

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*

Highway Network Importance Indices: Network Reliability Improvement using Probability Importance vs. Criticality Importance

若林拓史**・大野隆晴***・鈴木宏章****

by Hiroshi WAKABAYASHI**, Takaharu OHNO*** and Hiroaki SUZUKI****

1. はじめに

道路ネットワークの信頼性を高く維持することは地域の経済的社会的活動・文化的交流や防災上の観点からきわめて重要である。本論文では、道路ネットワークの信頼性を効率的に向上させるため、その評価指標に関して2つの指標を比較している。従来の確率重要度(Birnbaum's structural importance)での問題点を挙げ、クリティカリティ重要度を提案、また重要度指標だけでは対象とするリンクが特定できない場合、別のどのような指標を用いるべきかについて考察する。

ネットワークの信頼性を高く保つためには、

- 1) ネットワークの信頼性を評価する方法論の確立、
 - 2) 高信頼性交通ネットワークを新規に構成するための手法の究明、
 - 3) ネットワーク信頼度を改善するためのキーとなる構成要素の発見法(本論文)、
- などが重要となってくる。

今日、交通ネットワークの信頼性が重要視されるようになってきた背景には、

- 1) 時間価値の増大、
- 2) 広範囲に要請されるようになってきた Just in Time および正確性への要請、
- 3) 経済活動のスピード化、
- 4) 人々のせっかち化、などがある。また、
- 5) 本研究の発端となった防災時のネットワークの運用も重要となっている。

従来の交通システムの設計や運用は、平均的な交通需要のもとで、システムは期待される機能を常に発揮するものとしてなされてきた面が多いように考えられる。これに対し信頼性の概念は何らかの変動を前提としている点に特徴がある。交通システムの信頼性では、需要側の種々の特性の変動、さらには供給側サービスの変動、お

よびそれらの相互作用を扱っている。交通システムの信頼性研究も、おおむねこの順で発展してきたといっている。

2. 道路ネットワークの信頼性と重要度評価

本論文では、道路ネットワークの連結信頼性における重要度評価の問題をとりあげる。

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得る状態にあること」を意味し、信頼度とは、この信頼性を確率表現したものと定義される。この概念は、交通ネットワーク信頼性にも拡張できるが、最近では種々の概念や定義が提案されており、以下のように分類できる¹⁾。

1) Connectivity Reliability(連結信頼性)

2) Travel Time Reliability(所要時間信頼性)

3) Capacity Reliability(容量信頼性)

このうち、1)は、経路交通量が考慮され利用者が実際に体験することとなる信頼性、

4) Encountered Reliability

として拡張されている。また、3)は、交通サービスの利用者が体験するサービスおよび供給者が提供するサービス双方のプレを反映して

5) Performance Reliability

として表現することも可能である²⁾。さらに、2)は、

2') Travel Time and Cost Reliability

として一般化される。また、フローの低下を対象とした

6) Flow Decrement Reliability

も提案されている。また、所与時間以内に駐車場を確保できるための

7) Parking Reliability

など³⁾、信頼性の概念は拡張され、適用範囲が広がってきている。この他、

8) Reliability Mode Choice

もある。所要時間の変動を時間信頼性とみなし、信頼性を考慮した交通手段選択の研究⁴⁾である。

本研究で提案する重要度の概念は、システム工学の分野では従来から提案されているものの、交通ネットワークの分野では、あまり利用されていないものである。本論文で扱う重要度は、1)の連結信頼性に基づいて行われるものである。ネットワーク信頼性において重要度を扱

* キーワード：道路ネットワーク信頼性、重要度解析、確率重要度、クリティカリティ重要度、道路網管理

** 正会員 名城大学都市情報学部 (〒509-0261 岐阜県可児市虹ヶ丘, Tel:0574-69-0131, Fax: 0574-69-0155)

*** 非会員 (株)東建コーポレーション姫路支店 (〒670-0949 姫路市三左衛門堀東の町 55, TEL:0792-25-3737)

**** 非会員 カッパ・クリエイト株式会社 (〒330-0845 さいたま市大宮仲町, tel:048-650-5100(代))

った研究としては、阪神・淡路大震災後のネットワークの重要度をBirnbbaum's structural importanceを使用して算出した研究⁹⁾がみられるぐらいである。重要度評価の応用事例としては、平常時においては構造物強度の差別化(連続立体化構造物での立体交差箇所等での耐震強化)、耐震強化整備順位評価などが考えられる。また、災害時には、交通規制の優先度決定、復旧優先度決定などに用いることが有用である。

3. 連結信頼性の定義と確率重要度

連結信頼性を所与の期間中、道路網の任意のノード間において、あるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率的指標と定義する。同様に、リンク信頼度をそのリンク上においてあるサービスレベル以上での走行移動が保証される確率と定義する。道路ネットワークの特定のノード間のミニマルパス(ネットワークにおいて、任意のノード間が連結されるために、必要にして十分なリンクの集合)を P_s とすると信頼度の厳密値 R は、

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

で与えられる。ここで P_s は s 番目のミニマルパスセット、 p はパス総数を表している。この計算法を、ブール演算法⁹⁾とよんでいる。 X_a は、

$$X_a = \begin{cases} 1, & \text{リンク } a \text{ での走行移動があるサービスレベル以上の場合,} \\ 0, & \text{そうでない場合,} \end{cases} \quad (2)$$

で与えられる二値確率変数である。リンク信頼度 r_a は、

$$r_a = E[X_a], \quad (3)$$

で与えられる。 a はリンク番号である。

リンク信頼度の与え方は以下のとおりである。

サービスレベルには種々の設定レベルがあるが、ここでは円滑領域、つまり需要交通量が交通容量を下回るサービスレベルとする。交通需要は日々変動するので、この交通需要がリンク容量を上回らない確率としてリンク信頼度を定義できる。すなわち、式(3)のリンク信頼度は、

$$r_a = \int_0^{C_a} f(v_a) dv_a, \quad (4)$$

で与えられる。ここに、 v_a はリンク a における需要交通量、 C_a は交通容量、 $f(v)$ は v の確率密度関数である。

式(1)で与えられるノード間信頼度を効率的に向上させる問題を考える。これは高信頼性ネットワーク計画問題、あるいは、災害時などにおけるネットワーク信頼度改善問題として位置づけられる。

一例として、災害時等、交通ネットワークの信頼性を高く保つ必要のある場合どのようなリンクに着目して交

通規制等をすればいいか、などが考えられる。従来、ネットワークの信頼度を効率的に向上させることのできるリンクの評価指標として確率重要度(Birnbbaum's structural importance)が提案されている。確率重要度 PI_a とは、

$$PI_a = \partial R(\mathbf{r}) / \partial r_a, \quad (5)$$

で定義される測度である⁹⁾。確率重要度には $0 \leq PI_a \leq 1$ という性質があり、そのリンクの信頼度の維持(向上/低下)がノード間信頼度の維持(向上/低下)に与える影響度を知ることができる。確率重要度の大きなリンク信頼度を改善することで、ネットワークのノード間信頼度を効率的に向上させることができる。ここに、 R とはノード間信頼度、 r_a とはリンク信頼度である。

確率重要度には、効果的にノード間信頼度を向上させる可能性がある反面、次節で述べる欠点も持ち合わせている。本研究では、従来から提案されている確率重要度に加え、本研究で独自に考案したクリティカリティ重要度と比較することで、これらの指標による信頼度の向上効果を数値計算して考察するものである。

4. 確率重要度の問題点とクリティカリティ重要度

(1) 直列ネットワークの場合(2リンクの場合)

直列システム(2リンク)の場合、ノード間信頼度 R は、AB間のリンク信頼度を r_1 、 r_2 とすると、

$$R_{AB} = r_1 \cdot r_2, \quad (6)$$

となる。確率重要度は、リンク1、2それぞれ、

$$PI_1 = \partial R_{ab} / \partial r_1 \quad (\text{リンク 1}) \quad (7)$$

$$PI_2 = \partial R_{ab} / \partial r_2 \quad (\text{リンク 2}) \quad (8)$$

と表現できるので、

$$PI_1 = r_2, \quad (9)$$

$$PI_2 = r_1, \quad (10)$$

である。

仮に、 r_1 と r_2 の関係が、 $r_1 > r_2$ であるならば、

$$PI_1 < PI_2 \quad (11)$$

が成立する。

ここから、直列システムの場合では信頼度の小さいリンクの信頼度を増加させる方が効率的であることがわかる。このことは、多数のリンクからなる直列システムにも容易に拡張される。すなわち、直列システムでは、確率重要度が高く計算されるリンクは、リンク信頼度が最も小さいリンクであり、このリンクの信頼度を向上させることによって効率的にネットワークの信頼度を向上させることができる。この結果は、ネットワーク運用上あるいはネットワーク構築上、実際の、合理的である。

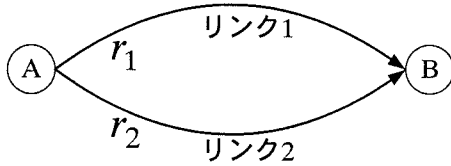


図-1 並列ネットワーク

(2) 並列ネットワークの場合

図-1のネットワークを考える。AB間のノード間信頼度は、

$$R_{AB} = 1 - (1 - r_1)(1 - r_2) \quad (12)$$

で計算されるから、 $PI_1 = 1 - r_2$ 、 $PI_2 = 1 - r_1$ である。仮に $r_1 > r_2$ の場合、

$$PI_1 > PI_2 \quad (13)$$

となり、信頼度の高いリンク1が信頼度改善対象リンクとして選択される。リンク信頼度が交通量に依存する場合、信頼度改善は交通量を減少させることを意味し、混雑しているリンクはますます混雑し、円滑なリンクはその逆となる、実用上非現実的な非合理的な運用結果となる欠点がある。

(3) 確率重要度の問題点とクリティカリティ重要度の提案

確率重要度には、(2)で述べた並列ネットワークでの問題点に加え、信頼度のきわめて高いリンクの信頼度改善は信頼度の低いリンクの改善よりも困難であることを考慮できないという欠点がある。

そこで、上記の確率重要度の特性を踏まえ、クリティカリティ重要度を提案する。確率重要度には、信頼度の高いリンクの信頼度を改善することは、低いリンクの信頼度を改善することよりも困難であるという事実が反映されていない。したがって、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重要度を定義する方が交通計画の立場から便利である。これがクリティカリティ重要度である。FTA システム信頼性解析でのクリティカリティ重要度⁷⁾を参考に、リンク不信頼度を

$$q_a = 1 - r_a \quad (14)$$

とし、クリティカリティ重要度 CI_a を

$$\begin{aligned} CI_a &= \lim_{\Delta q_a \rightarrow 0} \left\{ - \frac{\Delta R(\mathbf{r}) / R(\mathbf{r})}{\Delta q_a / q_a} \right\} \\ &= - \frac{\partial R(\mathbf{r})}{\partial q_a} \times \frac{q_a}{R(\mathbf{r})} \end{aligned} \quad (15)$$

で定義する。変形すると、

$$\begin{aligned} CI_a &= \frac{\partial R(\mathbf{r})}{\partial r_a} \times \frac{(1 - r_a)}{R(\mathbf{r})} \\ &= PI_a \times \frac{(1 - r_a)}{R(\mathbf{r})} \end{aligned} \quad (16)$$

したがって、 CI_a と PI_a の間には

$$CI_a = \frac{(1 - r_a)}{R} PI_a \quad (17)$$

の関係がある。

式(15)から導かれた式(17)は、仮に2つのリンクの確率重要度 (PI_a の値) が同じであっても、リンク信頼度の低いリンク (r_a が小さいリンク) の方がクリティカリティ重要度が大きく算出されることを示している。その結果、クリティカリティ重要度では、信頼度の高いリンクの信頼度を改善することは、低いリンクの信頼度を改善することよりも困難であることを表現できることとなる。

5. クリティカリティ重要度の性質

(1) 直列ネットワークの場合 (2リンクの場合)

4.(1)と全く同様に、AB間のリンク信頼度を r_1 、 r_2 とすると、式(6)と式(17)から、リンク1、2のクリティカリティ重要度はそれぞれ、

$$CI_1 = \frac{1 - r_1}{r_1} = \frac{1}{r_1} - 1 \quad (18)$$

$$CI_2 = \frac{1 - r_2}{r_2} = \frac{1}{r_2} - 1 \quad (19)$$

となる。

したがって、 r_1 と r_2 の関係が、 $r_1 > r_2$ であるならば、

$$CI_1 < CI_2 \quad (20)$$

が成立する。すなわち、直列ネットワークの場合は確率重要度と同じ性質があることがわかる。

(2) 並列ネットワークの場合

同様に、式(12)と式(17)から、リンク1、2のクリティカリティ重要度はそれぞれ、

$$CI_1 = \frac{1}{R_{AB}} \cdot (1 - r_1)(1 - r_2) \quad (21)$$

$$CI_2 = \frac{1}{R_{AB}} \cdot (1 - r_2)(1 - r_1) \quad (22)$$

となる。確率重要度とは違って $r_1 > r_2$ であろうと $r_1 < r_2$ であろうと CI_1 と CI_2 の関係には、

$$CI_1 = CI_2 \quad (23)$$

の性質がある。このことは、並列システムの場合では信頼度の大小にかかわらずどちらのリンクを改善対象リンクとしても効果が同じであることを示している。この場合、対象リンク選定には別の基準が必要であり、この基準としては交通容量や改善容易性等が考えられる。

6. 数値計算例

図-2のネットワークに対し、同一の初期値に対して確率重要度、クリティカリティ重要度でノード間信頼度の改善を比較する。その方法は、各重要度で信頼性改善リンクを選択し、ノード1-4間の信頼度を向上させるものである。リンク信頼度は交通量に依存するものとし、文献8)の方法によった。文献8)では、OD交通量の変動がリンク交通量の変動要因であり、混雑度が小さい場合は変動が大きく、混雑が大きくなるにしたがって変動は小さくなることをシミュレーションで明らかにし、モデル内でのパラメータ推定を行っている。本研究ではこの研究成果を利用し、交通量変動に正規分布を仮定し、交通量から変動係数を決定し、この交通量変動のもとでリンク信頼度を決定する手順を採った。また交通量の増減は、リンクコスト法(後述)を用いた。

具体的手順は次のとおりである。

- 1) ネットワークに同一の初期値(リンクコスト、ODフロー)を与える。ネットワークデータは表-1に示す。リンクの旅行時間関数はBPR関数、

$$t_a(v_a) = t_{a0} \{1 + \alpha(v_a / C_a)^\beta\} \quad (24)$$

で与えている。ここに、 v_a 、 C_a はそれぞれリンク a での交通量、容量であり、 $t_a(v_a)$ 、 t_{a0} はそれぞれリンク旅行時間、自由旅行時間である。 α 、 β の値は1.6、3.0を使用した。この値は、京都市ネットワークに対し、リンクフローの計算値と実測値の差の二乗和が最小となるように求めた値である⁸⁾。ODフローは、ノード1から4までのODフローのみとし、この場合のネットワーク容量である3000台を与えている。

- 2) 利用者均衡配分原則で交通量配分を行う。
- 3) リンクフローに正規分布を仮定し、文献8)で求められた変動係数を用いて交通需要の正規分布形を確定し、式(25)にてリンク信頼度 r_a を求める；

$$r_a = \int_0^1 f(g_a) dg_a, \quad (25)$$

ここに、 g_a は混雑度であり、

$$g_a = v_a / C_a, \quad (26)$$

で与えられる。 $f(g_a)$ は混雑度に関する確率密度関数である。

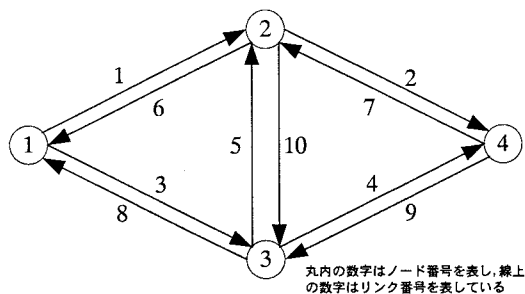


図-2 ネットワーク形状(4ノード10リンク)

表-1 ネットワーク諸元

リンク番号	発ノード	着ノード	自由旅行時間 (分)	交通容量 台/時
1	1	2	3.00	2000
2	2	4	3.00	2000
3	1	3	2.00	1000
4	3	4	2.00	1000
5	3	2	1.00	3000
6	2	1	3.00	2000
7	4	2	3.00	2000
8	3	1	2.00	1000
9	4	3	2.00	1000
10	2	3	1.00	3000

- 4) 式(1)および式(25)とブール演算法⁹⁾によりノード間信頼度を求める。

- 5) ブール演算法⁹⁾では、式の値のみならず式を構成する多項式の情報を保存しているため、偏微分等の数式操作が行える。このため、確率重要度およびクリティカリティ重要度が計算できる。

- 6) 確率重要度およびクリティカリティ重要度指標が最大となったリンクを改善することによって効率的にノード間信頼度を改善できるので、当該リンクをコントロールリンクとする。

- 7) コントロールリンクにリンクコスト法(ダミーリンクを使用)でリンク抵抗を増加させ、交通量を再配分する。ここでリンクコスト法とは、コントロールリンクに直列結合したダミーリンクに、任意の抵抗値(本計算では1回当たり5分の所要時間増加)を与えて旅行時間を増加させ、他のリンクへの迂回を促すものである。ダミーリンクはネットワークのリンク数だけ存在し、リンクと対応するダミーリンクは直列結合させてある。ダミーリンクの自由旅行時間の初期値にはきわめて小さな値を与え、リンク容量にはきわめて大きな値を与えている。

- 8) 手順3)~7)を繰り返す(計算実験回数は4回とした)。

ここで、リンクコスト増加の実際的意味は次のように考えている。リンクコスト増加分をゼロとすることは何も交通規制を実施しないことに相当し、リンクコスト増加分を無限大とすることは一般車の通行止め

を意味している。ゼロと無限大の中間的な値は、交差点での赤時間を長くすることや「交通のトリアージ」で通行車種を選別することに相当している。なお、所要時間の増大と規制交通量の関係については今後の課題としたい。また、ステップ8)で計算を繰り返すことは、交通規制の強度はどの程度まで必要かを知るために行っている。また、交通量が減少すると信頼度が増加するメカニズムは、交通量が平均値周りで確率変動する場合、リンク信頼度 r_a は交通量が交通容量を上回らない確率(式(25)または式(4)で与えられる)で与えられるので明らかであろう。

計算実験では、まず最初に確率重要度(Birnbaum's structural importance)とクリティカリティ重要度を比較する。次に、ネットワークの並列構造のためクリティカリティ重要度が同一値となった場合(5.(2)参照)、リンク容量に着目した計算比較例を示す。

すなわち、計算比較ケースは次の3ケースである。
ケース1) 確率重要度を判断の基準値としネットワーク信頼度を改善するケース。

ケース2) クリティカリティ重要度を判断の基準とし、重要度が同一となった場合には交通容量の大きいリンクを選択することによってネットワーク信頼度を改善するケース。

ケース3) クリティカリティ重要度を判断の基準とし、重要度が同一となった場合には交通容量の小さいリンクを選択することによってネットワーク信頼度を改善するケース。

7. 計算結果と考察

ノード1-4間の信頼度および総所要時間等の推移を比較したものが表-2(ケース1: 確率重要度)、表-3,4(ケース2,3: クリティカリティ重要度)である。

確率重要度に着目した場合(ケース1)では常にリンク1が選択される。以下にシミュレーションの過程を説明する。表-2では、初期状態では計算ステップ1)~5)の実行により、リンク1とリンク2の確率重要度が同一値0.481926として求まる。2つのリンクが同一の確率重要度の値となっているが、実際の交通規制と整合させて上流側のリンクを制御する方が妥当と考えリンク1をコントロールリンクとしている。計算ステップ7)を実行し交通量を再配分すると交通状態1が求められる。ここでも、リンク1の確率重要度が最も大きいので次もリンク1が選択される。以下同様にリンク1がコントロールリンクとして選択される結果となる。クリティカリティ重要度の場合と比較すればわかるが、同一のリンクが連続して選択される結果、4.(3)でも述べたように、信頼度のきわめて高いリンクの信頼度改善が困難であることへの配慮ができない

結果となっている。

クリティカリティ重要度の場合(ケース2)では交互にリンクが選択されている。以下に表の見方を説明する。表-3では、初期状態ではリンク1~4の確率重要度の値がすべて0.359542と同じ値である。交通容量の大きいリンクで上流側のリンクを選択するルールにより、リンク1がコントロールリンクに選択される。交通状態1では、リンク2と4の確率重要度が0.359542と同一値であるので、交通容量の大きいリンク2が選択される。以後同様にしてリンク1と2が交互に選択される結果となる。リンク信頼度の改善も、リンク1に関しては、 $0.596 \rightarrow 0.818 \rightarrow 0.775 \rightarrow 0.924 \rightarrow 0.924$ と推移しており、モデルネットワークでの仮想的計算とはいえ、おおむね実現可能な現実的レベルであることがわかる。信頼度の高いリンクが常に選択されていない点にも特徴がある。結果としてのノード間信頼度の改善効果は、信頼度改善途上の交通状態2で若干確率重要度による結果に劣るが、最終的には確率重要度に比べ大幅に改善されていることがわかる。この段階的な計算はモデルネットワークを使用した仮想的計算であり、現実には段階的改善は行われな可能性はあるが途中の過程においても確率重要度よりもクリティカリティ重要度による改善の方が優れているといえる。ノード間信頼性を改善させる結果、総所要時間は均衡配分の結果から乖離していき初期状態の値から増加することとなる。この増加の程度もクリティカリティ重要度の方が増加をより抑制しており優れているといえる。

5.(2)において述べたようにクリティカリティ重要度の場合、ネットワークが並列構造となると同一値が算出されコントロールリンク候補が複数となる場合がある。ケース2の結果の表-3をみると、それに相当していることがわかる。このため、コントロールリンクがリンク1,2(交通容量が大(2000台))の場合(ケース2)とリンク3,4(交通容量が小(1000台))の場合(ケース3)のネットワーク信頼度改善効果を比較した。ケース3の計算結果を表-3に示す。

ケース3の場合では、コントロールリンクはリンク3とリンク4が交互に選択されている。以下に表の見方を説明する。表-3では、初期状態ではリンク1~4の確率重要度の値がすべて0.359542とケース2と同じ値である。交通容量の小さいリンクで上流側のリンクを選択するルールにより、リンク3がコントロールリンクに選択される。交通状態1では、リンク2と4の確率重要度が0.340233と同一値であるので、交通容量の小さいリンク4が選択される。以下、リンク3と4が交互に選択される結果となる。ケース2と比較するとケース3は、ノード間信頼度の改善効果はケー

表-2 確率重要度に着目したネットワークの信頼性改善効果(総交通量3000台)

		初期状態	交通状態1	交通状態2	交通状態3	交通状態4
交通量(単位:台) (合計3000台)	リンク 1	1860(6.86)	1560(5.28)	1380(4.58)	1200(4.04)	1080(3.76)
	リンク 2	1860(6.86)	1860(6.86)	1920(7.25)	1920(7.25)	1920(7.25)
	リンク 3	1140(6.74)	1440(11.56)	1620(15.60)	1800(20.66)	1920(24.65)
	リンク 4	1140(6.74)	1140(6.74)	1080(6.03)	1080(6.03)	1080(6.03)
	()内:所要時間(単位:分)					
	リンク 5	0(1.00)	300(1.00)	600(1.01)	780(1.03)	900(1.04)
リンク信頼度	リンク 10	0(1.00)	0(1.00)	60(1.00)	60(1.00)	60(1.00)
	リンク 1	0.59637	0.81805	0.92423	0.98203	0.99586
	リンク 2	0.59637	0.59637	0.55376	0.55376	0.55376
	リンク 3	0.34480	0.15992	0.10636	0.07392	0.05935
	リンク 4	0.34480	0.34480	0.40487	0.40487	0.40487
	リンク 5	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
確率重要度	リンク 10	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
	リンク 1	0.48193	0.61791	0.65632	0.68014	0.69084
	リンク 2	0.48193	0.55505	0.55483	0.58523	0.59281
	リンク 3	0.29689	0.13383	0.05565	0.01320	0.00304
	リンク 4	0.29689	0.34193	0.41603	0.43881	0.44450
	リンク 5	0.05438	0.11367	0.00266	0.00044	0.00008
クリティカリティ重要度	リンク 10	0.05438	0.09564	0.14922	0.16431	0.16924
	コントロールリンク	なし	リンク 1	リンク 1	リンク 1	リンク 1
	リンク 1	0.35954	0.18043	0.07263	0.01696	0.00391
	リンク 2	0.35954	0.35954	0.36160	0.36160	0.36160
	リンク 3	0.35954	0.18043	0.07263	0.01692	0.00391
	リンク 4	0.35954	0.35954	0.36160	0.36160	0.36160
混雑リンク個数	リンク 5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	リンク 10	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	1.0<混雑度<1.5	4	4	3	3	3
ノード間信頼度	1.5<混雑度	0	0	1	1	1
	合計	4	4	4	4	4
	総所要時間(単位:分)	1620.23	1841.47	2109.48	2378.48	2652.14

表-3 クリティカリティ重要度に着目したネットワークの信頼性改善効果(総交通量3000台,制御リンク:容量大)

		初期状態	交通状態1	交通状態2	交通状態3	交通状態4
交通量(単位:台) (合計3000台)	リンク 1	1860(6.86)	1560(5.28)	1620(5.55)	1380(4.58)	1380(4.5)
	リンク 2	1860(6.86)	1860(6.86)	1620(5.55)	1560(5.28)	1380(4.58)
	リンク 3	1140(6.74)	1440(11.56)	1380(10.41)	1620(15.60)	1620(15.60)
	リンク 4	1140(6.74)	1140(6.74)	1380(10.41)	1440(11.56)	1620(15.60)
	()内:所要時間(単位:分)					
	リンク 5	0(1.00)	300(1.00)	0(1.00)	180(1.00)	0(1.00)
リンク信頼度	リンク 10	0(1.00)	0(1.00)	0(1.00)	0(1.00)	0(1.00)
	リンク 1	0.59637	0.81805	0.77534	0.92423	0.92423
	リンク 2	0.59637	0.59637	0.77534	0.81805	0.92423
	リンク 3	0.34480	0.15992	0.18502	0.10636	0.10636
	リンク 4	0.34480	0.34480	0.18502	0.15992	0.10636
	リンク 5	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
確率重要度	リンク 10	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
	リンク 1	0.48193	0.61791	0.66576	0.75705	0.83313
	リンク 2	0.48193	0.55505	0.66576	0.78320	0.83313
	リンク 3	0.29689	0.13383	0.18353	0.06419	0.07064
	リンク 4	0.29689	0.34193	0.18353	0.16963	0.07064
	リンク 5	0.05438	0.01137	0.02627	0.00554	0.00666
クリティカリティ重要度	リンク 10	0.05438	0.09564	0.02627	0.02403	0.00666
	リンク 1	0.35954	0.18043	0.22413	0.07263	0.07263
	リンク 2	0.35954	0.35954	0.22413	0.18043	0.07263
	リンク 3	0.35954	0.18043	0.22413	0.07263	0.07263
	リンク 4	0.35954	0.35954	0.22413	0.18043	0.07263
	リンク 5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
混雑リンク個数	リンク 10	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	コントロールリンク	なし	リンク 1	リンク 2	リンク 1	リンク 2
	1.0<混雑度<1.5	4	4	4	3	2
ノード間信頼度	1.5<混雑度	0	0	0	1	2
	合計	4	4	4	4	4
	総所要時間(単位:分)	1620.23	1841.47	2060.50	2306.95	2565.59

表-4 クリティカリティ重要度に着目したネットワークの信頼性改善効果(総交通量3000台,制御リンク:容量小)

		初期状態	交通状態1	交通状態2	交通状態3	交通状態4
交通量(単位:台) (合計3000台)	リンク1	1860(6.86)	2220(9.56)	2160(9.05)	2460(11.93)	2520(12.60)
	リンク2	1860(6.86)	1800(6.50)	2160(9.05)	2160(9.05)	2520(12.60)
	リンク3	1140(6.74)	780(3.52)	840(3.90)	540(2.50)	480(2.35)
	リンク4	1140(6.74)	1200(7.53)	840(3.90)	840(3.90)	480(2.35)
	()内:所要時間(単位:分)					
リンク信頼度	リンク5	0(1.00)	240(1.00)	0(1.00)	0(1.00)	0(1.00)
	リンク10	0(1.00)	660(1.02)	0(1.00)	300(1.00)	0(1.00)
	リンク1	0.59637	0.37365	0.40487	0.27144	0.25094
	リンク2	0.59637	0.64051	0.40487	0.40487	0.25094
	リンク3	0.34480	0.81805	0.73083	0.99586	0.99949
確率重要度	リンク4	0.34480	0.29383	0.73083	0.73083	0.99949
	リンク5	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
	リンク10	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
	リンク1	0.48193	0.13576	0.22605	0.00348	0.00051
	リンク2	0.48193	0.62569	0.22605	0.26836	0.00051
クリティカリティ重要度	リンク3	0.29689	0.46734	0.49980	0.61185	0.74877
	リンク4	0.29689	0.31852	0.49980	0.59334	0.74877
	リンク5	0.05438	0.23176	0.04740	0.07907	0.00010
	リンク10	0.05438	0.00719	0.04740	0.00049	0.00010
	リンク1	0.35954	0.12862	0.19075	0.00303	0.00038
クリティカリティ重要度	リンク2	0.35954	0.34023	0.19075	0.19075	0.00038
	リンク3	0.35954	0.12862	0.19075	0.00303	0.00038
	リンク4	0.35954	0.34023	0.19075	0.19075	0.00038
	リンク5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
	リンク10	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
混雑リンク個数	コントロールリンク	なし	リンク3	リンク4	リンク3	リンク4
	1.0<混雑度<1.5	4	4	4	4	4
	1.5<混雑度	0	0	0	0	0
合計		4	4	4	4	4
ノード間信頼度		0.54102	0.66111	0.70528	0.83728	0.99924
総所要時間(単位:分)		1620.23	1773.27	1879.48	2070.07	2294.00

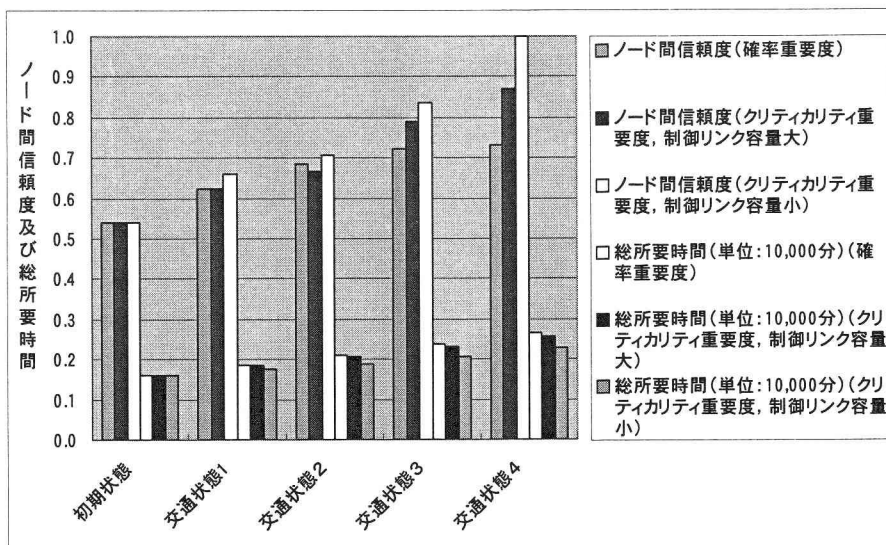


図-3 ノード間信頼度および総所要時間の推移の比較

ス2よりも優れ, しかも総走行時間においてもケース2よりも優れていることがわかる。

以上から, ノード間信頼度の改善では, ケース1では0.541021(初期状態)→0.731569(交通状態4), ケース2では0.541021→0.869163, ケース3では0.541021→0.999236となり, ケース3が最も優れていることが

分かる。総所要時間の増加でも, ケース3が最も増加を抑制している。ノード間信頼度および総所要時間に関してケース1～3を比較したものを図-3に示している。

まとめると, クリティカリティ重要度によるネットワーク信頼度改善は, 高信頼度リンクの信頼性向上は

困難であるという確率重要度の欠点を補うとともに、モデルネットワークでは信頼性改善効果および総所要時間の増加抑制の2つの観点から優れていることが明らかとなった。容量の小さなリンクをコントロールリンクとした場合は、より信頼性改善効果が大きくしかも総所要時間増加への影響が小さいことも明らかとなった。

8. まとめと今後の課題

本論文では、ネットワーク信頼度を向上させるための評価指標である確率重要度 (Birbaum's structural importance) の問題点を明らかにし、新しい指標として交通ネットワーク用のクリティカルティ重要度を提案し、比較数値計算を行ったものである。

- (1) 信頼性研究、重要度評価の意義を整理した。
- (2) 直列構造ネットワークおよび並列構造ネットワークに対し、確率重要度の問題点を明らかにした。問題点とは、
 - a) 確率重要度は効果的にノード間信頼度を向上させる可能性がある反面、信頼度の高いリンクの信頼度改善はより困難であるという考慮ができない。
 - b) 並列構造ネットワークの場合、信頼度の高い方のリンクが信頼度改善対象リンクとして選択される。信頼度が交通量に依存する場合、この選択の結果、ネットワークの混雑のアンバランスが益々顕著になる。
- (3) この欠点を解消する可能性としてクリティカルティ重要度を提案した。クリティカルティ重要度の性質は、直列構造ネットワークでは確率重要度と同じであり、並列構造ネットワークでは確率重要度とは異なり、並列リンクが同等に選択される。
- (4) 直列構造および並列構造の単純なネットワークでは確率重要度およびクリティカルティ重要度の性質が明らかである。しかし、より複雑なネットワークではその挙動が不明なので、ブリッジ構造ネットワークを対象に交通混雑に伴う迂回を考慮した計算例を示した。
- (5) 計算の結果、クリティカルティ重要度によるネットワーク改善の方が、確率重要度に基づく改善よりも信頼性改善効果が大きいことが明らかとなった。また、並列構造の場合、並列関係のリンクのクリティカルティ重要度が同一値となるが、その場合、リンク容量の小さいリンクを選択する方が信頼性改善および総所要時間増加抑制の両面で優れていることが明らかとなった。
- (6) (5)の結果は簡単なネットワークにおける仮想的

計算に基づく結論ではあるが、一般論として次のようにいうこともできる。災害時のような非常時環境下で地域間の信頼性を確保するには、交通容量の小さい道路を確保する方が信頼性も確保でき、ネットワーク全体の混雑増加抑制も図れる。また、災害時の緊急輸送ルートの選定にあたっては(地域内の交通禁止などの措置がとられない限り)地域に流入させる交通量に見合った適切なルートを選択する方がネットワーク内での流動性が確保できるかもしれない。ただし、実際の災害場面において規制ルートを選定することは、需要交通量の見通しや他の種々の要因等を考慮する必要があり慎重を要する問題である。

今後の課題は以下のとおりである。

クリティカルティ重要度についてはそのネットワーク信頼度向上への貢献挙動がどのようになっているか不明な点も残っている。今回、その定性的傾向は明らかになったと考えるが、今後、種々のネットワークに対して数値計算を行い、その挙動と利害得失を考察する必要がある。

参考文献

- 1) Nicholson, A. Schmoekler, 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) 若林拓史・坂部正治・吉崎理絵：降雪予報下における高規格道路網の所要時間信頼性解析，土木計画学研究・講演集，No.24，CD-ROM，2001.
- 3) Lam, W.H.K. and Tam, M. (2003). Reliability Assessment on Searching Time for Parking in Urban Area, 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.61-77, Pergamon, 2003.
- 4) 若林拓史・浅岡克彦・亀田弘行・飯田恭敬：交通手段選択における所要時間信頼性の影響と交通サービス途絶時の利用者の意識変化に関する研究，土木学会論文集，No.632/IV-45，pp.29-40，1999.
- 5) 若林拓史：迂回交通量を考慮した阪神間道路網の連結信頼性評価と重要区間評価：現況および将来道路網に対して，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.709-716，1996.
- 6) 飯田恭敬・若林拓史：プール代数を用いた道路網ノード間信頼度の上・下限値の効率的算出法，土木学会論文集，No.395/IV-9，pp.75-84，1988.
- 7) Henley, E.J. and Kumamoto, H.: Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, Inc., 418-436, 1981.
- 8) 若林拓史・飯田恭敬・井上陽一：シミュレーションによる道路網の交通量変動分析とリンク信頼度推定法，土木学会論文集，No.458/IV-18，pp.35-44，1993.

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ルティ重要度による信頼性向上効果*

若林拓史**・大野隆晴***・鈴木宏章****

ネットワーク信頼度は最も重要度の高いキーリンクの信頼度を向上させることで効率的に改善できる。この指標は確率重要度であるが、この結果、信頼度の高いリンクの信頼度をさらに向上させる結果となったり、もともと信頼度の高いリンクを改善するのは困難であるという交通工学上の実際面を考慮したものとはなっていない。本研究では、確率重要度の欠点を補う新たな重要度指標としてクリティカルティ重要度を提案する。この指標では、信頼度の高いリンクを向上させるより信頼度の低いリンクを向上させる方が容易であることを考慮できる。小規模なネットワークを利用して両指標の特性を比較している。

Highway Network Importance Indices: Network Reliability Improvement using Probability Importance vs. Criticality Importance

by Hiroshi WAKABAYASHI**, Takaharu OHNO*** and Hiroaki SUZUKI****

Network reliability can be improved effectively by improving most important key link that has the largest value of Probability Importance. But use of it results in that better reliable link should be more improved and this is irrational. Thus this article proposed newly developed Criticality Importance and compare the network performances improved by both importance indicators. The criticality importance considers the fact that it is more difficult to improve the more reliable links than to improve the less reliable links. Both characteristics are quantitatively discussed with small network.
