁹⁾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 6)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どうかの保証がない。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)¹⁰⁾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¹⁰⁾。

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¹¹⁾、交通制御の観点から重要なリンクを発見する方法¹²⁾、費用・リンク信頼度関数による方法¹³⁾、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¹⁴⁾などがある。最近では、中山¹⁵⁾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 14)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), 14)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 15)では、便益を捉える視点が增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すぎたばかりであり、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、4 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⁵⁾

(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)⁸⁾ 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。

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

クリティカリティ重要度 CI (Criticality Importance)⁹⁾ 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大きいことを表す。



図-1 直列ネットワーク

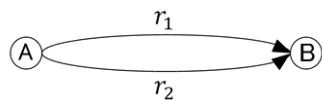


図-2 並列ネットワーク

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リティ重要度(ICI)である。

(3) 改良型クリティカリティ重要度の定義とその特徴

クリティカ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、改良型クリティカリティ重要度を以下の式のように定義される¹⁰⁾。

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

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¹⁰⁾。

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。

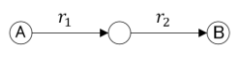
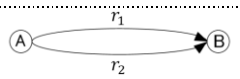
なお、改善リンクの選定には別の基準が必要であり、本論文で 4.以下で Nicholson¹⁶⁾ と同様の考え方である、『コストーリンク信頼度関数』を用いてノード間信頼度の『改善パス』を考察する。

(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 $r_1 < r_2$
	$R_{A1} > R_{A2}$	$C_{A1} = C_{A2}$	$IC_{A1} > IC_{A2}$
判定	Good	NG	Good
並列ネットワーク	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$
	$R_{A1} < R_{A2}$	$C_{A1} < C_{A2}$	$IC_{A1} = IC_{A2}$
判定	NG	NG	It says nothing

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⁵⁾

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¹⁰⁾。

a) ケース A: 費用一定型

$$CostA = 1000 \quad (9)$$

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

$$CostB = 5000 \times (r_a + 0.1) \quad (10)$$

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

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

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¹⁰⁾。

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

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

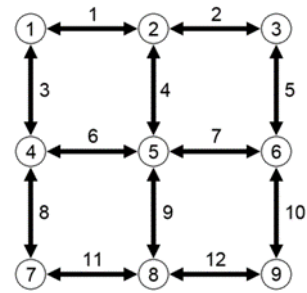


図-3 田の字型ネットワーク

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⁵⁾

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半明した。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³⁾

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 ≤ *r* < 0.7 と 0.4 ≤ *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半明した。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 の方が総費用・費用対効果・リンク改善の公平性の 3 つの観点で優れているといえる。

5. PSA の重要度分析の道路網への適用

(1) FV, RAW 指標の定義とその利用

ここまで道路網に適した重要度指標について検討を行ってきたが、以下のような課題もあることが判明した。それは、リンク信頼度の値が高くなると費用対効果の観点で ICI と RI の差が縮まる傾向にあるということである⁴⁾。全体としては依然として RI よりも ICI の方が優位だが、比較する項目は複数あるため、項目によってどの程度優劣があるのか計量化する必要が生じてくる。したがって、本研究では他の分野の高信頼度のシステムで用いられている重要度指標を道路網に適用することを検討する。

かねてより航空・宇宙・原子力等のシステムでも重要度指標が用いられている。これらは複雑なシステムを擁しているが、故障時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。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論的安全評価 (PSA: Probabilistic Safety Assessment) が用いられている¹⁷⁾。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試算を行う。

まず、PSA で利用されている重要度指標をまとめた(表-2)。ここで $Q(\text{base})$ はシステム全体の元々の故障確率、 $Q(q_i=1)$ は当該ユニットの故障確率が 1 と仮定したときのシステム全体の故障確率、 $Q(q_i=0)$ は当該ユニットの故障確率が 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¹⁸⁾。

Fussell Vesely (FV) は、対象ユニットの故障確率が 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、すなわちシステムの信頼度がどの程度向上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が 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、すなわちシステムの信頼度がどの程度低下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、信頼度への寄与が高いことを意味する。

表-2 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	$\frac{Q(q_i = 1)}{Q(\text{base})}$
Birnbaum 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。

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¹⁸⁾。

(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-2 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 $Q(\text{base})$ 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 $Q(\text{base})$ 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

$$FV_1 = FV_2 \tag{21}$$

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

$$RAW_1 < RAW_2 \tag{22}$$

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-2 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、今回新たに FV と RAW を利用してリンク信頼度の改善を行った計算例を紹介する。

(3) FV, RAW 指標を利用したリンク信頼度の改善

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ワーク(図-3)へ拡大して計算結果の考察を行う。

今回は、リンク信頼度の初期値を乱数を用いて以下の4種類の範囲($0.3 \leq r < 0.7$, $0.4 \leq r < 0.6$, $0.8 \leq r < 0.85$, $0.85 \leq r < 0.9$)で設定して RI, ICI と FV, RAW を用いてリンク信頼度の改善を行った。全体の改善の手順は 4. (2) と同様であるが、今回

表-3 RI, ICI, FV, RAW の信頼度改善比較(100組の平均)

		初期値	RI	ICI	FV	RAW
$0.3 \leq r < 0.7$	R	0.285939	0.360909	0.353997	0.360909	0.369156
リンク信頼度を 用いた計算	max-min	0.338775	0.428488	0.332619	0.428488	0.538928
	var	0.011910	0.016829	0.011235	0.016829	0.022142
Link Reliability	CaseB		19185.38	15829.26	15829.26	22373.40
-Cost関数	CaseC		82421.92	58630.60	58630.61	107713.96
費用対効果 関数(Eff)	CaseB		1.985003	2.162511	2.572620	1.897583
	CaseC		0.480095	0.596737	0.709951	0.409050
		初期値	RI	ICI	FV	RAW
$0.4 \leq r < 0.6$	R	0.281817	0.348665	0.345081	0.357623	0.357771
リンク信頼度を 用いた計算	max-min	0.169387	0.305951	0.211266	0.211266	0.420757
	var	0.002978	0.007370	0.004249	0.004249	0.011610
Link Reliability	CaseB		18815.00	16942.73	15829.26	21359.44
-Cost関数	CaseC		78362.04	64924.73	58630.61	98399.49
費用対効果 関数(Eff)	CaseB		1.782364	1.870238	2.419196	1.787287
	CaseC		0.431773	0.490750	0.669506	0.391583
		初期値	RI	ICI	FV	RAW
$0.8 \leq r < 0.85$	R	0.904052	0.914819	0.914005	0.914604	0.916952
リンク信頼度を 用いた計算	max-min	0.042347	0.083644	0.046325	0.067306	0.087509
	var	0.000186	0.000491	0.000215	0.000345	0.000522
Link Reliability	CaseB		27102.40	26275.75	26212.20	27197.77
-Cost関数	CaseC		149218.06	140995.91	140375.18	150175.34
費用対効果 関数(Eff)	CaseB		0.198716	0.189435	0.201323	0.237234
	CaseC		0.036115	0.035314	0.037606	0.042990
		初期値	RI	ICI	FV	RAW
$0.85 \leq r < 0.9$	R	0.955265	0.963202	0.962293	0.962293	0.964787
リンク信頼度を 用いた計算	max-min	0.042347	0.085654	0.046213	0.044458	0.086443
	var	0.000186	0.000504	0.000214	0.000199	0.000512
Link Reliability	CaseB		28643.88	27773.61	27758.77	28666.04
-Cost関数	CaseC		165082.00	155986.35	155833.02	165315.54
費用対効果 関数(Eff)	CaseB		0.138609	0.126567	0.126630	0.166163
	CaseC		0.024066	0.022543	0.022564	0.028831

は1回の改善幅を0.01としている。その結果を表-3に示す。

項目別で最も良い値を緑、それに次ぐ値を黄に塗っている。

まず、全体的な傾向としてリンク信頼度の値に関わらず計算結果の数値は概ね RI と RAW, ICI と FV が類似している。計算結果の比較項目は 4. (2) で示したのと同様に、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)である。

ノード間信頼度については、常に RAW が最も良い値を出しており、次いで RI の順となっている。ただし、 FV, ICI でもそれほど差はない。

リンク信頼度を用いた計算は、全体的には ICI が良い値を示している。この値が優れているということは、リンク改善の公平性の観点で有利であることを示している。ただし、高信頼度の領域ではわずかの差ではあるが FV が ICI を逆転して最良となっている。

総コストについては、 RI, RAW は全体的に良くない。ケース B、ケース C ともに低信頼度では ICI が良いが高信頼度では FV との差が縮まり、逆転する。ただし、この2つに関しては値の差はそれほどではない。

費用対効果については、低信頼度では FV が、高信頼度では RAW が有利な結果となっている。ただし、もっとも現実的な数値と考えられる高信頼度でケース C での値は、どの重要度指標でも数値自体にそれほど差は出ていない。

図-4 は、 RI, ICI, FV, RAW でそれぞれ 100 組分の改善対象となるリンクが何本あるかを表したグラフである。今回は改善回数を 6 回としたため、例えば改善対象リンクが 1 本ならば、同じリンクが 6 回改善されることを意味している。

RAW は、リンク信頼度の値に関わらず常に同じリンクを改善対象に選んでいる。したがって、リンク改善の公平性の観点で RAW は劣っている。

RI は、低いリンク信頼度でも同じリンクを改善対象に選ぶことが多いが、高信頼度になるとその傾向はますます顕著なものとなり、($0.85 \leq r < 0.9$) では RAW と類似した結果となっている。

FV は、低いリンク信頼度では比較的改善対象リンクが分散しており、公平性の観点で優れている。しかし、リンク信頼度が高くなると同じリンクを改善する傾向が強くなるのは RI と同様である。

ICI は、4 種類の指標の中で全体としてもっとも改善対象リンクが多い結果となった。特に、高いリンク信頼度であっても改善対象リンクの本数が確保されているのが他の指標との際立った違いである。したがって、リンク改善の公平性の観点では ICI がもっとも優れている。

今回の計算結果を改善対象リンクも含めて項目別に比較してまとめたものが表-4 である。

表-4 4種の重要度指標の項目別比較のまとめ

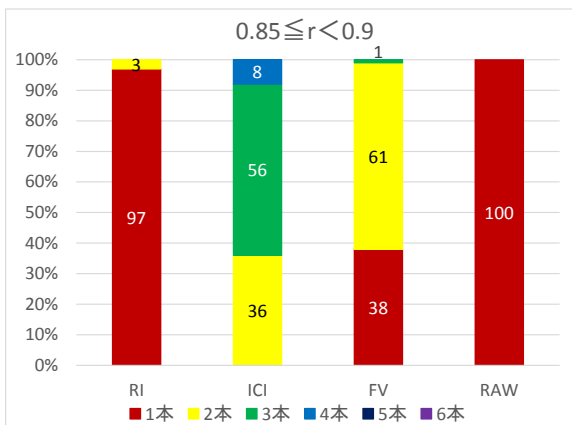
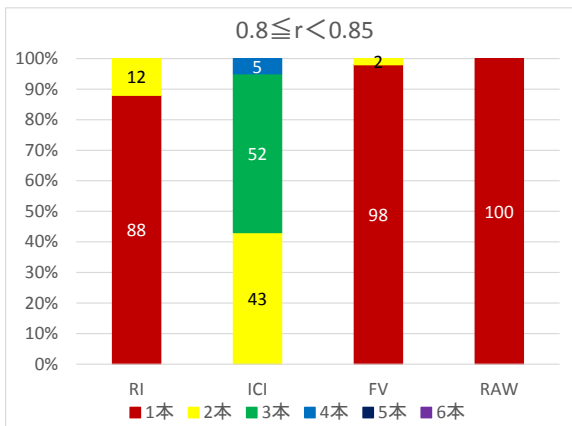
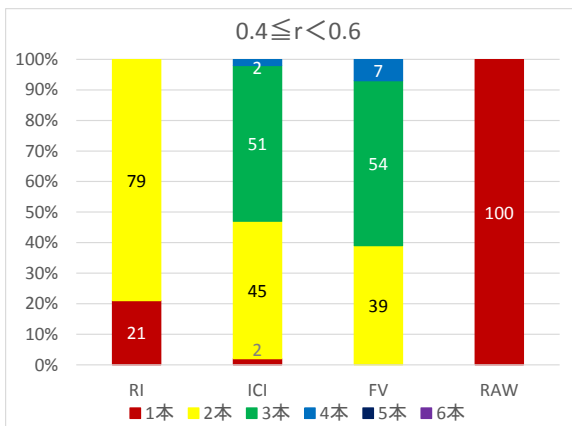
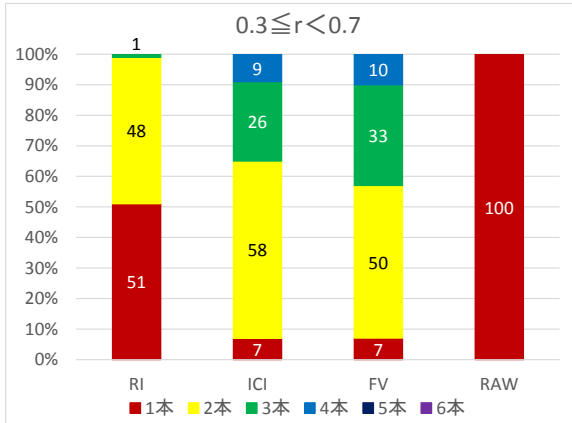


図-4 改善対象となるリンク本数の比較

リンク信頼度の値の範囲	RI		ICI		FV		RAW	
	低	高	低	高	低	高	低	高
ノード間信頼度(R)	○	○	△	○	○	○	◎	◎
リンク信頼度を 用いた計算	max-min	△	△	○	○	○	◎	△
	var	△	△	◎	○	○	◎	△
Link Reliability-Cost関数	○	△	◎	○	○	◎	×	△
費用対効果関数(Eff)	△	○	○	△	◎	○	△	◎
改善対象リンクの本数	△	×	○	◎	○	△	×	×

6. 研究成果のまとめ

- (1) ノード間信頼度の改善のみに着目すると、*RI* がもっとも優れている。
- (2) しかし、*RI* の改善に要する費用は 4.(1)のケース A,B,C の順で増加する。したがって、後述の(3)での *ICI* に劣る。
- (3) *ICI* による改善は、選択されるリンクの公平性と費用対効果の 2 点において *RI* より優れている。
- (4) ただし、リンク信頼度の値が大きくなると *RI* と *ICI* の総コスト、費用対効果の差は縮まる傾向にある。
- (5) 今回、新たに高信頼度のシステムで用いられる *FV*, *RAW* と併せて比較した結果、ノード間信頼度の改善に着目すると、*RAW* がもっとも優れている。
- (6) リンク信頼度の値が大きい場合、総コストで有利なのは *FV*、費用対効果で有利なのは *RAW* である。
- (7) しかし、*FV* や *RAW* では改善対象リンクを同じものを選択する傾向が強いため、リンク改善の公平性の観点で劣る。
- (8) 4 種の重要度指標の中でリンク改善の公平性でもっとも優るのは *ICI* である。ただし、総コストや費用対効果で若干ながら他の指標に劣る点を勘案する必要がある。

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. Schmoecker, 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) 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.
- 3) 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.
- 4) 長江貴弘・若林拓史: 高信頼度の道路網における新たな重要度指標の利用, 土木計画学研究・講演集, No.54, CD-ROM(No.63), 2016.
- 5) 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.
- 6) Barlow, R. E. and Proschan, F. (1965). *Mathematical Theory of Reliability*, p.6. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Henley, E.J. and Kumamoto, H. :*Reliability Engineering and Risk Assessment*, Prentice-Hall, Inc., 418-436, 1981.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) Nicholson, A. (2007). *Optimising Network Terminal Reliability*. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability*, CD-ROM, 2007.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Nicholson, A. (2007). *Optimising Network Terminal Reliability*. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability*, CD-ROM, 2007.
- 17) 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.
- 18) 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

(2017.?? 受付)

CHARACTERISTIC ANALYSIS OF VARIOUS IMPORTANCE INDICES FOR EFFECTIVE HIGHWAY NETWORK RELIABILITY IMPROVEMENT

Takahiro NAGAE, Hiroshi WAKABAYASHI