

令和 2 年度 学 位 論 文

論 文 題 目

〈邦 文〉

重要度指標に着目した
道路網の効率的な連結信頼性向上法

〈欧 文〉

Efficient Reliability Improvement for Highway Network
by Importance Indices

名城大学大学院 都市情報学研究科 都市情報学専攻 博士後期課程

氏 名

長江 貴弘

目 次

第 1 章 緒論	1
1.1 背景・目的	1
1.2 既往研究のレビュー	5
1.3 本研究の概要	9
第 2 章 信頼性解析・重要度指標の概要	15
2.1 概説	15
2.2 一般的な信頼性解析	15
2.3 道路網における信頼性解析の考え方	19
2.3.1 旅行時間信頼性	20
2.3.2 連結信頼性	20
2.3.3 本研究における道路網の信頼性解析	20
2.4 一般的な重要度指標	21
2.5 道路網における重要度指標の考え方	21
2.5.1 重要度指標	21
2.5.2 脆弱性	23
2.6 道路網における信頼度改善のプロセスと課題	23
第 3 章 信頼性グラフ解析法の道路網への適用	27
3.1 概説	27
3.2 システムの信頼性と信頼性グラフ解析	27
3.2.1 構造関数と信頼度	27
3.2.2 構造関数の構成法	29
3.3 システム信頼度の厳密値の計算法	34
3.4 結語	39

第4章 重要度指標の道路網への適用 42

4.1	概説	42
4.2	重要度指標の定義と特徴	42
4.2.1	確率重要度	42
4.2.2	クリティカルリティ重要度	44
4.2.3	改良型クリティカルリティ重要度	45
4.2.4	重要度指標の利害得失	46
4.3	重要度指標の比較分析	47
4.3.1	Cost-Reliability 関数と費用対効果関数の設定	47
4.3.2	並列・田の字型ネットワークにおける信頼度改善のモデル計算	48
4.3.3	Sioux Falls ネットワークにおける信頼度改善のモデル計算	54
4.3.4	高信頼度のネットワークにおける信頼度改善の課題	59
4.4	PSA で用いられる重要度指標の道路網への適用	62
4.4.1	PSA で用いられる重要度指標	62
4.4.2	Fussell Vesely	64
4.4.3	Risk Achievement Worth	65
4.4.4	PSA で用いられる重要度指標の比較分析・モデル計算	66
4.5	リンク信頼度の値を必要としない重要度(脆弱性の概念)	71
4.5.1	非重複経路の定義	71
4.5.2	非重複経路の数え上げモデル	71
4.5.3	クリティカルリンクの特定	74
4.5.4	脆弱性と重要度の概念の比較・考察	75
4.6	結語	76

第5章 道路網における信頼性計算の近似解法 78

5.1	概説	78
5.2	システム信頼度の近似解法	78
5.2.1	Esary and Proschan の上・下限値	78
5.2.2	含意排他公式を利用した上・下限値	79

5.2.3	部分的なミニマルパス・ミニマルカットセットを用いた近似解法	81
5.3	近似解法の必要性和計算時間	82
5.3.1	部分パスセット選択による近似解法の例	82
5.3.2	部分パスセット選択で計算に必要となるパス数	85
5.3.3	パスセット選択方法による計算時間の比較	88
5.4	パスセット選択方法による重要度の順位の変動	92
5.5	結語	107
 第 6 章 実際の道路網における信頼性・重要度の計算		111
6.1	概説	111
6.2	リンク信頼度の推定の根拠となるデータ	111
6.2.1	内水ハザードマップの概要	111
6.2.2	内水ハザードマップをリンク信頼度推定に用いる理由・目的	112
6.2.3	リンク信頼度推定の対象区域について	112
6.3	リンク信頼度の推定方法	114
6.3.1	車両が通行不能になる浸水深の設定	114
6.3.2	降水量に対しての浸水深の変動の仮定	115
6.3.3	浸水深の正規分布グラフ	117
6.3.4	降水量毎の浸水深の推定	121
6.4	リンク信頼度・重要度の試算	130
6.4.1	内水ハザードマップとリンク信頼度の対応	132
6.4.2	降水量毎のリンク信頼度・重要度	132
6.4.3	降水量全体でみた重要度の計算結果の比較	135
6.5	結語	136
 第 7 章 結論		138

第 1 章 緒論

1.1 背景・目的

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、その被害は多方面に渡る。社会基盤においてもそれは同様であり、道路網の一部が通行不能になることも珍しくない。そのような場合、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)。例えば、2011 年に発生した東日本大震災では、東北地方の太平洋沿岸が津波によって壊滅的な被害を受けた。沿岸部を南北に通る国道 45 号は断続的に使用できない状態になったため、太平洋沿いの都市間の輸送が困難となった。そこで、まずは内陸部を南北に通る東北自動車道・国道 4 号の復旧を急ぎ、続いてそれらの道路から東側の沿岸部へ伸びる各道路を復旧させることで、遠回りではあるが上述した都市間の移動を早期に再開できた¹⁾。また、近年大部分が完成した新東名高速道路は、既設の東名高速道路に並行しているが、この新路線の存在によって南海トラフ巨大地震が発生した際の発災後 1 年間の経済損失額を 5%軽減できるという試算もある²⁾。このように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」³⁾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といえる。これは重要度評価⁴⁾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(近似解法による計算量の削減)である。

本研究の目的は、耐災性のある道路網の効率的な構築である。

現状の信頼性解析と重要度評価には主として以下のような課題があるので、本研究ではこれらの課題の克服を目指すものとする。

- (1) リンク信頼度の推定法
- (2) 道路網に適した重要度指標の開発
- (3) 信頼性・重要度の計算時間・計算量の削減

以下、信頼性解析と重要度指標について今後の社会でどのように研究していくべきかという観点も絡めながら、簡単に考察する。

戦後の日本では、高度経済成長を経て発展し、経済的な豊かさを享受してきた。それは主として物質的なものである。その後のバブル崩壊から不況となり、近年では経済的

な価値以外の価値基準が求められてきてもいる。「コト消費」^{5),6)}などはその例であろう。単にモノ・サービスの購入ではなく、特別な体験による精神的な充足など、人間が「ある行為をするコト」によって生まれる消費は従来の経済的な価値では計れないものである。しかし、そのような時代にあつてモノが不要になったのかということという訳ではない。モノは依然として精神的充足の手段として必要である。特に道路等の社会資本の整備は、先進諸国においても重視されていることに変わりはなく、それらの建設・維持には多大な資本が投下されている⁷⁾。

本研究は信頼性の高い道路網の構築を目的としているが、ここでいう信頼性とは以下の二つに大別できる。それは旅行時間信頼性⁸⁾と連結信頼性⁹⁾である。

旅行時間信頼性とは、道路上の所要時間を分布的に取り扱うことで所要時間を評価するものである。例えば、「ある決められた時間内にノードペア間を移動可能な確率」と定義され、定時性を評価する指標である。

連結信頼性は、「ネットワークの構成要素がある確率を持って途絶する場合、あるノードペア間が連結されている確率」と定義される。「連結されている」とは基本的には「走行可能である」ことを示すが、より広義の定義として「対象とするノード間があるサービス水準以上で連結される確率」とすることもできる。

これらの道路網の信頼性の概念は、以下のように言い換えることも可能であると筆者は考える。それは、道路網の「恒常性」「代替性」である。道路網における「恒常性」とは、「いつでも決まった範囲の時間で目的地に到達できる」、「いつでも同じように道路が通行できる」といったことが考えられる。同様に「代替性」とは、「日常的な範囲で目的地に向かう際に、複数の経路の選択肢がある」、「一つの経路が通行不可能になった際に、代替路がある」といったことが考えられる。以下に、「恒常性」「代替性」というものが現代社会においてどのように重要なのかを考察する。

恒常性とは、そもそもヒトをはじめとして生物体内で働く恒常性維持機能のことである¹⁰⁾。例えば、体内では血圧を必要以上に上昇させると、それを適正に下げようとする働きができてくるが、そのバランス維持の機能を「ホメオスタシス（恒常性）」とよぶ¹¹⁾。すなわち、ヒトの恒常性への欲求は生物の本能からもたらされたといっても良いだろう。それが具体的な形で文明に寄与し始めたのが農耕・牧畜という行為である。動物は他の生物から栄養を摂取しなければ生存できないが、ヒトという種が誕生してからも多くの時間は狩猟・採集に費やされてきた。しかし、それでは安定的な食料の確保には限界がある。そこで、計画的に植物・動物をヒトが育成することで、「食料の恒常的な確保」がある程度可能になったのである。ヒトの「恒常性への欲求」は、予測不可能で不安定な自然環境が存在し、それに対峙し続ける限り留まることはないだろう。現代に目を向けてみると、「いつでもモノが買える」コンビニエンスストアや、「いつでも時間

通りに必要な部品が作られる」ジャスト・イン・タイム生産方式、「いつでも他人と遠隔でコミュニケーションができる」ネットワーク通信など、恒常性への欲求に応じて成功したモノ・サービスは枚挙に暇がない。まさにこのような社会において恒常性のあるインフラストラクチャーはますます重要なものとなってきたといえる。

一方、代替性についてはどのようなことがいえるだろうか。道路網において代替路があるということは、経路選択が可能であるという言い方もできるが、これは代替性があるということが選択肢の充実に繋がるということを意味する。選択可能なことは、個人の自由に関わってくる。先進諸国では自由民主主義体制が一般的になっているが、これは簡単に言い切ってしまうと「有権者が政治家を選挙で選択できる」体制であるということである。反対に、独裁とは国民から見て政治の選択肢のない状態となる。選択肢があることが個人にとって重要である一例である。また、選択肢が多ければ個人の希望に叶いやすいということもできる。若者が都会に魅力を感じるのはこの「選択肢の多様性」のせいだろう。現在の社会では、生活保護はあるが基本的には就労して生計を立てるのが基本である。ベーシックインカム等の制度も提案されてはいるものの、未だ途上であり実現した社会は存在しない。そのような現状では、自分の興味のあることに関連した仕事をしたいと考えるのが自然である。その場合、都会の方が仕事の種類が多いのでその点で有利となる。何故、単に労働人口が増えるのではなく仕事の種類が多くなるかというニッチな市場でも需要の絶対量が増えるので個人の生活が成り立つ可能性が増えるからである¹²⁾。今日では、インターネットの普及でニッチな市場が散在し、結果的に「都会」と同じようなことは起こりつつあるが、差異を埋めるほどではない。このような状況下においては、依然として代替性のあるインフラは重要である。人類のこれまでの歴史を鑑みても、交通と通信は共に発達してきたのであり¹³⁾、少なくとも現状で「通信」が「交通」の代替になるという段階には達していないように思われる。

ただし、このように重要なインフラストラクチャーといえども、無尽蔵に整備できるわけではない。都市やインフラの整備は自然界に人工物を作ることであり、当然のことながら以前あった自然環境は破壊される。もちろん、自然環境には前述のホメオスタシスの作用があるのである程度の破壊までなら均衡させることは可能である。しかし、その均衡点を超えともう二度と戻ることはない。森林資源の確保が不可能になったとき、栄えた文明都市が崩壊に至る¹⁴⁾のは歴史が証明しており、持続可能な発展をするには自然環境とのバランスを十分に考慮しなければならない。また、昨今の財政状況・少子高齢化の社会情勢を鑑みても、インフラ整備にもある程度の優先順位をつける必要がある。インフラの維持管理にかかる費用の問題をアセットマネジメントの導入で解決するという提案¹⁵⁾もなされている。現状でも、橋梁の老朽化で通行止めになっている区間がはじまっており¹⁶⁾、ネットワークの機能のためにどのリンクを優先して整備・維持するかを選定するのは重要である。したがって、他分野で用いられている重要度指標を用いるこ

とも一考であろう。ただし、航空・原子力等で用いられている重要度指標^{17),18)}と道路網で用いるべき重要度指標は以下のような差異に留意する必要がある。前者は、システム全体としては一つの目的のために稼働するが、個々では別々の機能を持つ部品(ユニット)が組み合わさっている。一方、道路網はシステム(ネットワーク)全体として多数の目的のために稼働するが、個々では同一の機能を持つ部品(リンク)が組み合わさっている。そのため、道路網で重要度指標を用いる際にはシステム全体のことのみ考慮すればよいわけではないのである。これは「リンク改善の公平性」¹⁹⁾という言葉でも指摘されており、道路網の重要度指標において必要なことである。

信頼性解析・重要度評価いずれに関しても、計算の意味・解釈・特徴についての言語化は極めて重要である。本研究は最終的に政策における判断材料になることを目指しているが、民主主義国家においてその決定者は国民自身である。人口に膾炙するのは言語による説明である。これが円滑に行われなければ、十分に役割を果たすことも期待できない。また、災害対策という側面で考えた場合、民族・風土的な要素も考慮に入れなければならないだろう。客観的なデータの蓄積は重要だが、それが必要とされる人々に受け入れられなければ結局は政策の実行ができないのである。そういう意味では集合的無意識の具現化の産物ともいえる神話、また文化的背景を持つ造形物の傾向からみる文明論などはその一助となり得る。日本に関していえば、「中空」²⁰⁾「平添」²¹⁾といった単語がキーワードになってくると筆者は考える。また、より科学的な手法としてこれからの遺伝子解析にも期待できる。例えば、安心感の元となっている神経伝達物質の伝達量は民族によっても差異があるが、東アジアの人間にはそれが少ないというデータもある²²⁾。日本が防災に力を入れてきたのもこういったことが一因なのかもしれない。

また、最終的な判断を人間が行うという体制に変化がないままなら、昨今注目されているコンピュータや人工知能などに過剰な期待をするのも禁物である。これらは大量のデータを駆使して複雑な演算を行い、回答を導き出すことが可能であるが、機械が人間にわかるように説明ができるわけではない。また、直観に基づいた仮説を設定できるわけでもないし、身体感覚があるわけでもない。むしろこのような道具と対比させることで、今後人間が担うべき役割が明確になることに展望があるように思われる。いずれにせよ、計算の意味・解釈・特徴について人間が考えることが必要なものには変わりはないのである。

1.2 既往研究のレビュー

システムの信頼性解析は、エレクトロニクス・機械システムなどの分野で発達してきたものであり、膨大な研究の蓄積をなしている。これらを体系的に整理することは、極めて多くの労力を必要とするので、これらの研究の紹介は、本文中で必要に応じて適宜取り上げることにする。したがって、ここでは土木工学分野に限定し、道路網の信頼性解析と道路網以外のライフラインネットワークの信頼性解析に関して従来の研究の概要を述べる。また、システムの信頼性を効率的に向上するための重要度に関する研究、信頼性解析・重要度に関する計算の効率化に関する研究についても取り上げる。

ライフラインネットワークの信頼性解析に関する研究

電力・通信・ガス・水道等のライフラインを対象とした信頼性解析は、防災関係研究者を中心に従来から研究されており、相当な蓄積と進展がなされている。Panoussis²³⁾は、ライフラインネットワーク信頼性解析にネットワーク理論の考え方をとり入れることを提案した。彼は、システムを直列システムと並列システムに分類し、複数の供給ノードと複数の需要ノード間のミニマルパス(Panoussis の論文では Tie-Set と呼んでいる)を SSP (Series Systems in Parallel) ネットワークという並列システムへとトポロジカル変換する方法を提案している。Taleb-Agha²⁴⁾は、Panoussis の考え方をさらに発展させ、SSP ネットワークとともに、ミニマルカットから構成される PSS (Parallel Systems in Series) ネットワークによる信頼性解析法を提案し、パスおよびカットの独立性を前提とした構造関数型の信頼度計算式、および Inclusion-Exclusion principle による計算式を提案している。これらはそれぞれ、第 3 章で示す式(3.3.18)と(3.3.19)、(3.3.8)と(3.3.10)に等しい。これらの研究に基づいて、篠塚ら²⁵⁾は埋設ライフラインシステムの地震時の挙動と物理的損害を推定し、SSSP (Super Series Systems in Parallel) による信頼性解析方法と組み合わせてロサンゼルスの上水道網の信頼性を評価している。また彼らは、災害時におけるシステムの性能を、必要条件としての連結性能と十分条件としての機能性能とに分ける必要性を論じており、同じシステムを対象に、流量を評価指標としてモンテカルロシミュレーションでシステムの機能性能を評価している²⁶⁾。柴田ら²⁷⁾は、Fratta・Montanari によって開発されたブール代数法²⁸⁾を利用して電力網システムの連結信頼性を評価している。山田ら²⁹⁾は、連結機能解析に対して、Inclusion-Exclusion principle では要素数が少ないと計算が容易な点に着目し、アークでネットワーク表現された方向性のあるシステムを対象として、システムを部分系に分割して小次元で取り扱うとともに、部分系相互間の連結確率を Inclusion-Exclusion principle を利用して伝達的に求める方法(反復分割法)を提案している。さらに山田ら³⁰⁾は、連結機能解析に対して、彼らの提案する反復分割法と、Fratta・Montanari によるブール代数法、モンテカルロシミュレーションによる方法、Panoussis による SSP ネットワークに対して Inclusion-Exclusion principle

法を適用した方法の 4 方法を比較・分析している。岡田ら³¹⁾は、ミニマルカットと Inclusion-Exclusion principle を用いて配水管網の信頼性を解析しており、また、岡田ら³²⁾、上野ら³³⁾、多々納ら³⁴⁾は、水利システムを修復可能なシステムとみてマルコフ過程を用いたモデルを作成している。

道路網の信頼性解析に関する研究

道路網における初期の信頼性解析は、災害時を対象としたものが多い。小林³⁵⁾は、グラフ理論に基づいた信頼性解析法を提案している。まず、各アークが導通確率をもつとし、2 点間サービスとしての連結信頼度を全ミニマルパス・カットの列挙と Inclusion-Exclusion principle で求めている。また、全点サービスとしての連結信頼度を、ネットワークがとり得るすべての連結状態を列挙し、その中で全ノードが連結されている状態のみを可到達性行列を用いて拾い出し、それらの生起確率の和として求めている。さらに、重要区間の抽出を導通確率に対する感度分析で行っており、またアーク数一定のもとで信頼度を最大とするネットワーク形成問題を列挙法で解析している。初期の道路網信頼性研究として意義深い研究である。川上³⁶⁾は、耐震性の立場から道路網の連結性をモンテカルロ法によって評価している。また、交通容量と断面交通量を用いて、地震前後で変化する道路区間の機能分類を混雑度と犠牲度という 2 つの指標で行っている。塚口ら³⁷⁾は、道路幅員・周囲の建築物などの状況から市街部における地震発生時のリンク信頼度推定の試算を行っている。

深井ら³⁸⁾は、平常時の信頼性評価指標として実測値による旅行時間のレンジ、異常気象時の信頼性指標として通行止め回数や延時間等を提案し、さらに中部地方の幹線道路における異常気象時データを基に通行規制の空間的評価を行っている³⁹⁾。佐々木ら⁴⁰⁾は、時間到達信頼性として実測値を基にした基準旅行時間とピーク時旅行時間の比を、ネットワーク信頼性として基準旅行時間と代替ルート旅行時間の比を用いている。岡田⁴¹⁾および岡田ら⁴²⁾は、2 点間の通行不能性の構造同定と発生確率および発生確率への影響要因の定性的・定量的分析法として、FTA と FMEA(Failure Mode and Effect Analysis) を用いる方法論を提案し、降雪期の道路網の信頼度評価に適用している。

青島ら⁴³⁾は、農山村・都市間通勤を対象に、災害時における都市域への到達確率および所要時間の安定性確保から安全余裕時間の両評価指標を用いて道路網の信頼性評価を行っている。矢部ら⁴⁴⁾は、あるルートが災害で途絶した場合の損失を代替ルートの有無別に算出し、代替ルートの経済効果や時間便益効果を論じている。

道路網の平常時における信頼性解析に重点をおいた研究としては、以下のようなものが挙げられる。加藤ら⁴⁵⁾は、2 点間の信頼度を定時性と速達性の積で定義し信頼性算出の簡便法としている。この研究では、信頼度と定義している指標が、信頼性工学において本来、確率表現として定義される信頼性指標を反映しているかどうか不明確であるが、平常時における道路網のパフォーマンスを対象とした点に特色がある。黒田ら⁴⁶⁾

は、高速道路の単位区間において交通事故が発生した場合の機能停止確率と停止機能の回復確率の分布を仮定し、それによって信頼性理論でいうところのアヴェイラビリティを算定する方法を提案している。リンク信頼度を交通量その他の交通指標から算出することは極めて重要であり、この研究はこの観点から意義深いと考えられる。しかし、リンク信頼度と自然渋滞を関係づけることはさらに重要であり、そのための別モデルの開発を今後の課題としている。加藤ら⁴⁷⁾は、需要予測と便益評価を同一の枠組みで行う事が可能な手法を提案しており、この手法では、便益評価に用いる代表的消費者の効用最大化問題が、マルチユーザークラス概念に基づく需要変動型利用者均衡配分と等価な均衡条件を有する、時間信頼性価値を内生化した便益評価手法としている。内田ら⁴⁸⁾は、ある時間帯に着目した際の、観測データを所与として定式化される尤度関数を最大化して道路ネットワーク上のリンク交通量の平均と分散・共分散が得られると考える。このリンク交通量の観測値を用いて、経路移動時間の確率分布を推計している。齋藤ら⁴⁹⁾は、旅行時間信頼性について、全国多種多様な経路に対して適用可能な、標準偏差の推計式を作成している。大澤ら⁵⁰⁾は、旅行時間信頼性と連結信頼性の2つの代表的な信頼性に着目し、利用者均衡配分を用いて期待総旅行コストを定義、時間信頼性・連結信頼性を統合した道路整備等の便益評価手法を提案している。

信頼性解析・重要度の計算の効率化に関する研究

高山・大野ら⁵¹⁾⁻⁵⁵⁾は、災害時における道路網の連結性を対象として、トポロジー変換によりノードを集約し、ネットワークをいくつかの直列のサブネットワークに変換してノード間信頼度を近似計算する方法とツリー形成問題を簡略化するために部分グラフ集約化法を導入し、全点間信頼度を近似計算する解法を提案している。木俣ら⁵⁶⁾は、災害時の緊急路網確保の観点から、緊急車両の基地と需要地点との間の連結信頼度を有向グラフにおける SAT 信頼性(Source to All Terminal Reliability)で解析している。この方法はツリー列挙を基本とするため、計算量を削減するために Biconnected (2-連結) という概念でネットワーク分割する方法を提案している。柴瀬ら⁵⁷⁾は、最短経路のみの OD でダイクストラ法を用いてブール演算を用いずに近似計算を行っている。また、若林ら⁵⁸⁾⁻⁶⁰⁾や筆者ら⁶¹⁾のミニマルパス・カットセット等を用いた近似解法の研究などがある。

重要度評価に関する研究

重要度評価の目的は、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る。Birnbaum による確率重要度⁶²⁾や Henley and Kumamoto のクリティカリティ重要度⁶³⁾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場合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。ライフラインネットワークにおける重要度評価の研究としては、例えば大森ら⁶⁴⁾は、FTA(Fault Tree Analysis)を用いて導・送水ネットワークの信頼性解析と構造重要度、確率重要度を求めている。

重要度評価の種類については Van der Borst and Schoonakker⁶⁵⁾が、原子力発電所などの分野で用いられている PSA(確率論的安全評価)によるものを概観している。PSA の目的は、炉心溶融などの重大事故を引き起こすカット(パス)セットを発見するとともに、各々の構成要素においてそのような事故を防止するのに寄与度の大きいものを判定することである。嶋田⁶⁶⁾は、PSA を用いて原子力発電所におけるシステム・機器の重要度を5段階に色区分した一覧表と系統図を作成し、不具合の根本原因の機器さえ判明していれば、1つの不具合について数分で重要度の判定が可能だとしている。

道路網の重要度指標・脆弱性に関する研究

道路網において重要度指標を扱った論文の事例は、若林⁶⁷⁾の阪神淡路大震災前後のネットワーク評価、若林ら⁶⁸⁾の交通制御の観点から重要なリンクを発見する方法、Nicholson⁶⁹⁾の費用・リンク信頼度関数による方法、栄徳ら⁷⁰⁾の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などがある。最近では、中山⁷¹⁾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。また、筆者ら⁷²⁾⁻⁷⁵⁾の重要度指標の比較研究などがある。

重要度指標による計算は、ユニット(リンク信頼度)を確率的に推定できることが前提となる。しかし、大地震などの低頻度で発生し発災箇所の予測がつきにくい災害ではこの推定が難しくなる。そこで、リンク信頼度を用いずにネットワークの重要箇所を選定する試みも行われている。代表的なのは脆弱性評価である。リンク信頼度以外にネットワークの重要箇所を選定する研究として、佐々木ら⁷⁶⁾の地震からの復旧の際、迂回による所要時間の遅延と救援物質量からリンクの重要度を計算したものや、中島ら⁷⁷⁾の広域な被災における容量低下を考慮したリスク箇所の評価したもの、小林ら⁷⁸⁾の道路ネットワーク上のノードの脆弱性の基準として、固定ノードからの最短距離と、固定条件を付加したラプラシアン行列の最小固有値の固有ベクトル成分の関係を利用したものなどがある。

これらの研究から得られる主な課題として、(1)リンク信頼度推定方法が未確立であること、(2)道路網に適した重要度指標がどのようなものか不明確であること、(3)信頼性解析・重要度指標の計算の効率化が不十分であること、などが挙げられる。

1.3 本研究の概要

本研究の概要について述べる。1.1 で述べた通り、本研究の目的は耐災性のある道路網の効率的な構築である。

第2章では、他分野で発展してきた信頼性解析・重要度指標について整理し、道路網におけるそれぞれの考え方について述べる。また、道路網の信頼度改善のプロセスについて簡単に説明し、現状における課題を述べる。

第3章では、信頼性グラフ解析法を交通の特性を考慮して道路網に適用する方法論を紹介する。最初に信頼性グラフ解析法の基礎的事項を整理し、次にシステム信頼度の厳密値を求める諸方法を分類・整理する。ここでは、信頼性グラフ解析の中でもミニマルパス・カットに基づく解析法が道路網に適していることを示す。

第4章では、重要度指標を道路網に適用するための方法論について考察する。まず、従来から提案されている重要度指標について、その定義と特徴について整理する。次に、それらの指標と筆者らの提案する指標で比較分析を行う。その際、信頼度改善にかかる費用や費用対効果を仮定した関数を設定する。まずは、小規模のモデルネットワークについて比較を行い、総コスト・費用対効果・リンク改善の公平性の観点で筆者らの提案する指標が優っていることを示す。次に、高信頼度のシステムで用いられている重要度指標についても定義と特徴を整理し、前述した指標と比較を行う。最後に、リンク信頼度の値を用いない脆弱性の概念について取り上げ、重要度指標とどのような差異があるか簡単に比較する。

第5章では、信頼性グラフ解析での近似解法について取り上げ、道路網における計算には部分パスセット選択による方法が有効であることを示す。次に、信頼性の計算をモデルネットワークで行い、ネットワークの規模が拡大すると計算量・時間が指数的に増加するという結果を示すことで、近似解法の必要性を明らかにする。また、部分パスセット選択による近似解法で必要となるパス数についても検討し、重要度指標の順位の変動がなければ近似解として有効なことを示す。また、モデルネットワーク上で使用するパス数を変化させた際の重要度の実際の順位の変動についても明らかにする。

第6章では、第2～5章の結果を元に実際のネットワーク上でリンク信頼度を推定する。今回は、確率論で考えてもそれほど違和感のない内水災害の浸水深データを元にして、通行不能な浸水深を設定し、正規分布を仮定して降水量毎のリンク信頼度を推定した。また、重要度の計算を行うことで重要なリンクを選定し、また重要度指標間の結果の比較をする。ここでは、降水量に関わらず筆者らの提案した重要度指標の方が信頼度の低いリンクを重要であるとの結果が出たことを示す。

第7章では、本研究の成果を取りまとめる。

参考文献

- 1) <http://infra-archive311.jp/s-kushinoha.html> [最終閲覧日：2021年2月10日]
- 2) https://www.murc.jp/uploads/2015/02/201501_all.pdf [最終閲覧日：2021年2月10日]
- 3) https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/kihon.html [最終閲覧日：2021年2月10日]
- 4) Nicholson, A. Schmoeker, J. Bell, M.G.H. and Iida, Y: 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.
- 5) https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/chiiki/koto_shouhi/report_01.html [最終閲覧日：2021年2月10日]
- 6) <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/html/nc111310.html> [最終閲覧日：2021年2月10日]
- 7) http://www.road.or.jp/dl/pdf/stat_2001.pdf [最終閲覧日：2021年2月10日]
- 8) 飯田恭敬・北村隆一 編：交通工学，p.275，オーム社，平成20年.
- 9) 若林拓史・飯田恭敬：道路網信頼性解析法の開発とライフラインネットワークへの適用性の検討，土木計画学研究・講演集，13，pp.915-922，1990.
- 10) 菅野 孝彦・三宅 光一：ホメオスタシスのゆくえ ― 環境問題の読み解き，p.210，東海大学出版会，2004年.
- 11) 前掲10)，p.185
- 12) 増田悦佐：日本文明世界最強の秘密，pp.35-36，PHP研究所，2008年.
- 13) 木村尚三郎編：未来論 その過去・現在・未来，p.62，東京大学出版会，1990年.
- 14) 前掲10)，p.174
- 15) 横塚雅実・岩波光保・平島寛：インフラの維持管理におけるアセットマネジメント導入促進方策に関する提言，土木計画学研究・講演集，Vol.55，CD-ROM，2017.
- 16) <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h26/hakusho/h27/pdf/np202000.pdf> [最終閲覧日：2021年2月10日]
- 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：確率論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, pp.87-94, 2004.
- 19) 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.
- 20) 河合隼雄：中空構造―日本の深層―，p.35，中央公論社，1999年.
- 21) 外村直彦：八大文明，pp.220-221，朝日出版社，2008年.

- 22) <https://www.economist.com/science-and-technology/2011/10/15/transporter-of-delight> [最終閲覧日：2021年2月10日]
- 23) Panoussis, G.: Seismic Reliability of Lifeline Networks, Seismic Design Decision Analysis Report, No.15, MIT, No. MIT-CE R74-57, Dept. of Civil Engg., 1974.
- 24) Taleb-Agha, G.: Seismic Risk Analysis of Network, Seismic Design Decision Analysis Report, No.22, MIT, No. MIT-CE R75-43, Dept. of Civil Engg., 1975.
- 25) 篠塚正宣・小池 武：埋設ライフラインシステムの連結性能に関する地震危険度解析，土木学会論文報告集，No. 311, pp.13-24, 1981.
- 26) 篠塚正宣・小池 武：埋設ライフラインシステムの機能性能に関する地震危険度解析，土木学会論文報告集，No. 311, pp.25-35, 1981.
- 27) 柴田 碧・土屋雅彦：ライフラインの耐震性に関するシステム工学的研究，東大機械工学研究報告，第13巻，pp.39-40, 1978.
- 28) Fratta, L. and Montanari, U. G.: A Boolean Algebra Method for Computing the Terminal Reliability in a Communication Network, IEEE Trans. on Circuit Theory, Vol. CT-20, No.3, pp.203-211, 1973.
- 29) 山田善一・家村浩和・野田 茂・小笠原洋一：反復分割法による震災後の上水供給系の時変信頼性解析，土木学会論文報告集，No 326, pp.1-13, 1982.
- 30) 山田善一・野田 茂：地震時のライフライン系の信頼度と供給機能の解析，日本建築学会論文報告集，No 342, pp.12-21, 1984.
- 31) 岡田憲夫・若林善仁：配水管網ネットワークの信頼性に関する研究，土木学会第41回年次学術講演会概要集第4部，pp.105-106, 1986.
- 32) 岡田憲夫・河合 一・上野正和：マルコフ型水利システムの信頼性評価モデル，土木学会第43回年次学術講演会概要集第4部，pp.326-327, 1988.
- 33) 上野正和・多々納裕一・岡田憲夫：利水システムの渇水に対する信頼性の評価モデルに関する研究，土木学会第44回年次学術講演会概要集第4部，pp.516-517, 1989.
- 34) 多々納裕一・岡田憲夫・河合 一：残流域流出量を考慮した利水用貯留システムの信頼性評価モデル，土木計画学研究・論文集7，pp.99-106, 1989.
- 35) 小林正美：道路網・ネットワークシステムの信頼度解析法に関する研究，都市計画別冊，No. 15, pp.385-390, 1980.
- 36) 川上英二：道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法，土木学会論文報告集，No.327, pp.1-12, 1982.
- 37) 塚口博司・小川圭一・田中耕太・本郷伸和：歴史都市における道路機能障害の推定，歴史都市防災論文集，Vol.3，2009年6月.
- 38) 深井俊英・建部英博・林 寿郁：信頼性による道路網の評価について，第16・回日本道路会議特定課題論文集，pp.4-6, 1985.
- 39) 深井俊英・建部英博・林寿郁：異常気象時における道路網の信頼性評価手法について，

- 土木学会第 41 回年次学術講演会概要集第 4 部, pp.13-14, 1986.
- 40) 佐々木健・佐々木哲郎・田沢次雄：東北地方における道路網の信頼性評価, 第 16 回日本道路会議特定課題論文集, pp.7-9, 1985.
- 41) 岡田憲夫：信頼性からみた道路整備水準の分析・評価手法について, 第 16 回日本道路会議特定課題論文集, pp.28-30, 1985.
- 42) 岡田憲夫・後藤忠博・田中成尚：降雪期における道路ネットワーク・システムの信頼性評価法に関する研究, 土木学会第 41 回年次学術講演会概要集第 4 部, pp.15-16, 1986.
- 43) 青島縮次郎・片田敏孝・廣島康裕：農山村・都市間通勤における道路の信頼性評価に関する研究, 土木学会第 43 回年次学術講演会概要集第 4 部, pp.74-75, 1988.
- 44) 矢部浩規・佐藤馨一・田村 亨：代替機能からみた道路ネットワークの評価に関する研究, 土木学会第 43 回年次学術講演会概要集第 4 部, pp.240-241, 1988.
- 45) 加藤文教・門田博知・浜田信二：道路の信頼性評価の簡便法, 土木計画学研究・論文集 4, pp.181-188, 1986.
- 46) 黒田勝彦・瀬賀康浩・山下智志：都市高速道路ネットワークにおけるアヴェイラビリティについて, 土木計画学研究・講演集 11, pp.267-274, 1988.
- 47) 加藤哲平・内田 賢悦：時間価値・時間信頼性価値を内生化した便益評価手法に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.52, CD-ROM, 2015.
- 48) 内田賢悦・峪 龍一・山田雄太・加藤哲平：常時観測データを用いた道路ネットワークの移動時間分布の推定に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, CD-ROM, 2016.
- 49) 齋藤貴賢・橋本浩良・小林 寛・高宮 進：道路の旅行時間信頼性指標値の推計方法の構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, CD-ROM, 2016.
- 50) 大澤脩司・中山晶一郎・高山純一・藤生 慎：時間信頼性と連結信頼性を統合した道路評価手法の開発・改良-石川県道路ネットワークを対象として-, 土木計画学研究・講演集, Vol.53, CD-ROM, 2016.
- 51) 高山純一・大野 隆：トポロジー変換法を用いた 2 点間信頼度の近似解法, 土木学会第 43 回年次学術講演会概要集第 4 部, pp.340-341, 1988.
- 52) 高山純一・大野 隆・中島良光：部分グラフ集約化法を用いた全点間信頼度の近似解法, 土木学会第 43 回年次学術講演会概要集第 4 部, pp.342-343, 1988.
- 53) 高山純一・大野 隆：連結性能から見た道路網の信頼性評価法, 土木計画学研究・講演集 11, pp.251-258, 1988.
- 54) 高山純一・木口屋昌蔵：異常気象時における連結性能からみた道路網の信頼性評価, 土木学会第 44 回年次学術講演会概要集第 4 部, pp.194-195, 1989.
- 55) 高山純一：異常気象時における道路網の連結性能評価法, 土木計画学研究・講演集 12, pp.559-565, 1989.
- 56) 木俣 昇・石橋聡：地震時緊急路網のシステム信頼性評価に関する基礎的研究, 土木

- 計画学研究・論文集 6, pp.145-152, 1988.
- 57) 柴瀬憲治・中山晶一郎・高山 純一・藤生 慎：大地震における広域的な道路ネットワークの信頼性分析，土木計画学研究・講演集，Vol.51，CD-ROM，2015.
 - 58) 吉木 務・飯田恭敬・若林拓史：ミニマルパス・ミニマルカットによる道路ネットワークの信頼度の近似計算法について，土木学会第 42 回年次学術講演会概要集第 4 部，pp.142-143, 1989.
 - 59) 飯田恭敬・若林拓史・福島 博：道路網信頼性の近似解析方法の比較研究，土木学会論文集，No.407/IV-11, pp.107-116, 1989.
 - 60) Iida, Y. and Wakabayashi, H.: An Approximation Method of Terminal Reliability of Road Network Using Partial Minimal Path and Cut Sets, Transport Policy, Management and Technology Towards 2001 (Selected Proceedings of The Fifth World Conference on Transport Research), Vol.4, pp.2185-2198, Western Periodicals, Co., 1990.
 - 61) 前掲 19)
 - 62) Birnbaum, Z.W. (1969) On the Importance of Different Components in Multi-Component System. Multivariate Analysis II (P.R. Krishnaiah Ed.), Academic Press, New York.
 - 63) Henley, E.J. and Kumamoto, H.: Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, Inc., 418-436, 1981.
 - 64) 大森啓敬・今田俊彦・間山一典：FTA 手法を用いた導・送水ネットワークの安定性分析，土木学会第 43 回年次学術講演会概要集第 4 部，pp.76-77, 1988.
 - 65) 前掲 17)
 - 66) 嶋田善夫：確率論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, pp.87-94, 2004.
 - 67) 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.
 - 68) 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.
 - 69) Nicholson, A.: Optimising Network Terminal Reliability. Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability, CD-ROM, 2007.
 - 70) 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.
 - 71) 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.
 - 72) 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.
 - 73) Takahiro Nagae and Hiroshi Wakabayashi (2015). Differences in Network Reliability

Improvement by Several Importance Indices. Available online at www.sciencedirect.com Science Direct, 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.

- 74) 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.
- 75) 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.
- 76) 佐々木啓太・Wisinee Wisetjindawat・藤田 素弘：巨大地震発生後の愛知県におけるリンク重要度を考慮した道路復旧アルゴリズムの構築，土木計画学研究・講演集，Vol.56, CD-ROM, 2017.
- 77) 中島浩徳・本田利器：被災道路の容量低下を考慮した道路ネットワークのリスク評価に関する基礎的検討，土木計画学研究・講演集，Vol.55, CD-ROM, 2017.
- 78) 小林俊一・中山晶一郎・松井千里・若林桂汰：道路ネットワークのラプラシアン行列による脆弱性解析，土木計画学研究・講演集，Vol.55, CD-ROM, 2017.

第2章 信頼性解析・重要度指標の概要

2.1 概説

大規模システムの信頼性を解析する方法は、エレクトロニクス・機械システムなどの分野で信頼性工学あるいは安全工学として発達してきたものである。したがって、まず本論に入る前に、これらの分野で対象とされてきたシステムと、本研究で対象とする道路網とを比較してその特性の相違を明確にする。

そのため、第2節では、信頼性解析法として確立されている RGA と FTA の方法を取り上げ、その発展過程と解析法それぞれの概略を述べる。次に、これらの信頼性解析法が対象としてきたシステムと道路網との比較を行い、その相違点を整理する。さらに、RGA と FTA、どちらの方法が道路網信頼性解析に有用であるかを考察する。土木工学の分野では、防災関係研究者を中心にパイプライン、電力網、ガス・水道網等のライフラインネットワークを対象に信頼性研究が行われてきている。そこでこれらの信頼性解析と比較することにより、道路網の信頼性解析の特徴を明らかにする。

第3節では、道路網信頼性解析の考え方を、「耐災性のある道路網の効率的な構築」という本研究の目的に触れながら提示する。

第4節では、システムの信頼度を効率的に向上させるために用いる重要度指標について、目的や定義の概略を説明する。

第5節では、重要度指標について、航空・原子力等で用いられるものとその特徴を説明し、道路網に用いる際の留意点を整理する。また、ユニット(道路網ではリンク)の信頼度の計算が困難な場合、ネットワーク形状から脆弱箇所を発見する脆弱性という概念についても説明する。

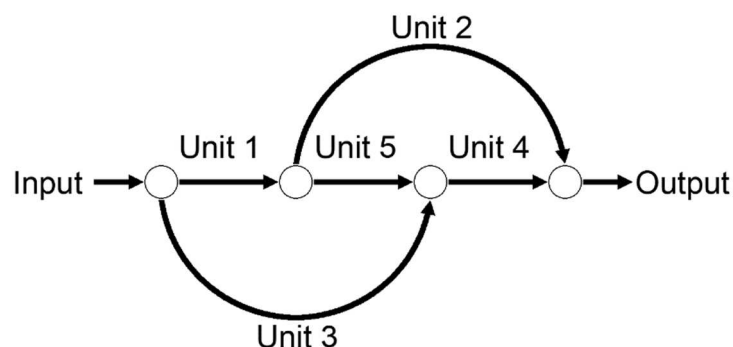
第6節では、現状の道路網における信頼度改善のプロセスと課題について整理し、本研究の焦点とする部分について明らかにする。

2.2 一般的な信頼性解析

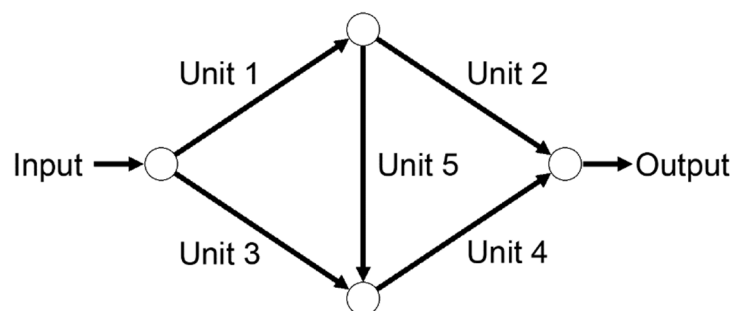
信頼性工学における信頼性解析法：RGA と FTA

信頼性工学の数学モデルの端緒は、ドイツの V1 ロケット設計時に開かれ、ここで数学者 Robert Lusser は、直列構成されたシステムの信頼度が、各コンポーネントの信頼度の積で表現されるという、今日でも用いられている乗積則(後述の式 (3.3.2))を提案している¹⁾。第二次世界大戦後は、信頼性研究はアメリカにおいて組織的に発展し、信

頼性グラフ解析(Reliability Graph Analysis, RGA)として確立された。信頼性グラフ解析では、システムの信頼度とシステムを構成するユニットの信頼度との関連を、信頼性グラフあるいは信頼性ブロック図(Reliability Block Diagram)と呼ばれる有向グラフを利用し、そのインプット・アウトプット 2 点間の連結性を解析する。この RGA の基礎となっている理論は、コヒーレントシステム理論(Coherent System Theory)またはコヒーレント構造理論(Coherent Structure Theory)と呼ばれているものである²⁾⁴⁾。信頼性グラフの一例を図 2-2-1 に示す。信頼性グラフによる表現では、システム全体の信頼度は、図上の矢印の向きにたどった時、インプットとアウトプットを結ぶ少なくとも 1 つの通路の中に含まれるすべてのユニット (パスセットあるいはタイセットと呼ぶ) が所定の機能どおりに働く確率として定義される⁴⁾。図 2-2-1 の例では、ユニットの組み合わせ $\{1,2\}$, $\{1,5,4\}$, $\{3,4\}$ のうちいずれかが同時に機能する時、システム全体が機能することを表す。このように、RGA ではグラフ理論を用いて信頼性を表現する。道路網もグラフ理論を用いて記述できるため、信頼性グラフ解析と道路網信頼性解析とは理論的取り扱いにおいて多くの共通点を有する。



(a) 信頼性グラフの例 (その 1)



(b) 信頼性グラフの例 (その 2)

図 2-2-1 信頼性グラフの例

RGA が、おもに電気・機械工学関係の信頼性技術者によって開発されたのに対し、フォールトツリー解析(Fault Tree Analysis, FTA)は、おもに安全工学技術者によって開発されてきた方法である。FTA は、1961 年ベル電話研究所にてミニットマンミサイル打上げ制御システムの安全性解析に用いられたのが最初であり、以後は航空・宇宙・原子力の分野や化学プラント等の大規模システムの安全性解析を行う方法として推進され、大きな効果をあげるようになった⁴⁾。

FTA では、フォールトツリー図(FT 図)をもとに、頂上事象(Top Event)と呼ばれるシステムの特定の故障と、基本事象と呼ばれる原因との関連をブール論理によって解析する(図 2-2-2)。この例では、記号①～⑤は、図 2-2-2 でのユニット 1～5 がそれぞれ故障するという基本事象を表している。したがって、図 2-2-2 の頂上事象(Top Event)は図 2-2-1 のシステム全体が故障するという事象に対応しており、図 2-2-1 の双対な表現となっている。

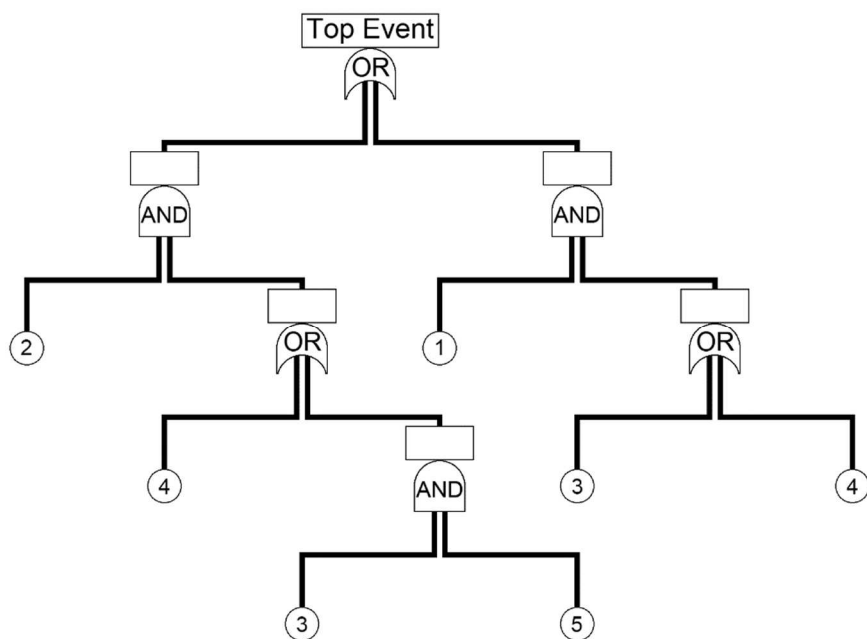


図 2-2-2 フォールトツリー図の例

ライフラインネットワークにおける信頼性解析⁵⁾

土木工学の分野では、地震時のライフライン等を対象に信頼性解析が早くから研究されており、相当な蓄積がされている。ここでは、ライフラインネットワーク（電力・通信網やパイプライン、ガス・水道管網等）と道路ネットワークとの信頼性解析を比較・考察する。なお、ライフラインではエレクトロニクス・機械システムでの信頼性解析と以下の点で類似している。すなわち、ネットワーク構成要素の損傷は独立であると考えられる点、またある経路が不通になっても相当な迂回ルートが許容される点である。一方、道路網との共通点として、要求される解精度がそれほど高くない点、多点間の信頼度を同時に考慮する必要がある点が挙げられる。

ライフラインネットワークの信頼性解析と道路ネットワークの信頼性解析との主な相違点は以下の通りであると考えられる。

(1) 前項での比較と同様、ここでも経路の選択問題が存在する。ライフラインネットワーク、特に電力網や通信ネットワークでは、本来の経路が利用不能となった場合は相当な迂回経路でも許容される。例えば、電話回線は空いている回線があれば、それが相当な迂回経路であっても利用されることが日常的である。しかし、交通の場合は、ある経路が不通になっても長距離の迂回はせず、迂回をするにしてもその経路は限定される性質がある。また、リンクに容量がある点では共通であるが、経路選択が利用者の意志に委ねられているため交通混雑や迂回交通が発生したり、利用者はユーザー均衡という個別最適原理で行動するため、システム最適を実現するための制御が困難であるという問題がある。したがって、ライフラインネットワークより信頼性解析が複雑となる。

(2) ライフラインネットワークでは、輸送物の供給点および需要点が一般に複数であるから、多点間の信頼性を考察の対象とする必要がある。この多点間の信頼性を問題とする点で、ライフラインネットワークの信頼性解析は、信頼性工学での信頼性解析より道路網の信頼性解析に類似した性質を有しているといえる。しかし、ライフラインネットワークでは、ノードが需要ノードと供給ノードとに明確に分離されている点で交通ネットワークと異なっている（ただし、通信ネットワークは双方向通信が行われる）。さらに、供給ノードと需要ノードとの間で輸送量の連続条件が成立していればよい。これらは例えば、電力網や水道網で、一対多（供給点对需要点）の連結性を解析する場合を考えれば理解できる。これに対し、道路網では OD 交通量が存在する点でこれらのシステムと大きく相違している。すなわち、道路網では、交通の発生と集中が同一ノードで同時に行われ、OD 交通量それぞれに対し起終点が存在するため、OD 毎に信頼性を考慮しなければならない点に大きな相違点が存在する。

2.3 道路網における信頼性解析の考え方

道路網信頼性解析では、交通工学的諸特性に合致した評価解析法の確立が重要となる。前節で考察したように、道路網の信頼性解析が他の一般システムと異なる主要な点は、次の3点に要約される。

- (1) 交通の経路を考慮する必要がある。
- (2) 多数の OD ペアの信頼性を対象とする必要がある。
- (3) 要求される精度はそれほど高くない。

信頼性解析方法は、平常時と災害時で基礎としては同一であり、その意味では本質的に変わりはない。しかし、災害時には、出発地と目的地とが連結されているかどうかが第一の関心事であり、交通も迂回を行う。また、交通現象も平常時と大きく異なるであろうから、OD パターンも大きく変化すると考えられる。一方、道路網の日常的なサービスレベルを評価する場合には、平常時の交通挙動をベースとすることが必要で、そのためには「経路選択行動に基づいた信頼性評価」が必要である。このため、(1)で述べた経路の考慮の必要性は重要である。

次に、(2)で述べた OD 間の信頼性解析への対処法を述べる。道路網の信頼性解析の研究では、多点間信頼度をグラフ理論でいうツリー形成を基礎に論じたものが存在する。これは、ノード間がトリップ長に関係なく、単に連結されておればよいという考え方である。この考え方は、通信システム等では有効な考え方であるが、交通は経路を考慮するので、(1)でも述べたことから不適切であると考えられる。したがって、道路網の信頼性解析は、日常的な経路選択行動に基づいて2点間信頼度を基本に考えることが重要となる。そして、多点間の信頼性解析は、多数の2点間信頼度を総合的に捉えることで対処が可能である。いいかえれば、多点間信頼度をツリー構造の連結信頼度と捉えるのではなく、システム全体での信頼性評価と捉えて解析することが道路網の信頼性解析では重要であると考えられる。このことから、2点間信頼度をできるだけ簡便に求める方法の開発が肝要である。

(3)より、道路網の場合には高精度の信頼性解析は特に要求されていないため、他のシステムよりも大胆な解析を行える余地があるといえる。第3章でも述べるように、信頼度の厳密値を求めるためには極めて多量の計算が必要となる。しかし、道路計画等での実用上の精度を重視するならば、大量の時間と労力を使って厳密な計算手法を用いる意義は少なく、信頼度の厳密値の獲得にはこだわることはないと考えられる。したがって、多少精度を犠牲にしても、簡便な方法で有効な近似値を算出することができれば、その方が利用価値が高いと考えられる。このことは、2点間信頼度をできるだけ簡単に求めようとする(2)の要求とも合致している。

これらの要件を考慮した道路網における信頼性として、代表的なものが2つ挙げられ

る．それが以下に述べる旅行時間信頼性と連結信頼性である．

2.3.1 旅行時間信頼性⁶⁾

旅行時間信頼性(Travel Time Reliability)とは、道路上の所要時間を分布的に取り扱うことで所要時間を評価するものである．例えば、「ある決められた時間内にノードペア間を移動可能な確率」と定義され、定時性を評価する指標となる．旅行時間信頼性は経路ベースで定義され、ノードペア間・ネットワーク全体に拡張する場合は経路選択確率の考慮・OD 需要による重み付けなどの工夫が必要である．

2.3.2 連結信頼性

連結信頼性(Connectivity Reliability)は、「ネットワークの構成要素がある確率を持って途絶する場合、あるノードペア間が連結されている確率」と定義される⁷⁾．ここでいう「連結されている確率」というのは、ノードペアの間のリンクを走行可能な確率である．なお、より広い連結性の定義として、あるサービス水準以上の走行可能な確率として連結信頼性を定義することも可能である．

基本的には、連結信頼度はノードペア間・リンクに対して定義される．ネットワークレベルで連結信頼性を考える場合は、ネットワークの OD ペア集合がわかっている場合には全 OD ペア間で移動可能な確率としてネットワーク信頼度を定義できる．これは構造関数ということもある(構造関数の計算については、第 3 章で詳しく述べる)．OD ペア集合を特定できない場合は、全リンクが同時に走行可能な確率をネットワーク信頼度とすることがある⁸⁾．

2.3.3 本研究における道路網の信頼性解析

以上述べたことを基に、本研究での道路網信頼性解析の基本的考え方を以下に述べる．

- (1) リンク信頼度を『規定の時点で機能を維持している確率または、ある期間中に機能を維持する時間の割合』、すなわち信頼性工学というアベイラビリティ⁹⁾と定義する．
- (2) 道路網の信頼度を、対象とするノード間があるサービス水準以上で連結される確率と定義する．
- (3) 道路網を一つのシステムと考え、ネットワークを構成するリンクをユニットと考えて、ネットワーク形状を与件としたときのシステム信頼度の解析法を研究する．
- (4) 道路網は定常な状態を想定し、渋滞等の時間的推移は考慮しない．つまり、ある

故障経路の他の経路への影響，および，道路機能の故障から修復への変化は考慮しない．

- (5) 本研究は，災害に対するネットワークの強靱化を取り扱うので，主として連結信頼性について取り上げ，旅行時間信頼性については対象外とする．
- (6) 道路網における交通の諸特性を考慮して，効率的でかつ解精度も保証される道路網信頼性解析法の開発とその解法を解明する．

2.4 一般的な重要度指標

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¹⁰⁾やクリティカリティ重要度¹¹⁾，FV, RAW 指標¹²⁾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場合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．

重要度評価の種類については Van der Borst and Schoonakker (2001)¹³⁾が，原子力発電所などの分野で用いられている PSA(確率論的安全評価)によるものを概観している．PSAの目的は，炉心溶融などの重大事故を引き起こすカット(パス)セットを発見するとともに，各々の構成要素においてそのような事故を防止するのに寄与度の大きいものを判定することである．原子力の分野で最近よく用いられているのは FV と RAW である¹⁴⁾．

個々の重要度指標の計算方法や特性については，第 4 章で詳しく述べる．

2.5 道路網における重要度指標の考え方

本研究では道路網の連結信頼性の重要度を，文献 15)における『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』という記述に準じて，『リンク信頼度を向上させた場合のノード間信頼度への寄与度』と定義する．

2.5.1 重要度指標

確率重要度(Birnbaum's Reliability Importance)¹⁶⁾は，以下に定義される測度であり，

$$RI_a = \frac{\partial R_{AB}(\mathbf{r})}{\partial r_a}, \quad (2.5.1)$$

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．ここで $\mathbf{R}(\mathbf{r})$ はノード AB 間のノード間信頼度， a はリンク番号， r_a はリンク信頼度を表している．確率重要度

には $0 \leq RI_a \leq 1$ という性質があり、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。

クリティカルリティ重要度 CI (Criticality Importance)¹⁷⁾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、以下の式で定義される。

$$\begin{aligned}
 CI_a &= \lim_{\Delta r_a \rightarrow 0} \left\{ \frac{\Delta R_{AB}(\mathbf{r})/R_{AB}(\mathbf{r})}{\Delta r_a/r_a} \right\} \\
 &= \frac{\partial R_{AB}(\mathbf{r})}{\partial r_a} \times \frac{r_a}{R_{AB}(\mathbf{r})} \\
 &= RI_a \times \frac{r_a}{R_{AB}(\mathbf{r})}.
 \end{aligned}
 \tag{2.5.2}$$

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。

- (1) CI は、直列ネットワーク(図 2-5-1)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。
- (2) RI , CI ともに、並列ネットワーク(図 2-5-2)において信頼度の低いリンクが放置される。
- (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されているのが、第4章で述べる改良型クリティカルリティ重要度(ICI)である¹⁸⁾。本研究では、これらの指標の比較・分析を行うことで、道路網に適した重要度を探ることとする。

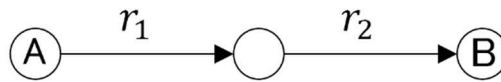


図 2-5-1 直列ネットワーク

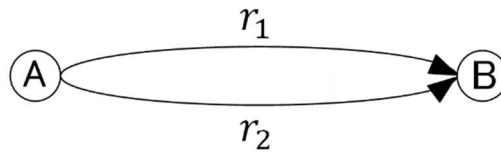


図 2-5-2 並列ネットワーク

2.5.2 脆弱性

ここまで紹介したような、システム中の重要なユニットを探る重要度指標の他に、「脆弱性」と呼ばれるネットワーク信頼性改善に用いられる概念を略述する。

重要度指標においては、リンク(ユニット)の信頼度を確率変数で与えて重要度を計算していたが、道路ネットワークではそもそもリンク信頼度をどのように推定すべきかは未解決の問題である。例えば、地震の災害の被害想定でリンク信頼度を事前に推定することは困難であるといわざるを得ない。そこで、リンク信頼度を確率変数で考えずにネットワーク・リンクの重要箇所を評価する方法として脆弱性という概念が考えられた。

現状で、脆弱性の概念が一つに定まっているわけではないが、代表的なものとして Taylor¹⁹⁾の脆弱性研究が対象とするものとして、「疎なネットワークでは、非常に小さい確率で生じるが、その影響が非常に大きい事象を取り扱う、ネットワーク上の構造上の脆弱さが重要であるとし、特に欠損等が発生すると甚大な影響が出るクリティカルなリンクがどこであるのかが問題」としている。また、脆弱なノードとは、少数のリンクが欠損した場合、深刻な接続性の低下が生じるノード、臨界リンク(クリティカル・リンク)は、欠損した場合に深刻な接続性の低下を引き起こすリンクと定義した。

道路ネットワークにおいて脆弱性を用いて接続性を評価したものに、瀬戸ら²⁰⁾の研究がある。これは、N-edge-connected network の概念²¹⁾を援用したものである。N-edge-connected network とは、すべての 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てもすべての OD ペアの連結が保たれるネットワークを表す。したがって、最も不都合な 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になり、最悪のケースを想定する脆弱性解析と整合する。ただし、道路ネットワークにおいて長大すぎる迂回路は非現実的なため、経路本数算定の際には上限を設定する。

脆弱性の概念は、確率を考えずにネットワークの脆弱さや脆弱な箇所を考えるのがモデリング上の特徴²²⁾といえる。

重要度指標と脆弱性の比較については、第 4 章で詳しく述べる。

2.6 道路網における信頼度改善のプロセスと課題

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. 重要度評価を用いてリンクの重要度を算出

手順 4. 重要度の高いリンクの信頼度を向上させる

手順 5. 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。本研究では、第 4 章、第 5 章でリンク信頼度を与件としたモデルネットワークで試算を行った後に、第 6 章で実際のネットワークで特定の災害を想定したリンク信頼度の計算を行う。手順 3.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 4.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を述べる。

- (1) 確率重要度 RI 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) 重要度指標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、本研究ではそれを取り上げる。

(3)については、従来の重要度評価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²³⁾。

本研究では、(2), (3)の問題に対し、数学的合理性のある解と公平性満足のある解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、簡単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。

参考文献

- 1) Henley, E. J. and Kumamoto, H.: Reliability Engineering and Risk Assessment, pp.1-2, Prentice-Hall, Inc., 1981.
- 2) Barlow, R. E. and Proschan, F.: Mathematical Theory of Reliability, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 3) Barlow, R. E. and Proschan, F.: Statistical Theory of Reliability and Life Testing, Holt Rinehart and Winston, Inc., 1975.
- 4) 井上紘一: FTA の基礎理論と数値的解析法, 井上威恭監修, 総合安全工学研究所編『FTA 安全工学』, 第 2 章, pp.69-70, 日刊工業新聞社, 昭和 54 年.
- 5) 若林拓: 道路網の信頼性解析に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, pp.27-28, 1989.
- 6) 飯田恭敬・北村隆一 編: 交通工学, p.275, オーム社, 平成 20 年.
- 7) 若林拓史・飯田恭敬: 道路網信頼性解析法の開発とライフラインネットワークへの適用性の検討, 土木計画学研究・講演集, 13, pp.915-922, 1990.
- 8) 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.
- 9) 阿部俊一: システム信頼性解析法, p.6, 日科技連, 1987.
- 10) Birnbaum, Z.W. (1969) On the Importance of Different Components in Multi-Component System. Multivariate Analysis II (P.R. Krishnaiah Ed.), Academic Press, New York.
- 11) Henley, E.J. and Kumamoto, H.: Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice-Hall, Inc., 418-436, 1981.
- 12) 嶋田善夫: 確率論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, pp.87-94, 2004.
- 13) 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
- 14) 前掲 12)
- 15) 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.
- 16) 前掲 10)
- 17) 前掲 11)
- 18) 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.
- 19) Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C. and D'Este, G.M.: Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks, Network and Spatial Economics, Vol.6, pp. 267-291, 2006.
- 20) 瀬戸裕美子・倉内文孝・宇野伸宏: 脆弱性の概念を用いた道路網接続性評価に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, CD-ROM, 2007.

- 21) Grötschel, M., Monma, C.L. and Stoer, M.: Design of survival networks, Ball, M.O. et al. eds., Network Models, Elsevier, Amsterdam, pp. 617-672, 1995.
- 22) 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.
- 23) 前掲 18)

第3章 信頼性グラフ解析法の道路網への適用

3.1 概説

この章では、道路網のノード間信頼性解析に、信頼性グラフ解析法を適用する方法を考察する。

信頼性グラフ解析(Reliability Graph Analysis, RGA)とは、システム信頼度とシステムを構成するユニット信頼度との関連を、信頼性グラフと呼ばれる有向グラフを利用し、そのインプット・アウトプット2点間の連結信頼度を解析する方法である。一方、道路網がリンクとノードのみから構成されるとし、信頼度はリンクに対してのみ考えるものとする、道路網もグラフ理論を用いて記述することができる。したがって、信頼性グラフと道路網とは理論的取り扱いにおいて多くの共通点を有するのが特徴である。

本章では、信頼性グラフ解析法を道路網の信頼性解析に適用する方法を考察する。

第2節では、信頼性グラフ解析に関する基礎的理論の概要を、構造関数およびその構成法を中心に整理する。ここでは、構造関数の構成法として、直列・並列システムの組み合わせによる方法、分解法による方法、ミニマルパス・カットによる方法等を紹介する。そして、道路網がネットワーク表現されていることから、そのオリジナルな表現を直接利用できるミニマルパス・カットによる方法が適切であることを示す。

第3節では、システム信頼度の厳密値の計算法を整理する。ここでは、従来から提案されてきた種々の計算法を紹介し、その利害得失を分析、道路網への適用性を考察する。さらに、システムが大規模になると、いずれの方法も計算時間や記憶容量の制約から、計算実行が困難となることを示す。

3.2 システムの信頼性と信頼性グラフ解析

3.2.1 構造関数と信頼度

信頼性とは、系・機器・部品などの、機能の時間的安定性を表す度合いまたは性質と定義される。また、信頼度とは、系・機器・部品などが、規定の条件の下で意図する期間中、規定の機能を遂行する確率と定義される。信頼度の定義は、製品の信頼性を定量化して確率で表したものである¹⁾。

信頼性解析では、比較的多数の要素(部品)により構成される機器・装置を総称してシステムと呼び、構成要素をユニットと呼ぶ。システム・ユニットには、機能・故障の2状態のみが定められているとする。ユニット a に対し、二値変数 x_a を次のように定義す

る。すなわち,

$$x_a = \begin{cases} 1, \text{ユニット} a \text{が機能しているとき,} \\ 0, \text{ユニット} a \text{が故障しているとき.} \end{cases} \quad (3.2.1)$$

ユニットの数を l として (l をシステムのオーダーという), システムの状態をベクトル,

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_l), \quad (3.2.2)$$

で表す。このベクトルをシステムの状態ベクトルという。ユニットと同様に, システムの状態 ϕ は $\mathbf{x}$ を用いて次のように定義できる。

$$\phi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, \text{システムが機能しているとき,} \\ 0, \text{システムが故障しているとき.} \end{cases} \quad (3.2.3)$$

式(3.2.3)で定義した関数 $\phi(\mathbf{x})$ を, 構造関数と呼ぶ。構造関数は, システムの構造によりその関数形が決まり, システムの機能・故障状態について, 各ユニットの機能・故障状態を表す状態ベクトルを用いて知ることができる。なお, 構造関数 $\phi(\mathbf{x})$ が,

- (i) 各ユニット $a (a = 1, \dots, l)$ が, $\phi(\mathbf{x})$ に関連している,
- (ii) $\phi(\mathbf{x})$ は各変数 $x_a (a = 1, \dots, l)$ に関して非減少である,

性質を持つシステムを, コヒーレント・システムといい²⁾, 以下では特に断りのない限り, システムとはコヒーレント・システムを指す。

システムの信頼度は次のように求める。構造関数が $\phi(\mathbf{x})$ であるシステムの信頼度を R , 各ユニットの信頼度を r_a で表す。各ユニットに対し確率変数 X_a を,

$$X_a = \begin{cases} 1, \text{ユニット} a \text{が機能しているとき,} \\ 0, \text{ユニット} a \text{が故障しているとき.} \end{cases} \quad (3.2.4)$$

で定義すると,

$$P_r\{X_a = 1\} = r_a, \quad (3.2.5)$$

$$P_r\{X_a = 0\} = 1 - r_a, \quad (3.2.6)$$

であり,

$$E[X_a] = 1 \times P_r\{X_a = 1\} + 0 \times P_r\{X_a = 0\} = r_a, \quad (3.2.7)$$

である。確率変数 X_a からなるベクトル,

$$\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_l), \quad (3.2.8)$$

を定義すると, システムの機能・故障は, 構造関数 $\phi(\mathbf{x})$ を用いて, 確率変数 $\phi(\mathbf{X})$ で表

され、システム信頼度は、

$$R = P_r\{\emptyset(\mathbf{X}) = 1\} = E[\emptyset(\mathbf{X})], \quad (3.2.9)$$

で与えられる。

以上は信頼性グラフ解析における定義や表記法である。これを交通ネットワークに適用するには、ユニットをネットワークのリンクに対応させ、システムの2点間の通行可能性に対応させる。このようにすることで、交通ネットワークの信頼性解析を信頼性グラフ解析と同等に扱うことができる。

3.2.2 構造関数の構成法

システムの信頼性を求めるには、構造関数が必要である。ここでは、構造関数の構成法について述べる。

(1) 直列・並列システムの組み合わせによる方法

システムが図 3-2-1, 図 3-2-2 のような直列システム・並列システムの場合、構造関数は以下の式で与えられる。

$$\text{直列システムの場合, } \emptyset(\mathbf{x}) = \prod_{a=1}^l x_a, \quad (3.2.10)$$

$$\text{並列システムの場合, } \emptyset(\mathbf{x}) = \coprod_{a=1}^l x_a \equiv 1 - \prod_{a=1}^l (1 - x_a). \quad (3.2.11)$$

ここに演算記号 $\prod$, $\coprod$ は、それぞれ論理積(AND 結合), 論理和(OR 結合)を表している。そして、システムが直列・並列の組み合わせで表現できる場合には、構造関数は式(3.2.10), (3.2.11)の組み合わせで構成できる。また、システム内のいくつかのユニットの組が1つのコヒーレント・システムを形成するとみなせる、この組をモジュールといい、システムがモジュールの直列・並列の組み合わせで表現できる場合にも、構造関数は同じように構成できる³⁾。しかし、システムの構造が、直列・並列の組み合わせで表現できるのは特殊な場合であり、構造関数は、一般的には以下の方法で求められる。



図 3-2-1 直列システムのモデル

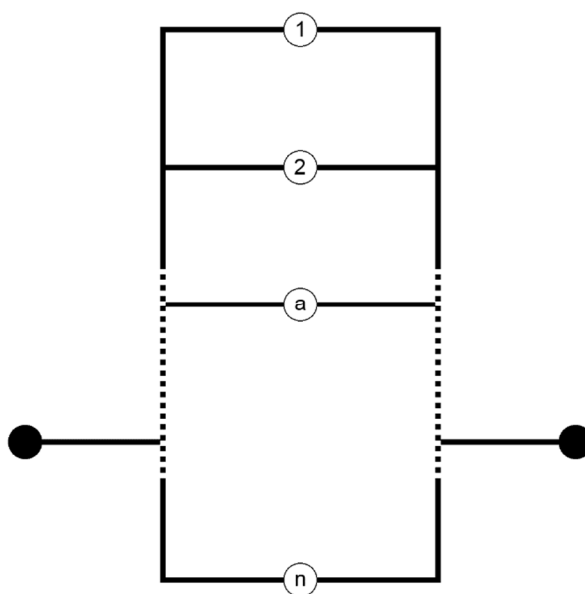


図 3-2-2 並列システムのモデル

(2) 分解法

次の恒等式を利用する.

$$\emptyset(\mathbf{x}) = x_a \emptyset(1_a, \mathbf{x}) + (1 - x_a) \emptyset(0_a, \mathbf{x}). \quad (3.2.12)$$

$\emptyset(1_a, \mathbf{x})$, $\emptyset(0_a, \mathbf{x})$ はそれぞれ, ユニット a が機能しているとしたシステム, 故障しているとしたシステムの構造関数を表している. この式によりオーダー l の構造関数を, オーダー $(l-1)$ の構造関数で表現することができる. 式(3.2.12)を繰り返し適用することで, 直列・並列システムのように構造関数が容易に計算できる, より小さな規模のシステムが得られる.

例えば, 図 3-2-3 のブリッジ型システムでは, まず $a = 5$ とすると, $\emptyset(1_5, \mathbf{x})$ に対応するシステムは図 3-2-4 のようになる. これは直並列型システムであるから,

$$\emptyset(1_5, \mathbf{x}) = \{1 - (1 - x_1)(1 - x_3)\}\{1 - (1 - x_2)(1 - x_4)\}, \quad (3.2.13)$$

となる. 同様に $\emptyset(0_5, \mathbf{x})$ に対応するシステムは図 3-2-5 のようになる. これは, 並直列型システムであるから,

$$\emptyset(0_5, \mathbf{x}) = 1 - (1 - x_1 x_2)(1 - x_3 x_4), \quad (3.2.14)$$

となる. したがって, 式(3.2.12)~(3.2.14)より,

$$\begin{aligned} \emptyset(\mathbf{x}) = & x_5 \{1 - (1 - x_1)(1 - x_3)\}\{1 - (1 - x_2)(1 - x_4)\} \\ & + (1 - x_5) \{1 - (1 - x_1 x_2)(1 - x_3 x_4)\}, \end{aligned} \quad (3.2.15)$$

となる. このように図 3-2-3 のシステムは, 直列—並列構造に等価交換され, 構造関数の構築が容易となる.

分解法は, システムが直列—並列構造に分解可能な場合, 著しく効果があるといえる. しかし, 複雑なシステムでは, 分解法を繰り返し適用する必要があることと, システムの構造を等価変換させるための機械的処理が困難なことなどが問題点として挙げられる.

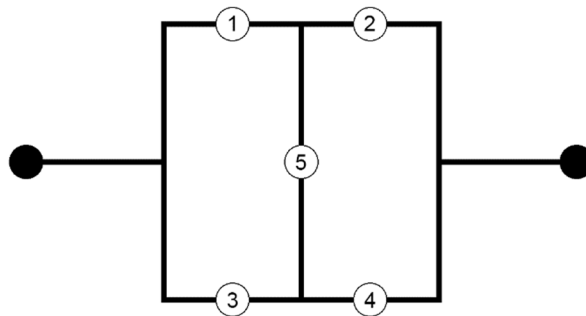


図 3-2-3 ブリッジ型システム

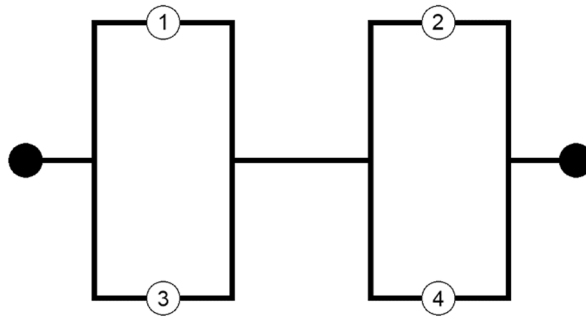


図 3-2-4 $\emptyset(1_5, x)$ に対応するシステム

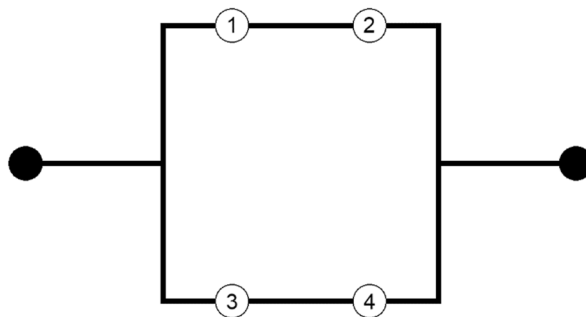


図 3-2-5 $\emptyset(0_5, x)$ に対応するシステム

(3) ミニマルパス・ミニマルカットによる方法

最初に、ミニマルパス集合とミニマルカット集合を定義する⁴⁾。ミニマルパス集合とは、システムの入力から出力への経路を構成するユニットのうち、どれか1つでも故障するとシステムが故障となり、すべてのユニットが機能してはじめてシステムの機能を保証するような部分集合のことである。これは直列型システムに対応する。ミニマルカット集合とは、それに属するすべてのユニットが故障すると確実にシステムが故障し、そのうちのユニットの1つでも機能すると、他のすべてのユニットが故障していても必ずしもシステムの故障にはならない部分集合のことである。これは並列型システムに対応する。

例えば、図 3-2-6 のブリッジ型ネットワークでは、ノードペア(A,B)間のミニマルパスは、 $\{1,2\}$, $\{3,4\}$, $\{1,5,4\}$, $\{3,5,2\}$ であり、ミニマルカットは、 $\{1,3\}$, $\{2,4\}$, $\{1,5,4\}$, $\{2,5,3\}$ である。これらを用いてシステムを表現したものが図 3-2-7 である。

ここでシステムを構成するミニマルパス、ミニマルカットの総数をそれぞれ p, k とし、ミニマルパスを $P_1, P_2, \dots, P_p$, ミニマルカットを $K_1, K_2, \dots, K_k$ で表現する。

ミニマルパス P_s の構造関数 $\alpha_s(x)$ は直列システムであるから、

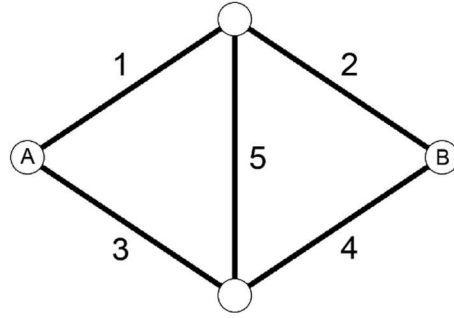


図 3-2-6 ブリッジ型ネットワーク

$$\alpha_s(\mathbf{x}) = \prod_{a \in P_s} x_a, \quad (3.2.16)$$

と表記でき，システムはミニマルパス $P_1, P_2, \dots, P_p$ の並列システムなので，システムの構造関数は，

$$\emptyset(\mathbf{x}) = \prod_{s=1}^p \alpha_s(\mathbf{x}) = \prod_{s=1}^p \prod_{a \in P_s} x_a \equiv 1 - \prod_{s=1}^p \left(1 - \prod_{a \in P_s} x_a \right), \quad (3.2.17)$$

となる．

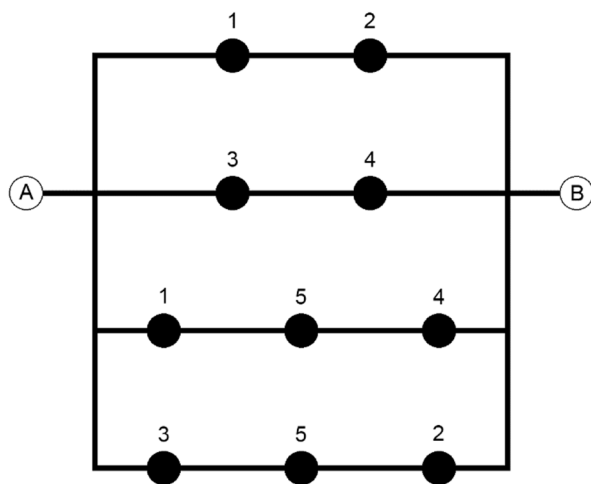
同様に，ミニマルカット K_s の構造関数 $\beta_s(\mathbf{x})$ は並列システムであるから，

$$\beta_s(\mathbf{x}) = \prod_{a \in K_s} x_a \equiv \left\{ 1 - \prod_{a \in K_s} (1 - x_a) \right\}, \quad (3.2.18)$$

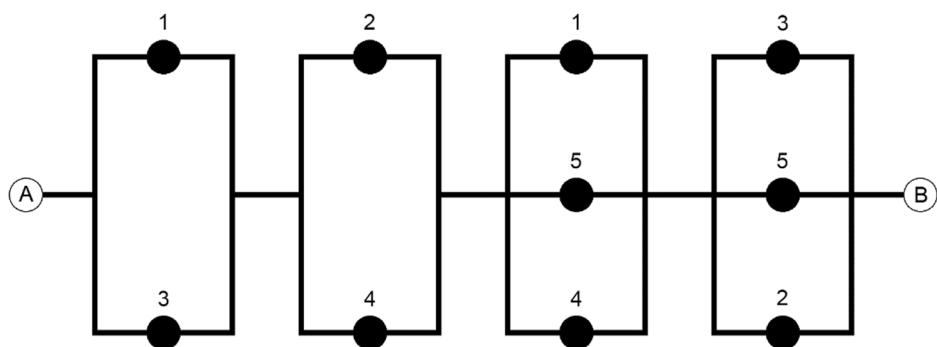
と表記でき，システムはミニマルカット $K_1, K_2, \dots, K_k$ の直列システムなので，システムの構造関数は，

$$\emptyset(\mathbf{x}) = \prod_{s=1}^k \beta_s(\mathbf{x}) = \prod_{s=1}^k \prod_{a \in K_s} x_a \equiv \prod_{s=1}^k \left\{ 1 - \prod_{a \in K_s} (1 - x_a) \right\}. \quad (3.2.19)$$

この方法では，ミニマルパス・カットの探索を必要とするが，(1)，(2)のようなシステムの等価交換が不要であり，オリジナルのシステムの構造をそのまま利用できる利点がある．道路網では，多数の OD ペアを対象とする必要があるので，ネットワーク形状を OD ペア毎に等価交換する必要がなく，ミニマルパス・ミニマルカットを用いたこの方法が適切である．なお，本論文ではミニマルパス・カットをパス・カットと略記することがある．



(a) ミニマルパスによる表現



(b) ミニマルカットによる表現

図 3-2-7 ミニマルパス・カットによるシステムの表現

3.3 システム信頼度の厳密値の計算法

3.2.1 において，信頼度 R は，構造関数の期待値，すなわち，

$$R = E[\phi(X)], \quad (3.3.1)$$

で与えられることを示した．本節では信頼度の具体的な計算法を，構造関数を使用しない方法とともに述べ，あわせて道路網での利用可能性を考察する．

(1) 直列・並列システムの組み合わせによる方法

システムが直列・並列システムの場合，式(3.2.10)，(3.2.11)と同様にシステム信頼度は以下のように与えられる．

l ユニット・直列システムは,

$$R(\mathbf{r}) = E \left[\prod_{a=1}^l X_a \right] = \prod_{a=1}^l r_a, \quad (3.3.2)$$

l ユニット・並列システムは,

$$R(\mathbf{r}) = E \left[\prod_{a=1}^l (1 - X_a) \right] = 1 - \prod_{a=1}^l (1 - r_a) = \prod_{a=1}^l r_a, \quad (3.3.3)$$

と表記できる．システムが直列・並列の組み合わせで表現される場合には，式(3.3.2)，(3.3.3)を組み合わせでシステムの信頼度を求めることができる．

この方法は簡単であるが，欠点として直列—並列でないシステムには適用不可であること， 3-2-7 のように同一要素が信頼性グラフの中に 2 回以上出現すると誤った結果を与えることが挙げられる⁵⁾．道路網では，対象とするノード間が極めて単純な形状でない限り，この方法は適用できない．

(2) 分解法と事象空間法

これはベイズの定理，すなわち，

$$P_r(A) = P_r(A|B)P_r(B) + P_r(A|\bar{B})P_r(\bar{B}) \quad (3.3.4)$$

を利用した方法で，考え方は構造関数を求める際の分解法と同様であり，次式を利用する．

$$R(\mathbf{r}) = P_r\{X_a = 1\}R(1_a, \mathbf{r}) + P_r\{X_a = 0\}R(0_a, \mathbf{r}) \quad (3.3.5)$$

ここに， $R(1_a, \mathbf{r})$ はユニット a が機能している場合のシステム信頼度であり， $R(0_a, \mathbf{r})$ はユニット a が故障している場合のシステム信頼度である．構造関数を計算する場合と同様に式(3.3.5)を繰り返し適用し，直列・並列あるいはその組み合わせで表現できる規模の小さなシステムまで分解できれば，システム信頼度が計算できる．

式(3.3.5)を，このユニットにまで分解するように繰り返し用いると，

$$R(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{x}} \left\{ \phi(x_1, \dots, x_l) \times \prod_{a=1}^l r_a^{x_a} (1 - r_a)^{1-x_a} \right\}, \quad (3.3.6)$$

となる．ここで $\mathbf{x}$ についての和は $\mathbf{x}$ の取り得るすべて，すなわち 2^l 個のベクトルについて取られる．式(3.3.6)を利用する方法は事象空間法⁶⁾(または数え上げ法，総当たり法)と呼ばれ，システムの故障に関する真理値表を利用する，概念的には直截的な方法である．

前節でも述べたが，システムが直列—並列構造に分解される場合，分解法は著しい効果がある．しかし，この方法の問題点として，元のシステムを構造関数の構築がより容易な，より簡単なシステムへと等価変換しなければならない点がある．さらに，複雑な

システムではシステムの等価変換を繰り返す必要があることと、またその等価変換の機械的な処理が困難である点が挙げられる。道路網では、複数の OD 間の信頼性を考慮する必要がある、OD ペア毎に分解法を行う必要が生じるので、システムの等価変換をせずにオリジナルのシステム構造をそのまま利用できる方法の方が有用である。したがって、この方法は信頼度を求めるノードペア数が少なく、かつ等価変換が容易なネットワーク形状の場合でのみ適用可能であると考えられる。

事象空間法は、長所として簡単にシステム信頼度の厳密値が求められることと、計算機に向いていることが挙げられる。ただし、式(3.3.6)から明らかなように、真理値表を得るために構造関数が必要であり、システムの機能・故障の判定のための構造関数(あるいはアルゴリズム)を援用する必要がある。この方法の欠点は、ユニット数の増加に伴って事象数も膨大(ユニット数が l なら事象数は 2^l)となり、計算の実行が困難になることと、その際の信頼度計算の過程で桁落ち現象が発生して精度が低下する可能性があることである。道路網の規模が小さい場合でのみ有用な方法である。

(3) ミニマルパス・カットと含意排他公式による方法⁷⁾

ミニマルパス P_s のすべての要素が機能する事象を E_s と表す。少なくとも1つのミニマルパスが機能すればシステム全体は機能するので、システム信頼度 R は、

$$R = P_r \left\{ \bigcup_{s=1}^p E_s \right\}, \quad (3.3.7)$$

で与えられる。これはベン図で記述される論理和(記号 $\cup$ で表現)の期待値を求める方法である。これを含意排他公式で展開すれば、

$$\begin{aligned} R = & \sum_{s=1}^p P_r \{E_s\} - \sum_{s=1}^p \sum_{t>s}^p P_r \{E_s \cap E_t\} \\ & + \sum_{s=1}^p \sum_{t>s}^p \sum_{u>t}^p P_r \{E_s \cap E_t \cap E_u\} + \dots \dots + (-1)^{p-1} P_r \left\{ \bigcap_{s=1}^p E_s \right\}, \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

となる。

ミニマルカットにも同様の表記法を適用し、ミニマルカット K_s のすべての要素が故障する事象を E_s と表す。少なくとも1つのミニマルカットが生じればシステム全体は故障となるので、システムが故障となる確率(不信頼度) F は、

$$F = P_r \left\{ \bigcup_{s=1}^k E_s \right\}, \quad (3.3.9)$$

で与えられる。これを同様に展開すれば、

$$\begin{aligned}
F = & \sum_{s=1}^k P_r \{E_s\} - \sum_{s=1}^k \sum_{t>s}^k P_r \{E_s \cap E_t\} \\
& + \sum_{s=1}^k \sum_{t>s}^k \sum_{u>t}^k P_r \{E_s \cap E_t \cap E_u\} + \dots \dots + (-1)^{k-1} P_r \left\{ \bigcap_{s=1}^k E_s \right\}.
\end{aligned}
\tag{3.3.10}$$

システム信頼度 R は,

$$R = 1 - F, \tag{3.3.11}$$

で与えられる.

この方法の長所は, ミニマルパス・カットが求められればどのようなシステムにも適用できるので, 分解法のようにシステム構造の等価変換が不要であり, そのままのシステム構造で信頼度を計算できることである. また, 計算量も事象空間法— 2^l (l はユニット数) に比例する計算時間が必要—と比較すると少なく済む.

一方, この方法は式(3.3.8), (3.3.10)を用いて計算するが, 2点間のすべてのミニマルパス・カットが必要となる点に計算上の困難がある. すなわち, システムが大規模になるとパス・カットの数が増加する. 式(3.3.8), (3.3.10)での項の数は $2^p - 1$, $2^k - 1$ で与えられ, この計算過程では事象の論理積に関するブール演算 ($E_s \cap E_t = E_{st}$) が必要となる. したがって, ミニマルパス・カット数の増加とともに計算量が指数的に増加する. また, 各項のリスト化に多大な時間がかかることが報告されている⁸⁾. ミニマルパス数がミニマルカット数より小さい場合はミニマルパスを用いて, またミニマルカット数の方が小さい場合はミニマルカットを用いて計算するのが効率的⁹⁾とされている. 道路網では, 一般にネットワーク規模が大きくなるので, ミニマルパス・カット数も増加し, 上述の問題が発生すると考えられる.

(4) Fratta・Montanari の方法

Fratta・Montanari¹⁰⁾は, 式(3.3.7)で記述されるような論理和を代数和に変換する興味深いアルゴリズムを提案している. これは式(3.3.7), すなわち,

$$R = P_r[E_1 \cup E_2 \cup E_3 \dots \dots], \tag{3.3.12}$$

は, 直接代数和をとることができないので, 任意の項, 例えば第1項 E_1 に注目し,

$$R = P_r[E_1 + \{\bar{E}_1 \cap (E_1 \cup E_2 \cup E_3 \dots \dots)\}], \tag{3.3.13}$$

のように第1項と第2項以下とが排反事象となるように変形すると, 排反事象間では代数和をとることが可能となる. ここに, $\cup$, $\cap$ は論理和, 論理積を表し, $+$ は代数和を

表している．第2項内で直交成分を除去する操作を行う．同様の変形を{}内が空事象になるまで反復すると，最終的には代数和の成分のみが残る．本アルゴリズムは，この一連の操作により代数和を計算する方法である．

この方法では，(3)と同様，2点間のすべてのミニマルパス・カットが必要となるため，大規模ネットワークでは適用が困難になると考えられる．さらに他の問題点として，アルゴリズムの性質上，計算時間や記憶容量が l^N (l : 総リンク数, N : 反復回数) に比例するために計算過程でブール積の項の数が極めて多くなることが挙げられる．したがって，本方法は，計算の適用可能なネットワークの規模が極めて制約されるといえる．

(5) ミニマルパス・カットと構造関数による方法

ミニマルパスによる構造関数は，

$$\emptyset(\mathbf{x}) = \prod_{s=1}^p \prod_{a \in P_s} x_a \equiv 1 - \prod_{s=1}^p (1 - \prod_{a \in P_s} x_a), \quad (3.3.14)$$

で与えられ，ミニマルカットによる構造関数は，

$$\emptyset(\mathbf{x}) = \prod_{s=1}^k \prod_{a \in K_s} x_a \equiv \prod_{s=1}^k \left\{ 1 - \prod_{a \in K_s} (1 - x_a) \right\}, \quad (3.3.15)$$

で与えられる．したがって，システム信頼度は式(3.3.1)から，

$$R(\mathbf{r}) = E[\emptyset(\mathbf{X})] = E \left[1 - \prod_{s=1}^p (1 - \prod_{a \in P_s} X_a) \right], \quad (3.3.16)$$

あるいは，

$$R(\mathbf{r}) = E[\emptyset(\mathbf{X})] = E \left[\prod_{s=1}^k \left\{ 1 - \prod_{a \in K_s} (1 - X_a) \right\} \right], \quad (3.3.17)$$

で与えられる．

この方法は，ミニマルパス・カットを用いる点では(3)，(4)と同じであり特徴も似ている．ミニマルパスの数がミニマルカットの数より小さい場合はミニマルパス表現による方法(式(3.3.16))を用いて，またミニマルカット数の方が小さい場合はミニマルカット表現による方法(式(3.3.17))を用いて計算するのが効率的である．また，複数のパスあるいはカット間に共通ユニットが含まれない(すなわち，すべてのユニットが，あるパスあるいはカット中にただ一度だけ現れる)場合には，後述するブール演算が不要なために式(3.3.16)，(3.3.17)は次のように簡単化され，計算も容易となる．すなわち，

$$R(\mathbf{r}) = 1 - \prod_{s=1}^p \left(1 - \prod_{a \in P_s} r_a \right), \quad (3.3.18)$$

$$R(\mathbf{r}) = \prod_{s=1}^k \left\{ 1 - \prod_{a \in K_s} (1 - r_a) \right\}. \quad (3.3.19)$$

一方、2点間のすべてのパス・カットを必要とする欠点も同一である。式(3.3.16)あるいは(3.3.17)では、式(3.3.18)、(3.3.19)が成立する前提とは異なり、パスあるいはカット間で同一ユニットが複数回現れる場合が一般的であるので、計算過程で確率の重複計算を避けるため、論理積に関するブール演算($X_a \cdot X_a = X_a$)を行う必要がある。式(3.3.16)では項の数は $2^p - 1$ で、式(3.3.17)では項の数は 2^k で与えられ、ブール演算の回数もこれに比例する(式(3.3.17)では、 $Y_a = (1 - X_a)$ として計算するのが効率的である)。したがって、計算量は p や k 、すなわちミニマルパスやミニマルカットの数とともに指数的に増大する。なお、第5章で詳しく述べるが、本方法に基づく近似計算法が存在する。この近似計算法は、(3)、(4)に基づく近似計算法と異なり、すべてのミニマルパス・カットを利用しなくても済むという長所がある。

3.4 結語

この章では、信頼性グラフ解析の基礎的事項を整理するとともに、道路網の信頼性解析に適用する方法論を考察した。まず第2節において、構造関数と信頼度との関係、および構造関数の構成法を述べた。

ここで得られた結論は以下の通りである。

道路網の信頼性解析には、多数のODペアの信頼性を対象とする必要があることを念頭に置かねばならない。構造関数の構成法には、直列・並列システムの組み合わせによる方法や分解法があるが、これらはODペア毎にシステムの等価変換を必要とする。したがって、多数のODペアを対象とする場合には、構造関数の構成法は、システムの等価変換が不要で、オリジナルなシステムの構造をそのまま利用できる方が望ましい。この条件に適合するのが、ミニマルパス・カットによる方法である。この方法では、ODペア毎にミニマルパス・カットの探索が必要だが、計算の簡便性や機械的処理の容易性を考えるとこの方法が適切であると考えられる。

第3節では、信頼度の厳密値を求める諸方法の比較と問題点を整理し、道路網での利用可能性を考察した。ここで指摘されたのは以下の点である。

厳密値の計算法は、いずれもネットワーク拡大にともなって計算量が指数的に増加す

る．しかし，その増加量を規定する要因は解析方法によって異なる．それぞれの計算量は， 2^l ， 2^p ， 2^k ， l^N （ l ：総リンク数， p ：ミニマルパス数， k ：ミニマルカット数， N ：計算の繰返し回数）のいずれかにほぼ比例する．総リンク数 l は，与えられたネットワーク固有の数値であるので， l に規定される方法では計算の実行可能性がネットワーク規模に制約される．これに対し p ， k に規定される方法では，パス・カット数を操作可能変数とすることで，後述する近似計算法として有効な方法になることを示した．

すべてのミニマルパス・カットを用いる方法は，道路網の信頼性解析には適していない．すなわち，ミニマルパスには，ジグザグのミニマルパスや大回りのミニマルパスも含まれる．これらのミニマルパスはネットワークが大規模になるほど増加し，その探索作業は膨大なものとなる．さらに，これらジグザグのパスや大回りのパスには，交通の経路としての意味が希薄であるという問題点がある．

交通の経路としては実際的でないパスやカットが，信頼度 R の値にどのぐらい寄与しているかが不明確である．そして，この寄与の程度が小さければ，それらのパス・カットを計算対象から除外し，一部のパス・カットを対象に計算しても十分であると考えられる．もしこの考え方が妥当であれば，道路網の信頼性解析において，通常利用される経路を用いて差し支えないことになり，近似計算法の実用性，有用性が増すことになる．

近似計算法の詳しい方法やそれらの比較については，第 5 章で述べることとする．

参考文献

- 1) 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.
- 2) 三根 久・河合 一:信頼性・保全性の数理, pp. 106-108, 朝倉書店, 1982.
- 3) 前掲 2)
- 4) 塩見 弘:信頼性工学入門, pp. 119-120, 丸善, 昭和 57 年.
- 5) 井上紘一:システムの信頼性および安全性解析, 日本機械学会誌, Vol. 79, No.686, pp. 56-61, 1976.
- 6) 前掲 5)
- 7) 前掲 5)
- 8) 小林正美:道路網・ネットワークシステムの信頼度解析法に関する研究, 都市計画別冊, No. 15, pp. 385-390, 1980.
- 9) 前掲 5)
- 10) Fratta, L. and Montanari, U. G.: A Boolean Algebra Method for Computing the Terminal Reliability in a Communication Network, IEEE Trans. on Circuit Theory, Vol. CT-20, No.3, pp.203-211, 1973.

第4章 重要度指標の道路網への適用

4.1 概説

この章では、道路網の信頼性改善にどのような重要度指標が適しているかを明らかにする。

まず、第2節では今までに提案された種々の重要度指標の計算方法を紹介し、指標ごとの数学的特性について述べる。

第3節では、上述の重要度指標を用いて単純なモデルネットワークにおいて、指標ごとに信頼性改善を行ったときの改善対象リンク・総コスト・費用対効果等を比較する。その際、システムの改善と費用の関係を表した **Cost-Reliability** 関数を仮定する。

第4節では新たに、原子力分野等で用いられる **PSA**(後述)の重要度指標について道路網に適用できないかを検討する。そのため、モデルネットワークで計算を行い、結果を従来の重要度指標と比較する。

さらに第5節では、脆弱性について重要度指標と概念の差異の比較を行う。脆弱性とは、リンク信頼度の値を用いずにネットワーク中の重要なリンクを発見する方法として提案されているものである。これは、想定する災害によってはリンク信頼度の推定が困難であることが背景として挙げられる。

4.2 重要度指標の定義と特徴

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る。道路網においては、『リンク信頼度を向上させた場合のノード間信頼度への寄与の程度』を表すものが、重要度となる。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であるが、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、以下に述べる重要度指標となる。

4.2.1 確率重要度

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、Birnbaum¹⁾の信頼性重要度(**RI**)が提案されている。文献2)では、後に提案された重要度指標と区別するため確率重要度と呼んでおり、本研究でも日本語表記は『確率重要度』とする。確率重要度を道路網の連結信頼性に適用するには次節に述べる欠点があるため、

本研究では確率重要度と独自に考案されたクリティカリティ重要度を比較・考察する。

確率重要度(Birnbaum's Reliability Importance)は、以下に定義される測度であり、

$$RI_a = \frac{\partial R_{AB}(\mathbf{r})}{\partial r_a}, \quad (4.2.1)$$

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。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 はリンク信頼度を表している。確率重要度には $0 \leq RI_a \leq 1$ という性質があり、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 2-5-1 のような直列ネットワークの場合、AB 間のリンク信頼度を r_1, r_2 、ノード間信頼度を R_{AB} とすると、

$$R_{AB} = r_1 \cdot r_2, \quad (4.2.2)$$

となる。リンク 1, 2 の確率重要度はそれぞれ

$$RI_1 = \frac{\partial R_{ab}}{\partial r_1}, \quad (4.2.3)$$

$$RI_2 = \frac{\partial R_{ab}}{\partial r_2}, \quad (4.2.4)$$

と表現できるので、

$$RI_1 = r_2, \quad (4.2.5)$$

$$RI_2 = r_1, \quad (4.2.6)$$

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

$$RI_1 > RI_2, \quad (4.2.7)$$

となり、これは信頼度の低い方のリンクの重要度が高い(改善の対象となる)ことを表している。この結果は、数理的にも道路整備の観点からも妥当と思われる。

次に、並列ネットワークの場合(図 2-5-2)、AB 間のノード間信頼度は

$$R_{AB} = 1 - (1 - r_1)(1 - r_2), \quad (4.2.8)$$

で計算されることから、

$$RI_1 = 1 - r_2, \quad (4.2.9)$$

$$RI_2 = 1 - r_1, \quad (4.2.10)$$

である。仮に $r_1 < r_2$ である場合、

$$RI_1 < RI_2, \quad (4.2.11)$$

となり、これは信頼度の高い方のリンクの重要度が高い(改善の対象となる)ことを表している。この結果は数理的には妥当だが、道路整備の観点からは妥当でない。というのは、この測度を使用している限り、信頼度の低いリンクは放置されたままになるからである。また、既に信頼度の高いリンクを改善することは、費用的・技術的に困難であることを反映していないという欠点もある。

4.2.2 クリティカリティ重要度

4.2.1 で指摘した欠点—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ない—を改善したのがクリティカリティ重要度 CI (Criticality Importance) である³⁾。クリティカリティ重要度は、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、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} CI_a &= \lim_{\Delta r_a \rightarrow 0} \left\{ \frac{\Delta R_{AB}(\mathbf{r})/R_{AB}(\mathbf{r})}{\Delta r_a/r_a} \right\} \\ &= \frac{\partial R_{AB}(\mathbf{r})}{\partial r_a} \times \frac{r_a}{R_{AB}(\mathbf{r})} \\ &= RI_a \times \frac{r_a}{R_{AB}(\mathbf{r})}. \end{aligned} \tag{4.2.12}$$

直列ネットワーク(図 2-5-1)の場合、記法を 4.2.1 と同様にすると、

$$CI_1 = \frac{RI_1 \cdot r_1}{R_{AB}} = \frac{r_2 \cdot r_1}{R_{AB}}, \tag{4.2.13}$$

$$CI_2 = \frac{RI_2 \cdot r_2}{R_{AB}} = \frac{r_1 \cdot r_2}{R_{AB}}, \tag{4.2.14}$$

となり、

$$CI_1 = CI_2, \tag{4.2.15}$$

とどちらのリンクの重要度も同じ値となる。直列ネットワークではリンク信頼度の小さいリンクを強化することが合理的である。したがって、このような結果を与えるクリティカリティ重要度は構造上の欠点があるといえる。

並列ネットワーク(図 2-5-2)の場合は、

$$CI_1 = \frac{r_1(1-r_2)}{R_{AB}}, \tag{4.2.16}$$

$$CI_2 = \frac{r_2(1-r_1)}{R_{AB}}, \tag{4.2.17}$$

となる。仮に r_1 と r_2 の関係が、 $r_1 < r_2$ であるならば、

$$CI_1 < CI_2, \quad (4.2.18)$$

となる。これは RI と同じ結果であり、前述した問題点もそのままとなる。

4.2.3 改良型クリティカリティ重要度

上述した従来の重要度指標の欠点を克服するために提案されたのが改良型クリティカリティ重要度(Improved Criticality Importance)である⁴⁾。クリティカリティ重要度を参考に、リンク不信頼度を

$$q_a = 1 - r_a, \quad (4.2.19)$$

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。

$$\begin{aligned} ICI_a &= \lim_{\Delta q_a \rightarrow 0} \left\{ - \frac{\Delta R_{AB}(\mathbf{r}) / R_{AB}(\mathbf{r})}{\Delta q_a / q_a} \right\} \\ &= - \frac{\partial R_{AB}(\mathbf{r})}{\partial q_a} \times \frac{q_a}{R_{AB}(\mathbf{r})} \\ &= RI_a \times \frac{(1 - r_a)}{R_{AB}(\mathbf{r})} \end{aligned} \quad (4.2.20)$$

よって、 ICI_a と RI_a の間には、

$$ICI_a = \frac{(1 - r_a)}{R} RI_a, \quad (4.2.21)$$

の関係が成り立つ。したがって、確率重要度(RI)の値が同じである2つのリンクがあったとしても、リンク信頼度の低い(r_a の値が小さい)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⁵⁾。

直列ネットワーク(図 2-5-1)の場合、AB 間のリンク信頼度を r_1, r_2 とすると、リンク 1, 2 の改良型クリティカリティ重要度は、

$$ICI_1 = \frac{1 - r_1}{r_1} = \frac{1}{r_1} - 1, \quad (4.2.22)$$

$$ICI_2 = \frac{1 - r_2}{r_2} = \frac{1}{r_2} - 1, \quad (4.2.23)$$

となる。このとき、 r_1 と r_2 の関係が $r_1 < r_2$ ならば、

$$ICI_1 > ICI_2, \quad (4.2.24)$$

となり、直列ネットワークでは確率重要度(RI)と同じ性質を持っているといえる。

並列ネットワーク (図 2-5-2) では, クリティカリティ重要度はそれぞれ,

$$ICI_1 = \frac{1}{R_{AB}} \cdot (1 - r_1)(1 - r_2), \quad (4.2.25)$$

$$ICI_2 = \frac{1}{R_{AB}} \cdot (1 - r_2)(1 - r_1), \quad (4.2.26)$$

となる. これより, ICI_1 と ICI_2 には,

$$ICI_1 = ICI_2, \quad (4.2.27)$$

となる関係がある. これは, 信頼度の大小に関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, 改善リンクの選定には別の基準が実用であり, 本研究では 4.3.1 以下で Nicholson⁶⁾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.

4.2.4 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 4-2-1).

(1) 確率重要度(RI)の利害得失

RI は, 定義と定式化からみて原則的には合理性がある. しかし, 信頼度の高いリンクを改善することは, 信頼度の低いリンクを改善することより困難であることを反映できない欠点がある. また, 並列ネットワークにおいて信頼度の低いリンクが放置されるという欠点がある.

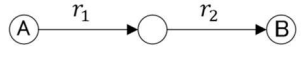
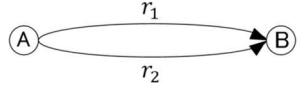
(2) クリティカリティ重要度(CI)の利害得失

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. しかし, 式(4.2.13)~(4.2.15)のように直列ネットワークで不合理な結果を与えることや, 並列ネットワークで RI と同じ欠点をもつ.

(3) 改良型クリティカリティ重要度(ICI)の利害得失

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 4-2-1 重要度指標の利害得失

	RI	CI	ICI
直列ネットワーク	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$
	$RI_1 > RI_2$	$CI_1 = CI_2$	$ICI_1 > ICI_2$
判定	Good	NG	Good
並列ネットワーク	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$	if $r_1 < r_2$
	$RI_1 < RI_2$	$CI_1 < CI_2$	$ICI_1 = ICI_2$
判定	NG	NG	It says nothing

4.3 重要度指標の比較分析

この節では、重要度指標の計算結果の比較を行う。上述のような単なる大小関係でなく、実際にリンク信頼度に数値を当てはめて重要度指標の試算を行う。まずは、簡易的なネットワークから始め（並列、田の字、Sioux Falls ネットワーク）、第 6 章での実際のネットワークでの計算の準備とする。

4.3.1 Cost-Reliability 関数と費用対効果関数の設定

4.2.3 で述べたように、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⁷⁾。

(1) ケース A：費用一定型

$$\text{CostA} = 1000. \quad (4.3.1)$$

このケースでは、リンク信頼度の大小に関わらず、信頼度改善費用は一定である。

(2) ケース B：費用線形増加型

$$\text{CostB} = 5000 \times (r_a + 0.1). \quad (4.3.2)$$

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。

(3) ケース C：費用 2 次関数増加型

$$\text{CostC} = 500 \times (50 \times r_a^2 + 15 \times r_a + 1). \quad (4.3.3)$$

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。

$$Eff(Y, F) = \frac{R_{AB} - R_{AB0}}{\text{Cost}_{AB}} \times Y \times F. \quad (4.3.4)$$

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。今回は計算の単純化のため、利子率は考慮していない。

4.3.2 並列・田の字型ネットワークにおける信頼度改善のモデル計算

ここでは、並列ネットワークと田の字型ネットワークによる RI と ICI の選択する改善リンクと費用対効果の比較を行う。田の字型ネットワークについては、今回新たに 2000 組の乱数を発生させてリンク信頼度の初期値を用意した。

(1) 並列ネットワークでの RI と ICI の比較

まず、並列ネットワーク(図 2-5-2)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。その結果を図 4-3-1 に示す。

比較する項目は、リンク信頼度(上段のネットワークの図中の数値、改善されたリンクは数値を下線で強調)、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)、改善にかかる総費用(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。図 4-3-1 をみると、 RI による改善はリンク信頼度の差(max-min)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わかる。ノード間信頼度については RI の方が優れているが、改善にかかる総費用は ICI の方が安く済むことがわかる。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ている。

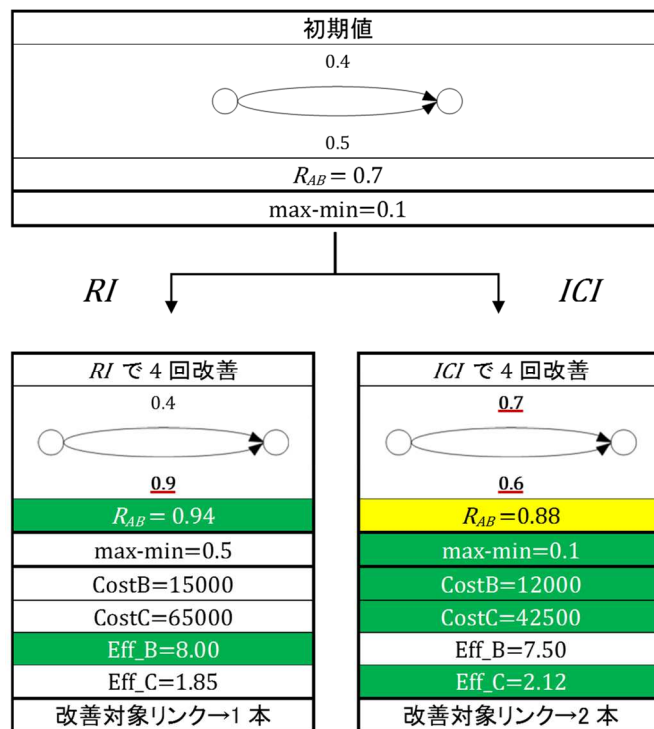


図 4-3-1 並列ネットワークでの RI と ICI の比較

(2) 田の字型ネットワークでの RI と ICI の比較

本研究では新たに、田の字型ネットワーク(図 4-3-2)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、最小値と最大値の差が大きいもの(Case1: $0.3 \leq r < 0.7$)と、差が小さいもの(Case2: $0.4 \leq r < 0.6$)を用意し、それぞれにおいて乱数を発生させるものとした。初期値は、Case1,2ともに 1000 組を用意した。具体的な改善の手順は以下ようになる。

- 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(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

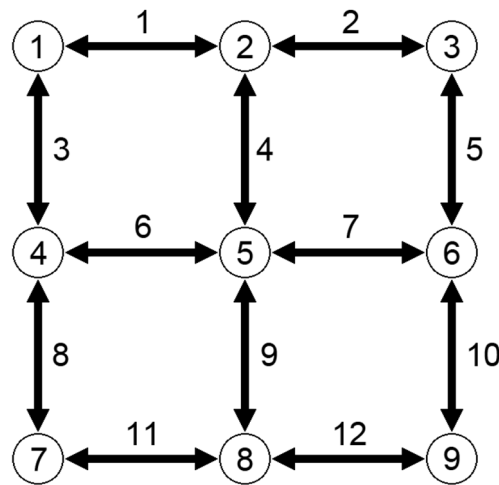


図 4-3-2 田の字型ネットワーク

その結果を表 4-3-1, 表 4-3-2 と図 4-3-3, 図 4-3-4 に示す.

図 4-3-3 は, Case1($0.3 \leq r < 0.7$)の 1 組目の RI と ICI による信頼度改善の計算結果の比較である. 比較する項目は, それぞれリンク信頼度(上段のネットワークの図中の数値, 改善されたリンクは数値を下線で強調), 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), 改善にかかる総費用(CostB,CostC), 費用対効果関数(Eff)の計算結果(Eff_B, Eff_C), 改善対象となるリンクの本数である. Cost-Reliability 関数のうち, ケース A は改善回数のみで費用が決まるため省略した.

図 4-3-3 を見ると, RI による改善では番号 1($0.5300 \rightarrow 0.7300$)と番号 4($0.4483 \rightarrow 0.5483$)の 2 本のリンクが改善対象リンクとして選ばれていることがわかる. ICI による改善では番号 1($0.5300 \rightarrow 0.5800$)と番号 3($0.3203 \rightarrow 0.5203$)と番号 4($0.4483 \rightarrow 0.4983$)の 3 本のリンクが改善対象リンクとして選ばれていることがわかる.

RI による改善では, 最大値-最小値, 分散の数値が初期値に比べて増加しているため, 同じリンクを改善する傾向が強いことがわかる. 改善対象となるリンクが何本あり, それぞれ何回改善されたかを具体的に表したのが表 4-3-1 であり, 例えば Case1($0.3 \leq r < 0.7$)の 1 組目の RI による改善では番号 1 のリンクが 4 回, 番号 4 のリンクが 2 回改善されていることがわかる. この表は 1000 組のうち 1~5 組目を抜粋したものだが, RI と ICI を比べるとやはり RI の方が同じリンクを改善する傾向が強いことがわかる.

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(CostB,CostC), 費用対効果(Eff_B, Eff_C)の数値に表れている(図 4-3-3). すなわち, 総費用ではケース B,C とともに ICI よりも数値が大きく(費用がかかる), 費用対効果ではケース B,C とともに ICI よりも数値が小さくなっている. 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 $RI(0.3869)$ と $ICI(0.3730)$ でそれほどの差はない。

このような計算を Case1, Case2 でそれぞれ 1000 組ずつ行った結果が表 4-3-2 で、これは 1000 組の平均値である。上から順にノード間信頼度，リンク信頼度を用いた計算結果(max-min, var)と，Cost-Reliability 関数を用いて計算した総費用と費用対効果，最下段が改善対象となったリンクの本数である。

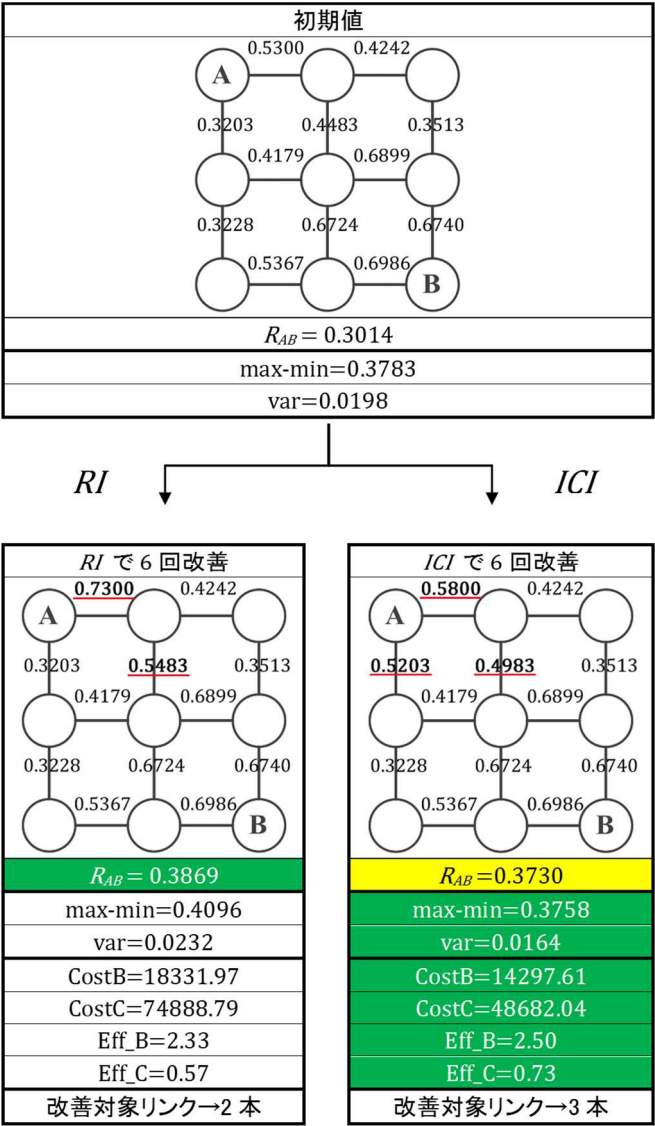


図 4-3-3 田の字型での RI と ICI の比較(Case1.の 1 組目)

表 4-3-1 1 組目～5 組目の改善対象リンクの比較

0.3 ≤ r < 0.7													0.3 ≤ r < 0.7												
リンク番号		RI											リンク番号		ICI										
改善回数	1組目	4	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	改善回数	1組目	1	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0
	2組目	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		2組目	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	3組目	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		3組目	1	0	0	1	0	0	4	0	0	0	0
	4組目	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		4組目	2	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
	5組目	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0		5組目	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4 ≤ r < 0.6													0.4 ≤ r < 0.6												
リンク番号		RI											リンク番号		ICI										
改善回数	1組目	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	改善回数	1組目	1	0	4	0	0	1	0	0	0	0	0
	2組目	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2		2組目	4	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	3組目	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		3組目	2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	2
	4組目	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5		4組目	2	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
	5組目	0	0	5	0	0	0	0	0	0	1	0		5組目	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1

表 4-3-2 RI と ICI による信頼度改善(1000 組の平均値)

Case1.		初期値		RI	ICI
0.3 ≤ r < 0.7					
ノード間信頼度	R	0.2775	0.3519	0.3453	
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.3407	0.4203	0.3369	
	var	0.0122	0.0165	0.0116	
LinkReliability-Cost関数	CaseB		18741.44	15782.69	
	CaseC		79140.91	58268.46	
費用対効果関数(Eff)	CaseB		2.011692	2.157906	
	CaseC		0.49435	0.595211	
改善対象リンクの本数			1.634	2.404	

Case2.		初期値		RI	ICI
0.4 ≤ r < 0.6					
ノード間信頼度	R	0.2772	0.3439	0.3402	
リンク信頼度を用いた計算	max-min	0.1703	0.2978	0.2108	
	var	0.0031	0.0072	0.0043	
LinkReliability-Cost関数	CaseB		18618.83	16863.12	
	CaseC		76907.57	64407.89	
費用対効果関数(Eff)	CaseB		1.794786	1.867932	
	CaseC		0.438354	0.491649	
改善対象リンクの本数			1.893	2.879	

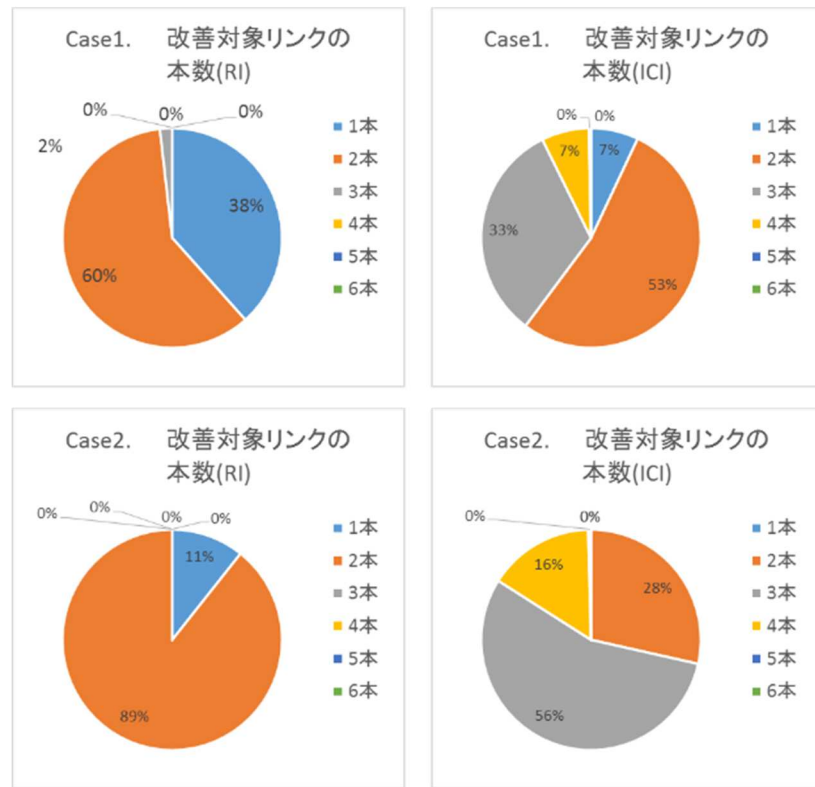


図 4-3-4 RI と ICI の改善対象となるリンクの本数の比較

表 4-3-2 を見ると、1000 組の平均値も図 4-3-1 と同様の結果となった。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 の方が数値が大きくなっている。RI は、改善したリンクを再び改善するので並行リンクに配慮した指標とはいえないことがわかる。

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。

図 4-3-4 は、Case1, Case2 の RI と ICI でそれぞれ 1000 組分の改善対象となるリンクがいくつあるかを表したものである。この本数が例えば 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。

Case1,2 とともに RI で改善されるリンクの本数は、1000 組のうち大半が 1 本か 2 本で、ICI に比べると少ない。したがって、公平性の観点では ICI の方が勝っている。

全体として見ると、並列ネットワークと類似の結果を得ることができたといえる。

4.3.3 Sioux Falls ネットワークにおける信頼度改善のモデル計算

前節までの結果を踏まえ、本研究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 4-3-5)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ことで、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るためである。

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(5.3.1 を参照)を行った。

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 4-3-3) と、差が小さいもの Case2: $0.4 \leq r < 0.6$ (表 4-3-4) と、初期値の大きいもの Case3: $0.5 \leq r < 0.7$ (表 4-3-5) 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になる。

- 手順 1. 重要度指標(RI , 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. 重要度の値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($Cost_B$, $Cost_C$)
 - ・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

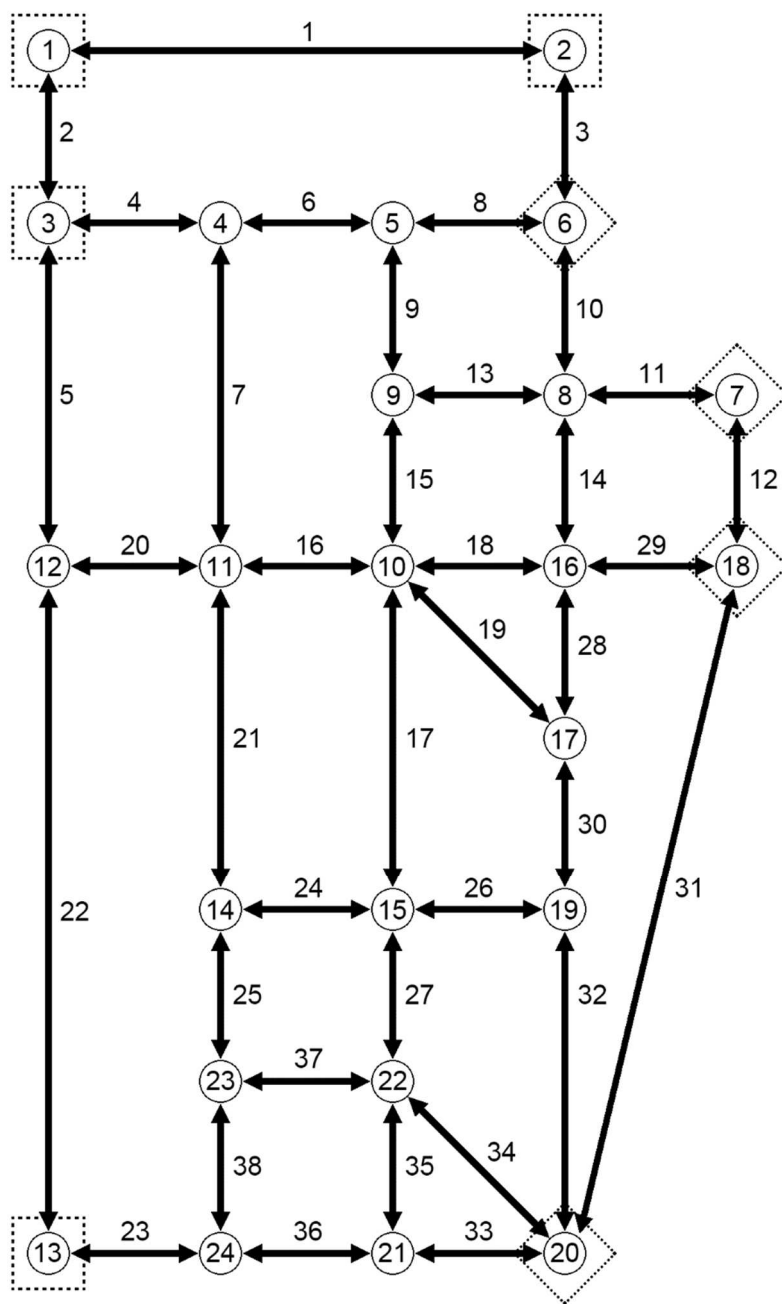


図 4-3-5 Sioux Falls ネットワーク

表 4-3-3 Sioux Falls ネットワークでの信頼度改善比較
(50 組の平均値, Case1: $0.3 \leq r \leq 0.7$)

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

比較する項目は表 4-3-3～4-3-5 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 4-3-3～4-3-5 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、結果として優っていることを意味する。

表 4-3-3～4-3-5 を見ると、パス選択方法(5.4 を参照)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、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。

表 4-3-4 Sioux Falls ネットワークでの信頼度改善比較
(50 組の平均値, Case2: $0.4 \leq r \leq 0.6$)

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

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、値は両者でそれほどの差は見られない。例えば、表 4-3-3 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 4-3-4 のパス選択方法 I を見ると、max-min の初期値が 0.1893 だったのが 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。

表 4-3-5 Sioux Falls ネットワークでの信頼度改善比較
(50 組の平均値, Case3: $0.5 \leq r \leq 0.7$)

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

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 4-3-5 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 4-3-5 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 4-3-5 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、 $\max\text{-min}$, 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。

4.3.4 高信頼度のネットワークにおける信頼度改善の課題

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、新たに田の字型ネットワーク(図4-3-2)の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4-3-6、図4-3-6に示す。

比較する項目は表4-3-6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($\max\text{-min}$, 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4-3-6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、結果として優っ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 より優っている。ただし、値は両者でそれほど差は見られない。例えば、表4-3-6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($\max\text{-min}$, 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4-3-6の($0.4 \leq r < 0.5$)を見ると、 $\max\text{-min}$ 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 4-3-6 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。

表 4-3-6 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

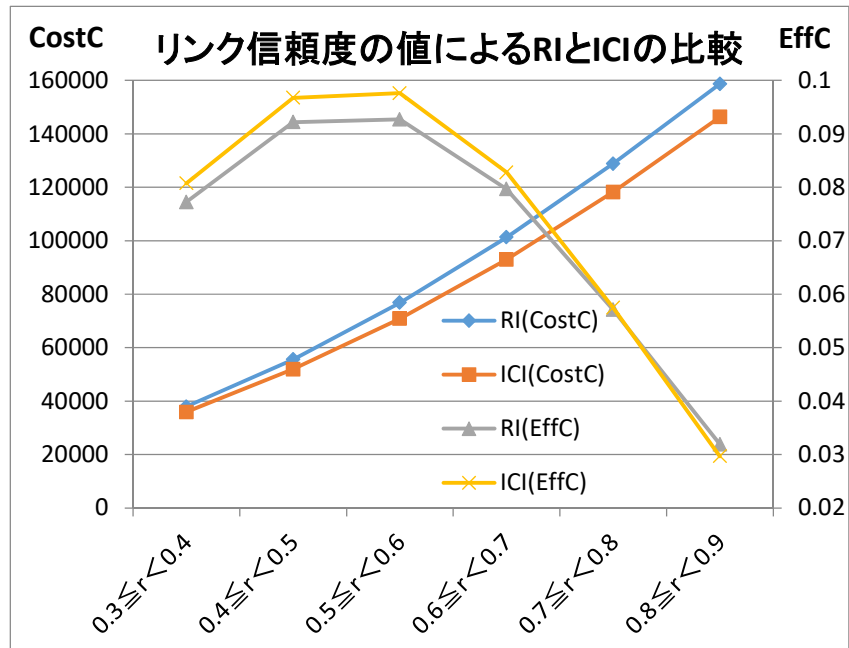


図 4-3-6 総コスト・費用対効果の比較(100組の平均)

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きれない。例えば、表 4-3-6 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 4-3-6 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 4-3-6)。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。

4.4 PSA で用いられる重要度指標の道路網への適用

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、故障した際のリスクが大きいために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検討する。

4.4.1 PSA で用いられる重要度指標

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論的安全評価(PSA: Probabilistic Safety Assessment) が用いられている⁸⁾。Van der Borst and Schoonakker (2001)⁹⁾が PSA を概観している。PSA の目的は、炉心溶融などの重大事故を引き起こすカット(パス)セットを発見するとともに、各々の構成要素においてそのような事故を防止するのに寄与度の大きいものを判定することである。それを表現したのが、

$$R(X) = K(X) + L(X) \quad (4.4.1)$$

の式であり、ここで $K(X)$ はある特定の基礎事象である x_i を含むカットセットであり、 $L(X)$ はそれを含まないカットセットである。 $R(X)$ はリスク方程式と呼び、これは後述するリスク重要度指標により結果は異なってくる。表 4-4-1¹⁰⁾は、リスク重要度指標の種類と定義をまとめたものである。

上記において、 $R(x_i = 1)$ は事象 x_i が起きる確率が 1 (信頼度が 0) と仮定した時に増加するリスクの程度を、 $R(x_i = 0)$ は事象(構成要素) x_i の信頼度が完全であると仮定した時に減少するリスクの程度を、 $R(\text{base})$ は現状でのリスクの割合(%)を、 $x_i(\text{base})$ は構成要素 x_i が使用不能な状態をそれぞれ表している。

わかりやすくするため、これらのリスク重要度指標を一次方程式的に表すとこのような式になり、

$$R(X_i) = aX_i + b \quad (4.4.2)$$

故障確率とリスク頻度の関係を図 4-4-1¹¹⁾に示す。

表 4-4-1 リスク重要度指標の種類と定義

リスク重要度指標		
指標	略称	定義
Risk Reduction	RR	$R(\text{base}) - R(x_i = 0)$
Fussell-Vesely	FV(CI)	$\frac{R(\text{base}) - R(x_i = 0)}{R(\text{base})}$
Risk Reduction Worth	RRW	$\frac{R(\text{base})}{R(x_i = 0)}$
Criticality Importance	CR(CI)	$\frac{BI}{R(\text{base})} \times x_i(\text{base})$
Risk Achievement	RA	$R(x_i = 1) - R(\text{base})$
Risk Achievement Worth	RAW	$\frac{R(x_i = 1)}{R(\text{base})}$
Partial Derivative	PD(RI)	$\frac{R(x_i + \partial x_i) - R(x_i)}{\partial x_i}$
Birnbaum Importance	BI(RI)	$R(x_i = 1) - R(x_i = 0)$

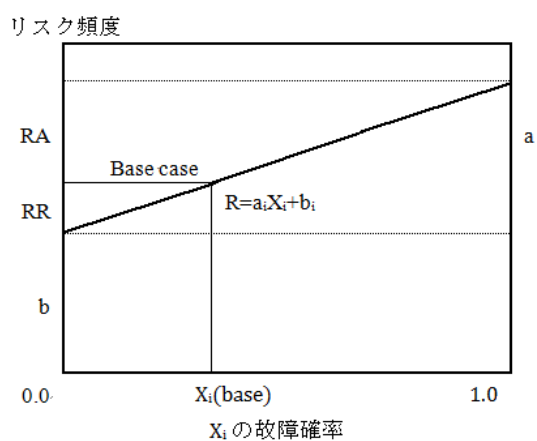


図 4-4-1 故障確率とリスク頻度の関係

また、リスク重要度指標には以下のような相互関係がある¹²⁾。

$$FV(CI) = \frac{aX_i(\text{base})}{aX_i(\text{base}) + b} = \frac{RR}{R(\text{base})} \quad (4.4.3)$$

$$RRW = \frac{a}{b} X_i(\text{base}) + 1 = \frac{1}{1 - FV} \quad (4.4.4)$$

$$CR(CI) = \frac{aX_i(\text{base})}{aX_i(\text{base}) + b} = FV \quad (4.4.5)$$

$$RAW = \frac{a + b}{aX_i(\text{base}) + b} = \frac{RA}{R(\text{base})} + 1 \quad (4.4.6)$$

$$PD = a = RA + RR = BI(RI) \quad (4.4.7)$$

まず、PSA で利用されている重要度指標をまとめた(表 4-4-1)。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を 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¹³⁾。

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れほど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¹⁴⁾。

4.4.2 Fussell Vesely

前節で述べたように、PSA でよく用いられる重要度指標は FV(Fussell Vesely)と RAW(Risk Achievement Worth)である。

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

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 4-4-1 参照)。

図 2-5-1 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,

$$Q(\text{base}) = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2) \quad (4.4.8)$$

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

$$Q(q_1 = 1) = 1 - (1 - 1)(1 - q_2) = Q(q_2 = 1) \quad (4.4.9)$$

$$Q(q_1 = 0) = 1 - (1 - 0)(1 - q_2) = q_2 \quad (4.4.10)$$

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

$$FV_1 > FV_2 \quad (4.4.11)$$

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 2-5-2 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,

$$Q(\text{base}) = q_1 \cdot q_2 \quad (4.4.12)$$

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

$$Q(q_1 = 1) = q_2 \quad (4.4.13)$$

$$Q(q_1 = 0) = 0 = Q(q_2 = 0) \quad (4.4.14)$$

となるので、 q_1 と q_2 の値に関わらず

$$FV_1 = FV_2 \quad (4.4.15)$$

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。

4.4.3 Risk Achievement Worth

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。

図 2-5-1 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,

$$Q(\text{base}) = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2) \quad (4.4.16)$$

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

$$Q(q_1 = 1) = 1 - (1 - 1)(1 - q_2) = Q(q_2 = 1) \quad (4.4.17)$$

$$Q(q_1 = 0) = 1 - (1 - 0)(1 - q_2) = q_2 \quad (4.4.18)$$

となるので、 q_1 と q_2 の値に関わらず

$$RAW_1 = RAW_2 \quad (4.4.19)$$

となる。したがって、直列ネットワークにおいて RAW は CI と同様の性質を持ってい

ることがわかる。

また、図 2-5-2 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、

$$Q(\text{base}) = q_1 \cdot q_2 \quad (4.4.20)$$

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

$$Q(q_1 = 1) = q_2 \quad (4.4.21)$$

$$Q(q_1 = 0) = 0 = Q(q_1 = 2) \quad (4.4.22)$$

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

$$RAW_1 < RAW_2 \quad (4.4.23)$$

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

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 4-4-1 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。

4.4.4 PSA で用いられる重要度指標の比較分析・モデル計算

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 4-3-2) へ拡大して計算結果の考察を行う。

(1) FV, RAW 重要度指標の計算の特性

まず、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 4-4-2 に示す。

表 4-4-2 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 4-4-2 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 4-4-2 の水色部分)。そのことは、図 4-4-2 を見ても裏付けられる。図 4-4-2 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。

(2) 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 4-3-2)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 4.3.2 と同様であるが、今回は 1 回の改善幅を 0.01 としている。その結果を表 4-4-3 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。

表 4-4-2 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

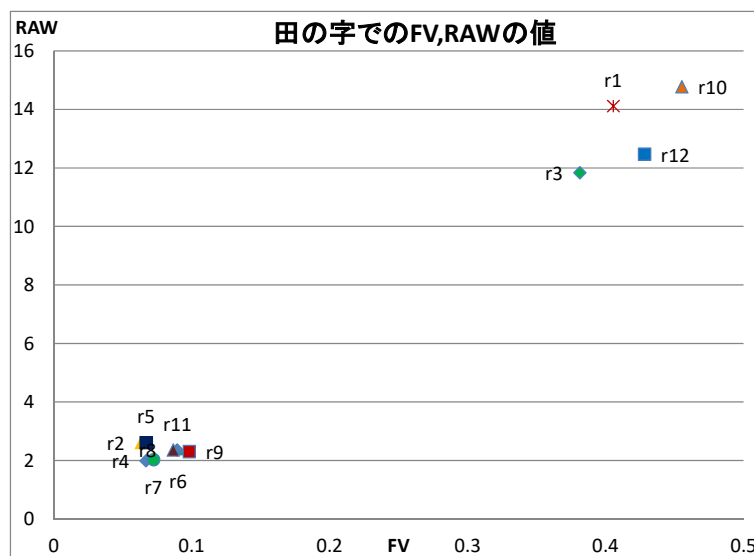


図 4-4-2 FV, RAW での重要度の値

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 4.3.2 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* でもそれほどの差はない。

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 4-4-3 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。

表 4-4-3 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 ≤ r < 0.7	R	0.285939	0.360909	0.353997	0.360909	0.369156
リンク信頼度を	max-min	0.338775	0.428488	0.332619	0.428488	0.538928
用いた計算	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	CaseB		1.985003	2.162511	2.572620	1.897583
関数(Eff)	CaseC		0.480095	0.596737	0.709951	0.409050
		初期値	RI	ICI	FV	RAW
0.4 ≤ r < 0.6	R	0.281817	0.348665	0.345081	0.357623	0.357771
リンク信頼度を	max-min	0.169387	0.305951	0.211266	0.211266	0.420757
用いた計算	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	CaseB		1.782364	1.870238	2.419196	1.787287
関数(Eff)	CaseC		0.431773	0.490750	0.669506	0.391583
		初期値	RI	ICI	FV	RAW
0.8 ≤ r < 0.85	R	0.904052	0.914819	0.914005	0.914604	0.916952
リンク信頼度を	max-min	0.042347	0.083644	0.046325	0.067306	0.087509
用いた計算	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	CaseB		0.198716	0.189435	0.201323	0.237234
関数(Eff)	CaseC		0.036115	0.035314	0.037606	0.042990
		初期値	RI	ICI	FV	RAW
0.85 ≤ r < 0.9	R	0.955265	0.963202	0.962293	0.962293	0.964787
リンク信頼度を	max-min	0.042347	0.085654	0.046213	0.044458	0.086443
用いた計算	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	CaseB		0.138609	0.126567	0.126630	0.166163
関数(Eff)	CaseC		0.024066	0.022543	0.022564	0.028831

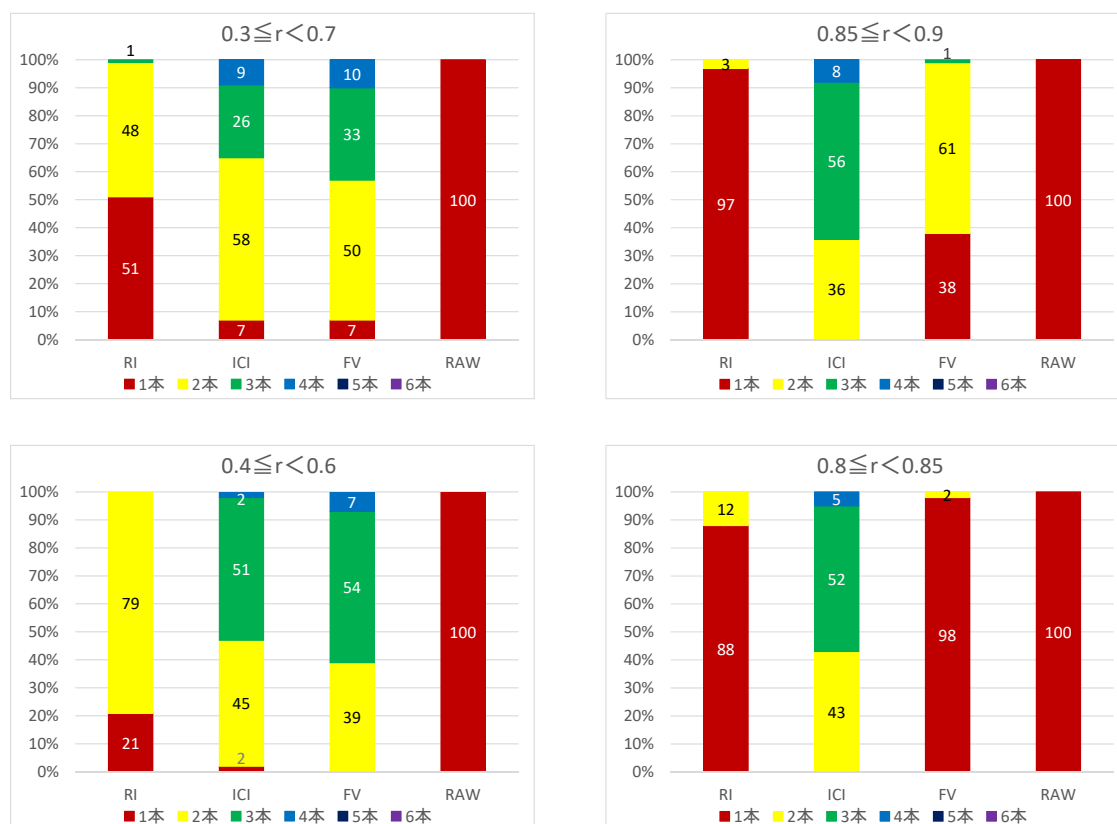


図 4-4-3 改善対象となるリンク本数の比較

表 4-4-4 4 種の重要度指標の項目別比較のまとめ

		RI		ICI		FV		RAW	
リンク信頼度の値の範囲		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		△	×	○	◎	○	△	×	×

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 4-4-4 である。

4.5 リンク信頼度の値を必要としない重要度(脆弱性の概念)

上述した連結信頼性は、各リンクが機能する状態 x_a の期待値 r_a を所与とし、ノードペア間が連結している確率を求める問題だった。さらに、ブール演算が必要なことから、各リンクの信頼度の値が独立であったとしても膨大な計算が必要である。これに関しては、第5章で述べる近似解法が1つの解決法となる。それ以外のアプローチとして、リンク信頼度を使用せずにネットワーク形状から接続性が大きく損なわれる可能性のリンクを抽出する、接続脆弱性指標¹⁵⁾が提案されている。この手法では、ノードペア間の非重複経路数を列挙し、多くのノードペア間で接続性を低下させるリンクをクリティカルリンクとして抽出する。

4.5.1 非重複経路の定義¹⁶⁾

非重複経路は、「リンクの重複の無い経路」と定義される。これは、グラフ理論の辺連結性(edge-connectivity)の概念¹⁷⁾に準じるもので、非重複経路がN本である場合、最大N-1本のリンクが途絶したとしても、ノードペア間の接続性が確保できることから、ネットワークの機能保持に関する有効な指標となる。

一般的な経路数え上げとの差異を図 4-5-1 を用いて説明する。この図のノードペアAB間には、重複を許せば6本の経路がある。しかし、図中の×のリンクが途絶すると、6本すべての経路が途絶するのでAB間には十分な接続性が確保されているとは言い難い。この図の場合、経路数そのものは6本だが、非重複経路は1本となる。

4.5.2 非重複経路の数え上げモデル¹⁸⁾

非重複経路を数え上げる方法を、非重複経路に含まれるリンクを1、そうでないリンクを0とする状態変数 x_a を未知変数として用いることで表現する。なお、ノードペア間でリンクが重複しない経路群を構成するリンクは、以下の条件を満たしている必要がある。

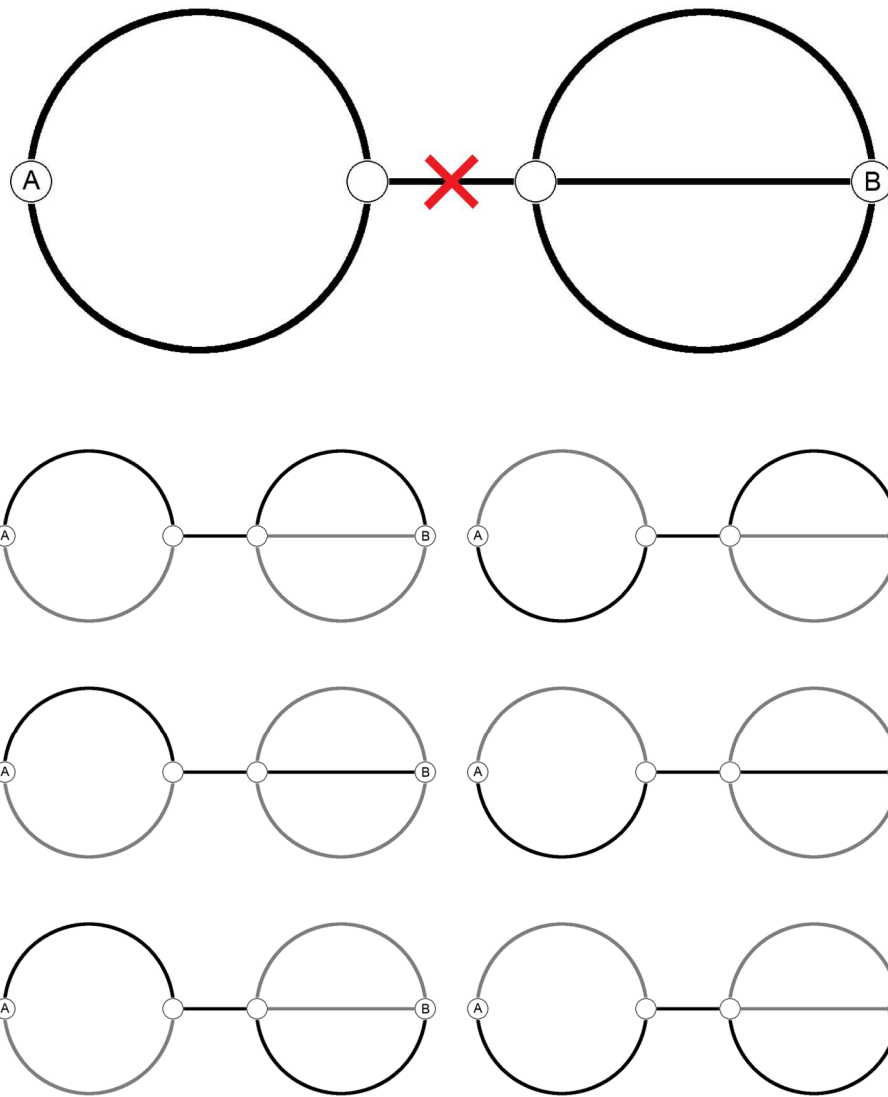


図 4-5-1 非重複経路の概念

- (1) 出発ノード r から流出する非重複経路構成リンク数および到着ノード s へ流入する非重複経路構成リンク数は、非重複経路数 n_{rs} に等しい。
- (2) 出発ノード r への流入リンクおよび到着ノード s からの流出リンクは、ノード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、流入するノード経路構成リンク数と流出するノード経路構成リンク数は等しい。

この条件の下に、非重複経路数 n_{rs} を最大とする問題として、非重複経路数算定モデルは以下のように記述できる。

$$\max_{\mathbf{x}} n_{rs} \quad (4.5.1)$$

Subject to

$$\frac{1}{n_{rs}} \sum_{a \in \mathbf{A}} t_a x_a^* \leq k \quad (4.5.2)$$

$$\mathbf{x}^* = \arg \min_{\mathbf{x}} \sum_{a \in \mathbf{A}} t_a x_a \quad (4.5.3)$$

Subject to

$$\sum_{x \in \text{Out}(r)} x_a = \sum_{x \in \text{In}(s)} x_a = n_{rs} \quad (4.5.4)$$

$$\sum_{x \in \text{In}(r)} x_a = \sum_{x \in \text{Out}(s)} x_a = 0 \quad (4.5.5)$$

$$\sum_{x \in \text{Out}(i)} x_a - \sum_{x \in \text{In}(i)} x_a = 0 \quad \forall i \in \mathbf{I}, i \neq r, s \quad (4.5.6)$$

$$x_a = \{0,1\} \quad (4.5.7)$$

ここで,

$\mathbf{A}$: リンクの集合

$\mathbf{I}$: ノードの集合

x_a : リンク a が非重複経路を構成すれば 1 をとる二値変数(未知変数)

n_{rs} : ノードペア rs 間の非重複経路数

t_a : リンク a の所要時間

$\text{In}(i)$: ノード i へ流入するリンクの集合

$\text{Out}(i)$: ノード i から流出するリンクの集合

k : 非重複経路の平均所要時間の許容値

である. 式(4.5.1)で示した目的関数は, 非重複経路数を最大化するものとして記述されていて式(4.5.4), 式(4.5.6)がリンクの接続性を表現する制約条件式である. 本来の非重複経路数の数え上げでは, 式(4.5.4)~(4.5.7)の下で式(4.5.4)を最大化すればよい. しかし, この場合では非重複経路数は一意に決まるが, その構成リンクは例えば図 4-5-1 での 6 本の経路のいずれかの 1 本となり, 一意に決定できない.

この中から最適な経路を選択するために, 非重複経路の経路集合の中から総所要時間が最小のものを選択することとする. つまり, n_{rs} が所与の下で総走行時間が最小となるリンク集合を求めるサブ問題を内包する 2 レベル最適化問題として, 非重複経路数を求める. したがって, 総所要時間 $\sum t_a x_a$ も一意に決まる, さらに, これにより総所要時間という新たな制約条件を付加可能となる.

式(4.5.2)の制約条件は, 非重複経路を構成する経路の平均所要時間が k 以内であることを示す. k は, 定数にしたり最短経路所要時間の定数倍にしたりして指定すればよい.

式(4.5.1)~(4.5.7)の問題は, 以下の反復法を用いることで容易に計算ができる.

- (1) 式(4.5.4)~(4.5.7)を制約条件として式(4.5.1)を最大化する非重複経路数 n_{rs} を求める.
- (2) n_{rs}^* を所与として, 式(4.5.4)~(4.5.7)を制約条件として式(4.5.3)を最小にする問題を解き, この時の最小総所要時間 $\sum t_a x_a^*$ を求める.

- (3) $\sum t_a x_a^*$ が式(4.5.2)の制約条件を満たすかどうか確認する．もし，満たしていれば計算終了．満たしていない場合は， $n_{rs}^* = n_{rs}^* - 1$ とし，(2)に戻る．これを繰り返して $n_{rs}^* = 0$ となったら条件を満たす非重複経路は存在しないものとして，計算終了する．

4.5.3 クリティカルリンクの特定¹⁹⁾

上述の非重複経路数を用いてクリティカルリンク(途絶による影響が大きなリンク)を特定する．この方法でのクリティカルリンクの定義は，「そのリンクの途絶が OD ペア全体の接続性低下に大きな影響を及ぼす地点」と定義する．そのため，以下のリンク重要度指標(LCI , link criticality index) を定義する．

$$LCI_a = \frac{\sum_{rs \in W} 1 - \frac{n_{rs}(a,k)}{n_{rs}(0,k)}}{W} \quad (4.5.8)$$

ここで，

W : 対象ネットワーク中の OD ペア総数

W : OD ペア集合

$n_{rs}(a,k)$: 非重複経路の平均所要時間の閾値が k の時にリンク a が途絶した場合の
非重複リンク数

$n_{rs}(0,k)$: 非重複経路の平均所要時間の閾値が k の時にリンク a が通行できる時の
非重複リンク数

つまり，各ノードペア間において非重複経路の減少率を計算し，そのノードペア間の平均値をもってリンク重要度を測定することとなる．

なお， n_{rs} の求め方だが，そもそもリンク a が非重複経路を構成していない場合，そのリンクが途絶しても非重複経路数に影響を及ぼさない．また，リンク a が非重複経路を構成していても，そのリンクを代替するようにネットワークが構成されていれば非重複経路数は変化しない．図 4-5-1 の例では，×印のついているリンクのみが非重複経路数が増加するリンクである．ただし，他のリンクでも式(4.5.2)の制約条件を満たさず非重複経路数が減少する場合はある．

このように，特定のリンクが途絶した場合の影響，すなわち $n_{rs}(a)$ を求めるためには，式(4.5.1)～(4.5.7)の最適化問題に，途絶リンクに関して $x_a = 0$ の制約条件を追加して再度最適化問題を解けばよい．

4.5.4 脆弱性と重要度の概念の比較・考察

ここまで脆弱性について簡単に説明してきたが、重要度との考え方の違いを以下のよう
にまとめられると思われる。

重要度指標

重要度指標の目的は、主にネットワークの信頼性に寄与する感度の高いリンクを発見
することであり、当該リンクの信頼度を上げることでネットワークの信頼性は向上する。
重要度の計算には、リンク信頼度の値が推定できることが条件となる。

脆弱性指標

脆弱性指標の目的は、ネットワークの構造から見て切断されるとネットワーク全体へ
の影響が大きいリンクを発見することであり、当該リンクの代替となるリンクを追加す
ることで、切断に対する影響を下げるができる。

脆弱性指標についての考察

道路網における脆弱性指標の考え方の前提として、リンク信頼度の推定が困難である、
あるいは確率論の俎上に載せるのが難しいことへの対処²⁰⁾が挙げられるが、これについ
ては計算の前提条件となる確率がどの程度予測可能であるかが鍵であろう。例えば、地
震の発生確率そのものを元にしてリンク信頼度を考えるのは不可能だろうが、大規模な
地震に比べて短期間に周期的に発生する災害については予測は容易となる。降雨による
浸水などは比較的頻度が高く、被害の規模も予測がしやすい。このような災害について
はリンク信頼度を確率的に考えてもよいと思われる。第6章では、大雨による内水災害
を例に実際のネットワークで重要度の計算を行う。

また、脆弱性指標はすべてのリンクを等価に考えているため、脆弱なリンクが発見さ
れた場合その対処方法は基本的には「リンクそのものの追加」である。重要度と違って
「当該リンクの信頼度を向上させる」という解決策が取れないのである。また、脆弱性
指標のみでは費用対効果の測定もできない。これらの課題については、サービス機会数
と OD 間の交通抵抗を同時に評価するポテンシャル型アクセシビリティ指標²¹⁾が提案
されている。ただし、この指標においても脆弱性指標と同様に所要時間に左右される側
面がある。

重要度指標と脆弱性指標の最大の相違点は、所要時間の要素がはじめから組み込まれ
ているかどうかであるといえる。重要度の場合は、その要素を後から追加することも可
能ではあるが、最初から含まれているわけではない。「リンクを等価に考えること」に
ついては、計算自体は重要度指標でも行えるといえる。すべてのリンク信頼度を同値に
設定すればよいからである。

4.6 結語

この章では、重要度指標を道路網に適用する際に必要なことを考察した。

まず第2節で、種々の重要度指標の定義と特徴について整理した。その結果、確率重要度(*RI*)やクリティカルリティ重要度(*CI*)では並列ネットワークにおいて、低信頼度のリンクが無視される、高信頼度のリンクをさらに改善することが技術・費用面で難しいことを反映できない、の2点が問題となった。これを克服するために提案するのが改良型クリティカルリティ重要度(*ICI*)である。

第3節では、*RI*、*ICI*の信頼度改善の計算の比較分析を行うことで、道路網に適した重要度指標を検討した。*ICI*では並列ネットワークで双方のリンクが同じ値となるため、改善リンクを選定するために **Cost-Reliability** 関数を設定した。これは、元々高信頼度のリンクをさらに改善するのはより費用が掛かるという仮定に基づいたものである。また、同時に費用対効果関数も設定した。並列・田の字型・**Sioux Falls** ネットワークで試算を行った結果、改善に必要な総コスト・費用対効果・リンク改善の公平性の観点で概ね *ICI* が *RI* よりも優っていることが判明した。ただし、リンク信頼度の値が大きくなると両者の差が縮まる傾向があるとの結果を得た。

そこで第4節では、新たに高信頼度のシステムで用いられる **PSA** の重要度を加えて信頼度改善の試算を行った。使用したネットワークは第3節と同様である。その結果、全体的な傾向としてリンク信頼度に関わらず結果の値は概ね *RI* と **RAW**、*ICI* と **FV** が類似していることが判明した。総コストについては、低信頼度では *ICI* が、高信頼度では **FV** が優れていた。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、高信頼度での値は、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。リンク改善の公平性の観点では、第3節と同様に *ICI* が優れていた。

全体としては、道路網に好適な重要度指標は *ICI* であるという結果を得た。

第5節では、リンク信頼度の値を必要としない脆弱性の概念について検討・考察を行った。重要度の計算にはリンク信頼度の値が必要となるが、想定する災害によってはこの値を定めることが困難であることから、ネットワーク中の脆弱な箇所を見つける方法として、脆弱性指標は開発された。ネットワーク中の **OD** ペア集合でリンクが重複しない経路を数え上げ、そこに制約条件として所要時間を加えて、クリティカルリンクは特定される。この概念では、リンク信頼度を必要としないのは計算を簡便にしているともいえるが、脆弱性指標のみではクリティカルリンクが発見された際のネットワークの強化手法が代替リンクを新設するしかないのが欠点である。重要度指標と脆弱性指標の最大の違いは、所要時間の要素が最初から含まれているかどうかである。連結信頼性における重要度は、はじめからその要素が含まれているわけではないが、それを考慮することは可能であるといえる。

参考文献

- 1) Birnbaum, Z. W. (1969) On the Importance of Different Components in Multi-Component System. *Multivariate Analysis II* (P. R. Krishnaiah Ed.), Academic Press, New York.
- 2) 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.
- 3) Henley, E.J. and Kumamoto, H.: *Reliability Engineering and Risk Assessment*, Prentice-Hall, Inc., pp.418-436, 1981.
- 4) 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.
- 5) 前掲 4)
- 6) Nicholson, A.: *Optimising Network Terminal Reliability*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability, CD-ROM, 2007.
- 7) 前掲 4)
- 8) 嶋田善夫：確率論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, pp.87-94, 2004.
- 9) 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
- 10) 前掲 9)
- 11) 前掲 9)
- 12) 前掲 9)
- 13) 前掲 8)
- 14) 前掲 8)
- 15) Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C. and D'Este, G.M.: Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks, *Network and Spatial Economics*, Vol.6, pp. 267-291, 2006.
- 16) 中山晶一郎・朝倉康夫 編：道路交通の信頼性評価，コロナ社，pp.250-251, 2014.
- 17) Grötschel, M., Monma, C.L. and Stoer, M.: Design of survival networks, Ball, M.O. et al. eds., *Network Models*, Elsevier, Amsterdam, pp. 617-672, 1995.
- 18) 前掲 16), pp.251-253.
- 19) 前掲 16), pp.253-254.
- 20) 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.
- 21) 瀬戸裕美子・宇野伸宏・塩見康博：非重複経路数を考慮したアクセシビリティ指標に基づく医療施設配置計画，土木学会論文集 D3(土木計画学),Vol. 67, No.5, pp.I_57-I_68, 2011.

第5章 道路網における信頼性計算の近似解法

5.1 概説

ここまで道路網の信頼性解析・重要度指標についての検討を行ってきたが、これらの計算はネットワークの規模が拡大すると計算量・計算時間が指数的に増加する(NP-hard)という問題がある。これは、いくら計算機が発達しても、計算機が発達がシステムの拡大(つまりシステムの構成要素数の増大)には追いつけないという本質的な問題であることを示す。例えば、パス探索の高速解法¹⁾のような、パス選択がその選択アルゴリズムの改良あるいは画期的方法で解決できるものではないのである。したがって、信頼性計算の近似解法の必要性が明らかとなる。まず、システム信頼度の近似解法をいくつか紹介し、その中から道路網に適したものがどのようなものか比較・考察する。次に、部分パスセットによる近似解法を利用して重要度の計算を行い、重要度を求める際に必要となる計算法を示す。また、パス選択方法による計算量・計算時間の変化や重要度の値の変化についても比較を行う。

5.2 システム信頼度の近似解法

5.2.1 Esary and Proschan の上・下限値

確率変数 $X_1, X_2, \dots, X_l$ が、すべての非減少な二値変数 f_1, f_2 に対して、

$$\text{cov}[f_1(X_1, \dots, X_l), f_2(X_1, \dots, X_l)] \geq 0, \quad (5.2.1)$$

が成り立つならば、関連性がある(associated)という。この性質を利用して次の上・下限値が導かれる^{2),3)}。なお、上・下限値とは、システムの信頼度がこの値以上でない、あるいはこの値以下でないことを保証する数値である。上限値、下限値をそれぞれ U_1, L_1 とすると、

$$U_1 = \prod_{s=1}^p \prod_{a \in P_s} r_a = 1 - \prod_{s=1}^p \left(1 - \prod_{a \in P_s} r_a \right), \quad (5.2.2)$$

$$L_1 = \prod_{s=1}^k \prod_{a \in K_s} r_a = \prod_{s=1}^k \left\{ 1 - \prod_{a \in K_s} (1 - r_a) \right\}, \quad (5.2.3)$$

で与えられ、

$$L_1 \leq R \leq U_1, \quad (5.2.4)$$

となる．これは，Esary and Proschan の上・下限界として知られているものである．

これは，上述のように関連性の概念から導かれたものであるが，形式上は式(3.3.16)，(3.3.17)でブール代数による項の整理をせずに，そのままユニットの信頼度 r_a を代入すれば，上・下限界が得られることを示している．

関連性の概念から導かれる上・下限界には他に以下のようなものがある⁴⁾．

$$L_2 = \prod_{a=1}^l r_a \leq R \leq \prod_{a=1}^l r_a = U_2, \quad (5.2.5)$$

$$L_3 = \max_{1 \leq s \leq p} \prod_{a \in P_s} r_a \leq R \leq \min_{1 \leq s \leq k} \prod_{a \in K_s} r_a = U_3. \quad (5.2.6)$$

式(5.2.5)で与えられる上・下限界は，そのシステムの信頼度が，同じユニット数からなる直列型システムと並列型システムの信頼度の中間値であるという意味と解釈できる．しかし，

$$L_2 \leq L_3 \leq U_3 \leq U_2, \quad (5.2.7)$$

が常に成立するので，式(5.2.6)による上・下限界の方が式(5.2.5)のものよりも優れている．

式(5.2.6)で与えられる上・下限界も関連性の概念から導かれたものである．最大の生起確率を与えるミニマルパスを下限界，最小の生起確率を与えるミニマルカットを上限界とする考え方と解釈できる．この方法では，上・下限界の幅が大きくなり，信頼度が1もしくは0の近傍での利用に限られるという制約がある．

5.2.2 含意排他公式を利用した上・下限界

式(3.3.8)，(3.3.10)を実際に計算するのは多大な時間がかかるので，途中の次数の項で打ち切るとシステム信頼度の上・下限界が得られる^{5),6)}．奇数項で停止すると上限値が，偶数項で停止すると下限値が得られる．この方法で近似値を求める方法である．すなわち，ミニマルパスに基づく式(3.3.8)では，奇数の次数の項で打ち切ると信頼度 R の上限値を，偶数の次数では下限値を与え，また，ミニマルカットに基づく式(3.3.10)では逆に，奇数次の項で打ち切ると下限値を，偶数次の項で打ち切ると上限値を与える．そして，ミニマルパスに基づく近似式はユニットの信頼度が低い場合，またミニマルカットに基づく近似式はユニットの信頼度が高い場合に高精度の近似を与えるとされている．なお，この上限および下限の列は必ずしも単調に収束するとは限らないが，実際的には数個の上限，下限を計算するだけで十分である場合が多いと報告されている⁷⁾．

以上述べたように，2点間のミニマルパス・カットをすべて必要とする近似解法を分類整理した．しかしながら，これらの方法を実際の道路網に適用するにはいくつかの問題点が生じる．まず第1の問題点は，パス・カット数がネットワークの拡大にともなっ

A diagram showing a 2D grid. It consists of a 4x4 grid of squares. The grid is defined by solid black lines. The horizontal lines are labeled 1, 2, 3, and 4 from bottom to top. The vertical lines are labeled 1, 2, 3, and 4 from left to right. The grid is divided into four quadrants by the central horizontal line (2) and the central vertical line (2). Two small circles are placed on the grid: one at the intersection of horizontal line 2 and vertical line 1, and another at the intersection of horizontal line 2 and vertical line 2. Dashed lines extend from the solid lines, forming a larger grid.

図 5-2-1 交通工学的意味の希薄なミニマルパス

5.2.3 部分的なミニマルパス・ミニマルカットセットを用いた近似解法⁸⁻¹⁵⁾

利用するミニマルパス・ミニマルカットセットを、全数ではなく一部を用いて計算する方法である。

ミニマルパス $P_1, P_2, \dots, P_p$ の集合を $\mathbf{P}$ 、ミニマルカット $K_1, K_2, \dots, K_k$ の集合を $\mathbf{K}$ とする。部分集合 $\mathbf{P}'$ 、 $\mathbf{K}'$ を $\mathbf{P}' \subseteq \mathbf{P}$ 、 $\mathbf{K}' \subseteq \mathbf{K}$ で定義し、その要素の個数を $p'(\leq p)$ 、 $k'(\leq k)$ とする。式(3.3.16)、(3.3.17)を $\mathbf{P}'$ 、 $\mathbf{K}'$ で評価すると、下限値 L_4 、上限値 U_4 を得ることができる¹⁶⁾。すなわち、

$$L_4 = E \left[\prod_{s=1}^{p'} \prod_{a \in P_s} X_a \right] = E \left[1 - \prod_{s=1}^{p'} \left(1 - \prod_{a \in P_s} X_a \right) \right], \quad (5.2.8)$$

$$U_4 = E \left[\prod_{s=1}^{k'} \prod_{a \in K_s} X_a \right] = E \left[\prod_{s=1}^{k'} \left\{ 1 - \prod_{a \in K_s} (1 - X_a) \right\} \right], \quad (5.2.9)$$

$$L_4 \leq R \leq U_4, \quad (5.2.10)$$

を得る。式(3.3.16)、(3.3.17)ではすべてのミニマルパス・カットを対象にブール演算を行うと信頼度 R の厳密値を得た。これに対し、式(5.2.8)、(5.2.9)では、一部のミニマルパス・カットを対象にブール演算を行うと、ミニマルパスに基づく式は信頼度の下限値を、ミニマルカットに基づく式は上限値を与えることを示している。パス・カットの数を多くするほどこれらの近似値は厳密値に近づく性質があり、すべてのパス・カットを用いると厳密値に一致するのは明らかである。

これらの方法は、いずれもシステム規模の拡大にともなって計算量や計算に必要な記憶容量が指数的に増加する。しかし、その増加要因は手法によって異なっている。式(3.3.6)を用いる事象空間法は、故障発生事象を総当たりで計算するため 2^l (l はリンク総数)に比例する計算時間が必要である。3.2.2の(2)および(4)の方法では、ミニマルパス数を p とすると $2^p - 1$ 個の項が発生するため、計算時間はこれに比例して増加する。3.3の(3)および(4)の方法ではミニマルカット数を k とすると、同様に計算時間は $2^k - 1$ に比例する。Fratta・Montanariの方法ではアルゴリズムの特性上 l^N (N はアルゴリズム中の反復回数)の計算時間が必要となる。以上のように、種々の信頼性解析法は計算量の増加要因によって分類可能である。つまり、解析に必要な計算量は、 $2^l, 2^p, 2^k, l^N$ のいずれかで説明できる。ここで、総リンク数 l は、与えられたネットワーク固有の数値であるので、 l に規定される方法では計算の実行可能性がネットワーク規模に制約されるという限界がある。これに対し、 p, k に規定される方法では、パス・カット数を操作変数とすることでネットワークの拡大に対処できるという利点がある。すなわち、パス・カット数を削減することで、計算量を指数的に減少させることが可能である¹⁶⁾。

筆者らの提案している信頼度の近似解法は、2点間のミニマルパス・カットのうち一部を選択する方法であり、計算量を大幅に短縮可能とする点で極めて有効である。

5.3 近似解法の必要性と計算時間

5.3.1 部分パスセット選択による近似解法の例

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¹⁸⁾。

例えば、田の字型ネットワーク(図 4-3-2)でノード 1, 9 間の信頼度を計算する際、パスを 3 本だけ用いると $(\{1,2,5,10\}, \{1,4,9,12\}, \{3,8,11,12\})$, ノード間信頼度の近似値を下記のような式で求めることができるが、

$$\begin{aligned} R(\mathbf{r}) &= E\left[1 - \prod_{s=1}^p \left(1 - \prod_{a \in P_s} X_a\right)\right] \\ &= E[1 - (1 - X_1 X_2 X_5 X_{10})(1 - X_1 X_4 X_9 X_{12})(1 - X_3 X_8 X_{11} X_{12})] \end{aligned} \quad (5.3.1)$$

同一リンクが含まれているので、確率の重複計算を避けるため論理積に関するブール演算 $(X_a \cdot X_a = X_a)$ が必要となる。そのため、ネットワークが大規模になると膨大な計算が必要となる。ここで、ミニマルパスに基づく式を具体的に示すと以下のようになる。ミニマルパスを、

$$a_s = \prod_{a \in P_s} X_a \quad (5.3.2)$$

で表すとノード間信頼度の厳密値 R は、

$$R = E[1 - (1 - a_1)(1 - a_2) \cdots (1 - a_p)]. \quad (5.3.3)$$

式(5.3.3)を展開すると項の数は $2^p - 1$ 個となる。ここで、パスの数を 1 個減らせば、この部分の計算量はほぼ 1/2 で済む。以下同様に、パスの数の減少に従って、計算量を 1/2 ずつ指数的に減少させることができる。したがって、信頼度 R の値への寄与が大きい一部のミニマルパスで計算すれば、非常に効率よく信頼度を計算できることになる¹⁷⁾。表 5-3-1 は、田の字型ネットワーク(図 4-3-2, 図 5-3-1)でのパス数に応じた CPU-Time を示したものである。

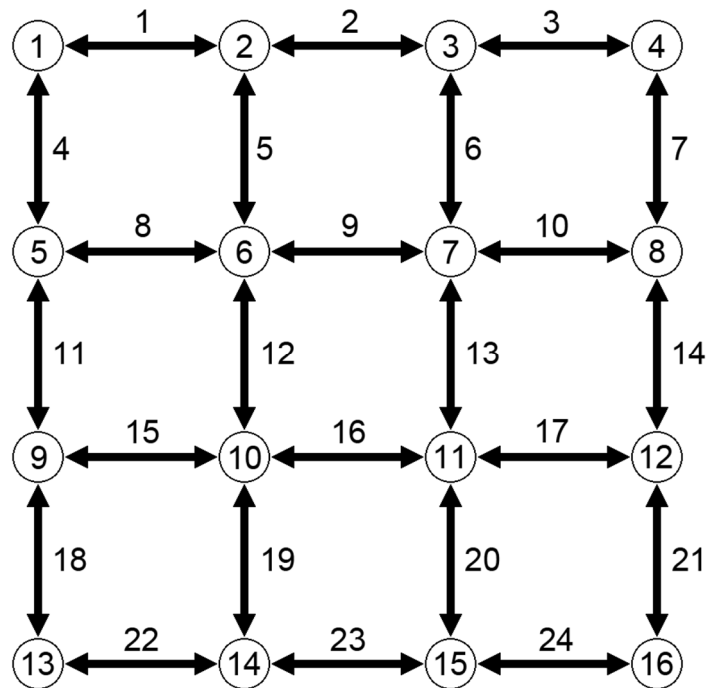


図 5-3-1 田の字型ネットワーク(3×3)

CPU-Time は、主に『コンパイル時間』と『データの read と write』、および『計算時間』で構成される．計算時間が小さい場合は、前者 2 つで支配され、CPU-Time は、大きく増加することはない．システム規模が拡大し『計算時間』が卓越してくると、計算時間が計算対象の特性（本研究では、2 の累乗）に依存する．表 5-3-1 においても、パス数が少ないうちは CPU-Time にほぼ変化はないが、計算量の指数的な増大によって『計算時間』がほぼ倍々に増えていくことがわかる．図 5-3-2 は、表 5-3-1 をそれぞれグラフで表したものである．

表 5-3-1 田の字型ネットワークにおけるパス数と CPU-Time(秒)の関係

パス数	2×2	3×3
2	0.001333	1
3	0.001333	1
4	0.001667	1
5	0.002000	1
6	0.002667	1
7	0.004000	1
8	0.006333	1
9	0.012667	1
10	0.025333	1
11	0.061667	1
12	0.126667	1
13		1
14		1
15		1
16		3
17		7
18		13
19		23
20		53
21		111
22		234
23		485
24		1024

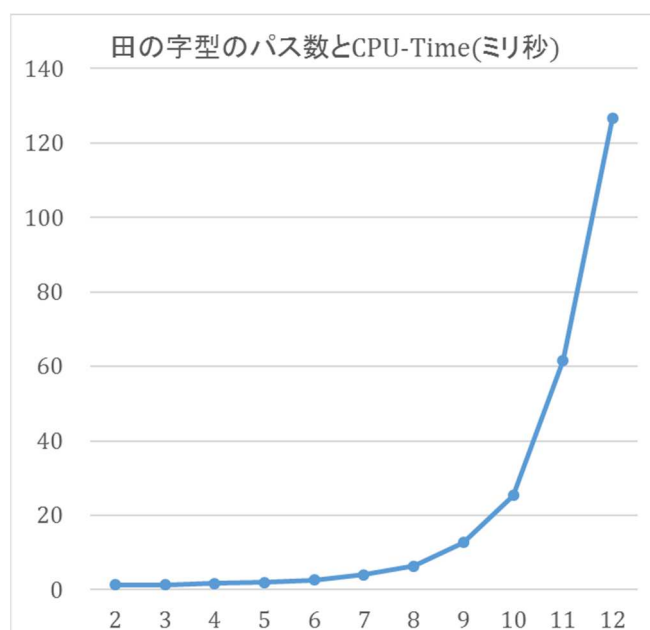


図 5-3-2 (a) パス数と計算時間の関係

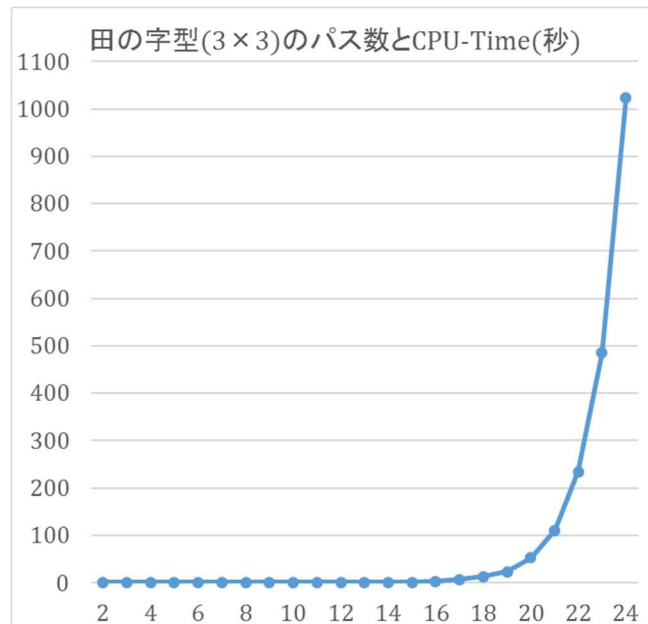


図 5-3-2 (b) パス数と計算時間の関係

5.3.2 部分パスセット選択で計算に必要となるパス数¹⁸⁾

道路網の連結信頼性を計算する際、近似解法に必要なことは各リンクの重要度の順位に変動がないことである。それについて検討したものが図 5-3-3 である。

図 5-3-3 のグラフは、生起確率順と距離順のパスの順位の比較を表したものである(5組のうち1組目のみ抜粋)。右端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 5-3-4 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。右端が厳密値であり、こちらは5組分すべてを記載している。

図 5-3-3 を見ると、全リンクが含まれる7パス程度までならノード間信頼度の近似値にはあまり変化がなく、また生起確率順と距離順でもほとんど差がないことがわかる。

図 5-3-4 を見ると、ノード間信頼度の近似値は生起確率順の方がパスを減じていった際の厳密値との差が少ない傾向にあるが、7パス程度までなら両者にほとんど違いはないともいえる。

したがって、すべてのリンクが含まれる範囲でパス数を減じるのであれば、生起確率順のみならず距離順でも実用可能であることを示唆している。

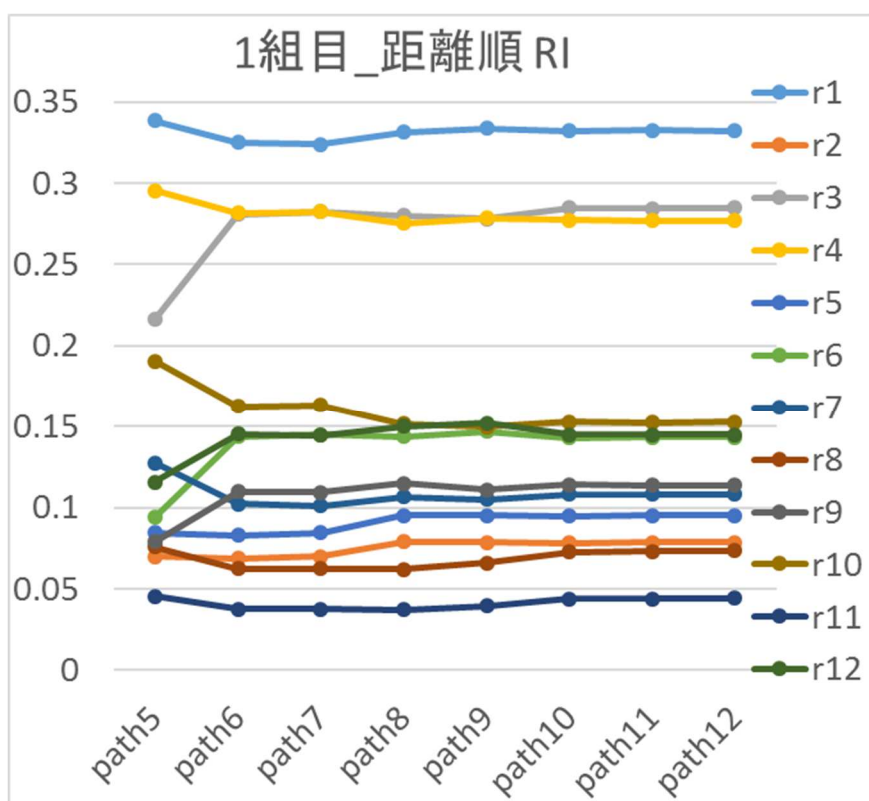
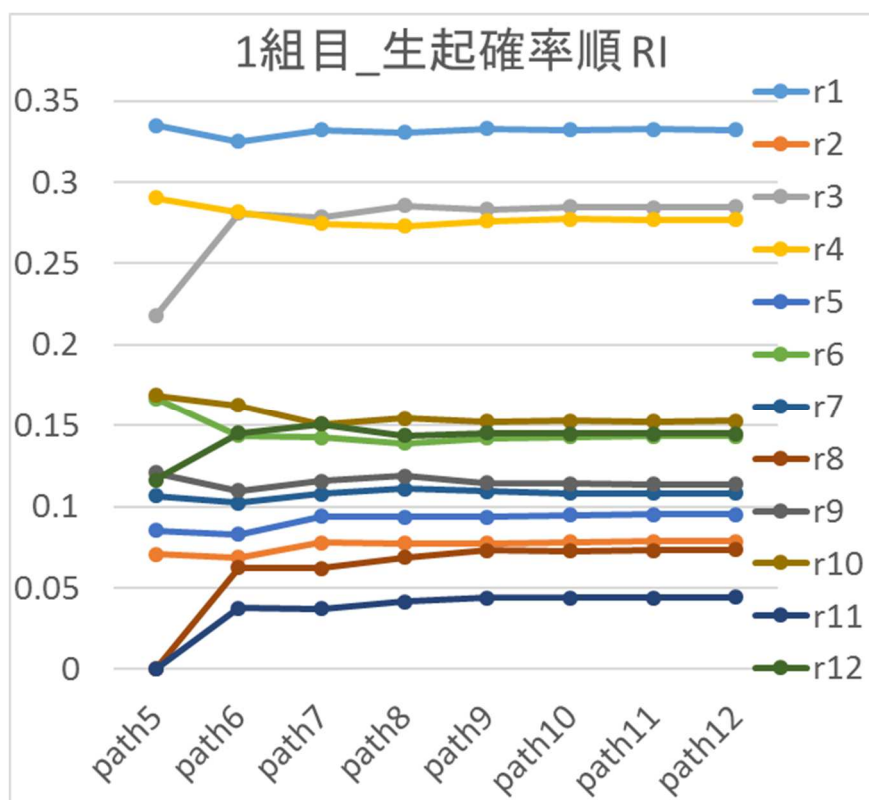


図 5-3-3 (a) 生起確率順と距離順のパスの順位の比較

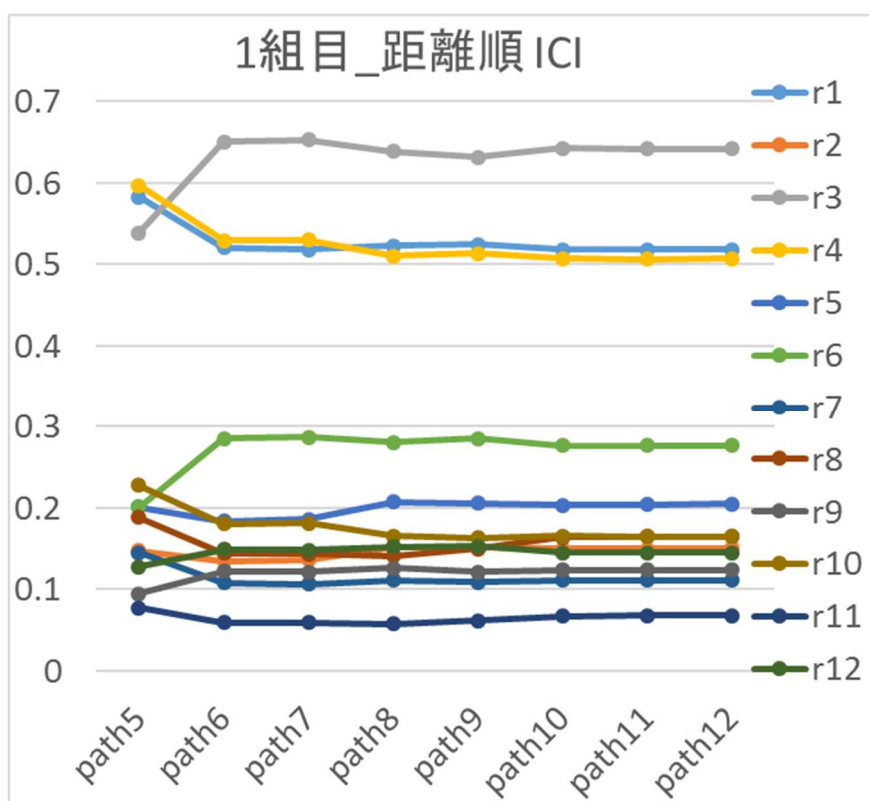
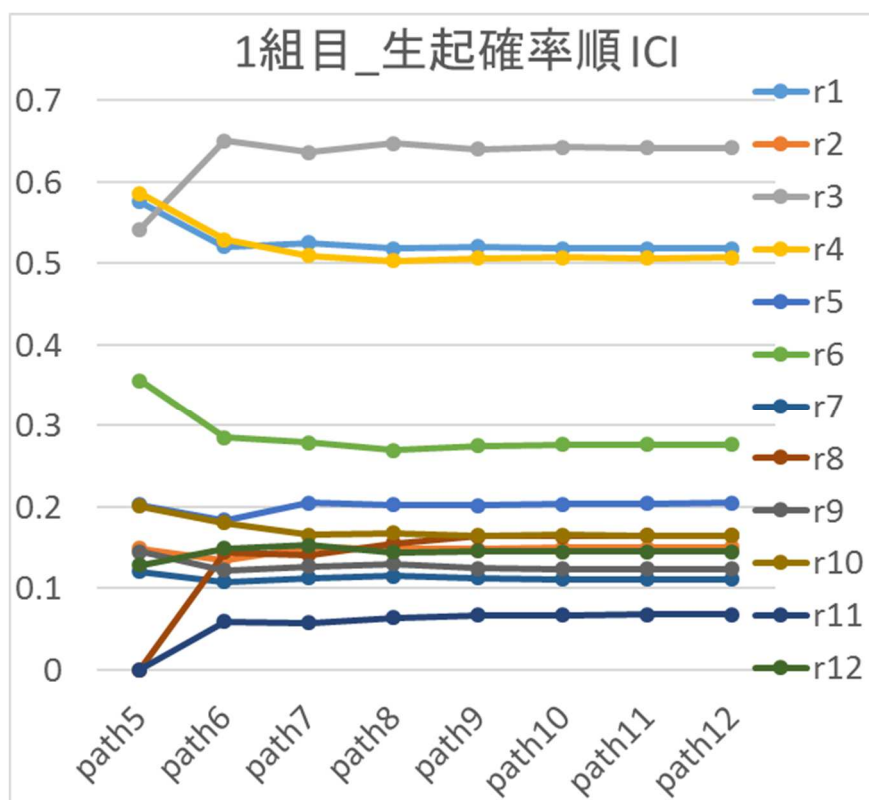


図 5-3-3 (b) 生起確率順と距離順のパスの順位の比較

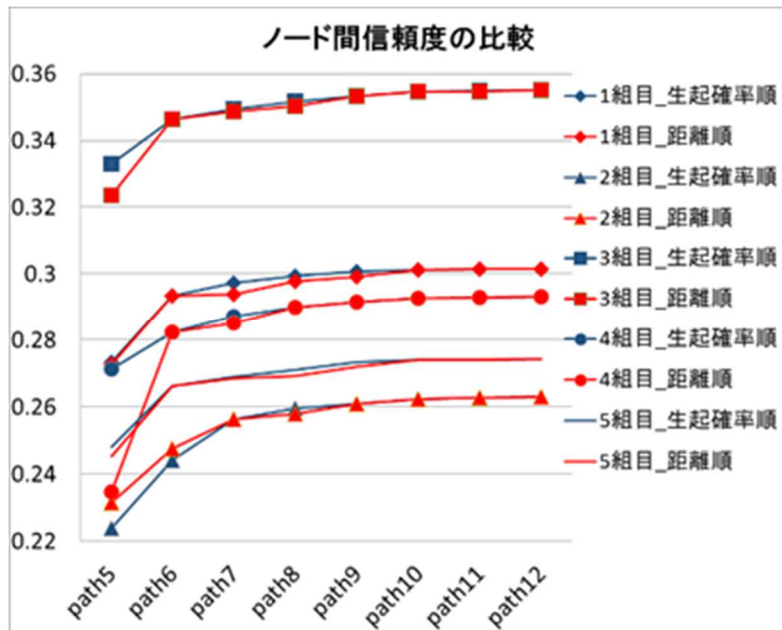


図 5-3-4 生起確率順と距離順のノード間信頼度の近似値比較

5.3.3 パスセット選択方法による計算時間の比較

前節で、部分パスセット選択の近似解法を用いる際に必要となるパス数を検証した。それを踏まえ、今回新たに具体的な計算時間とパス選択方法が計算時間に影響を与えているかどうかを検証する。パス選択方法が計算時間に影響を与えている、というのは以下の2点の可能性があるのである。

まず、パス数が同じであっても各々のパスの中に含まれるリンクの数が少なければ計算時間が短くなるという点である。次に、コンピュータ上でブール演算を行い、式を展開する際に出発地からリンクを見てパス同士で同じリンクを使用している方が計算時間が短くなるという点である。

この2点を検証するために、田の字型ネットワーク(図 4-3-2, 図 5-3-1)において複数のパス選択方法を用いてノード間信頼度の計算時間を計測した。

まず、図 4-3-2 のネットワーク上でのパス選択方法を表 5-3-2 に示す。①は、1本のパスに含まれるリンクの数が少ないものからパスを選択したものである。②は、出発地より数えてリンク番号の小さい順にパスを並べたものである。

その結果、どちらの方法でも計算時間にそれほどの差は見られないことが判明した(図 5-3-5)。グラフの横軸がパス数、縦軸が計算時間である。パスを1本ずつ減らすごとに計算時間が約半分になるのも従来どおりである。パス12本、つまり厳密値での計算時間に若干の差が出ているが、パスの選択方法が影響しているわけではないことに留意したい。

表 5-3-2 田の字型 (2×2) のパス選択方法

パス選択方法①	パス選択方法②
1 2 5 10	1 2 5 10
3 8 11 12	1 2 5 6 7 8 11 12
1 4 7 10	1 2 5 7 9 12
3 6 7 10	1 4 6 8 11 12
1 4 9 12	1 4 7 10
3 6 9 12	1 4 9 12
2 3 4 5 6 10	2 3 4 5 6 10
1 2 5 7 9 12	2 3 4 5 8 9 10 11
1 4 6 8 11 12	3 6 7 10
3 7 8 9 10 11	3 6 9 12
1 2 5 6 7 8 11 12	3 7 8 9 10 11
2 3 4 5 8 9 10 11	3 8 11 12

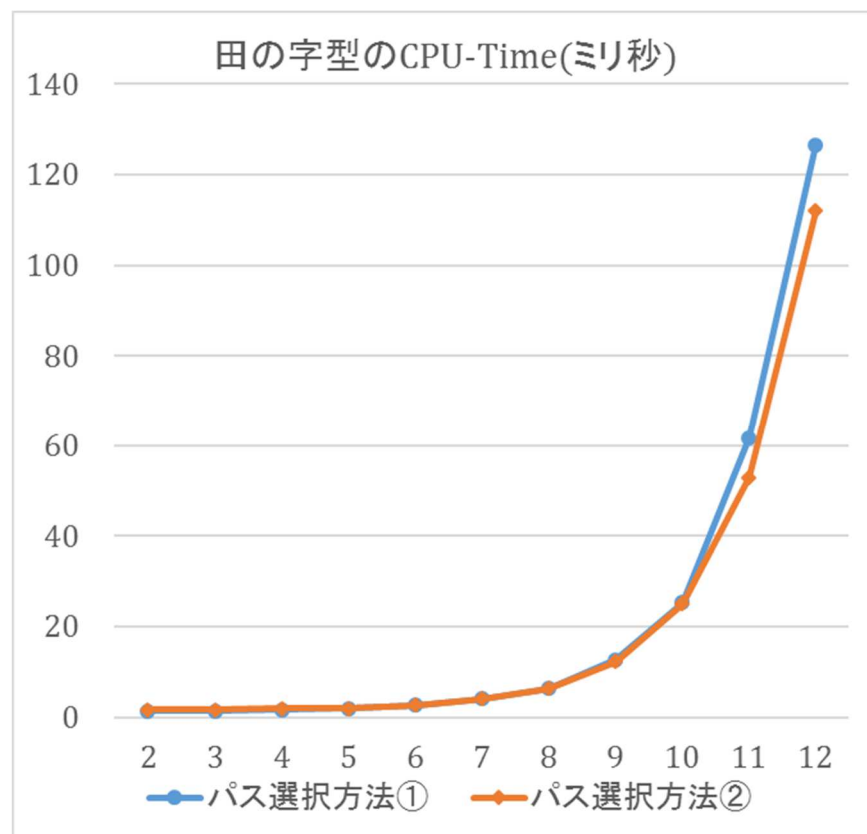


図 5-3-5 パス選択方法別の近似解法の計算時間

表 5-3-3 田の字型(3×3)のパス選択方法

パス選択方法①-1.	パス選択方法①-2.
1 2 3 7 14 21	1 2 3 7 14 21
1 2 6 10 14 21	1 2 6 10 14 21
1 2 6 13 20 24	1 2 6 13 20 24
1 2 6 13 17 21	1 2 6 13 17 21
1 5 9 10 14 21	1 5 9 10 14 21
1 5 9 13 17 21	1 5 9 13 17 21
1 5 9 13 20 24	1 5 9 13 20 24
1 5 12 16 17 21	1 5 12 16 17 21
1 5 12 16 20 24	1 5 12 16 20 24
1 5 12 19 23 24	1 5 12 19 23 24
4 11 18 22 23 24	4 11 18 22 23 24
4 11 15 19 23 24	4 11 15 19 23 24
4 11 15 16 17 21	4 11 15 16 17 21
4 11 15 16 20 24	4 11 15 16 20 24
4 8 12 19 23 24	4 8 12 19 23 24
4 8 12 16 20 24	4 8 12 16 20 24
4 8 12 16 17 21	4 8 12 16 17 21
4 8 9 13 20 24	4 8 9 13 20 24
4 8 9 13 17 21	4 8 9 13 17 21
4 8 9 10 14 21	4 8 9 10 14 21
1 2 3 7 14 17 20 24	1 2 3 7 14 17 20 24
1 2 3 7 10 13 20 24	4 11 18 22 23 20 17 21
1 2 3 7 10 13 17 21	1 5 8 11 15 16 17 21
1 2 6 10 14 17 20 24	4 8 5 2 6 13 20 24
パス選択方法②-1.	パス選択方法②-2.
1 2 3 7 14 21	1 2 3 7 14 21
1 2 3 7 14 17 20 24	4 11 18 22 23 24
1 2 3 7 14 17 16 19 23 24	1 2 6 10 14 21
1 2 6 10 14 21	4 11 15 19 23 24
1 2 6 10 14 17 20 24	1 5 9 6 3 7 14 21
1 2 6 10 14 17 16 19 23 24	4 8 12 15 18 22 23 24
1 5 8 11 15 16 17 21	1 2 3 7 14 17 20 24
1 5 8 11 15 16 13 10 14 21	4 11 18 22 23 20 17 21
1 5 8 11 15 16 13 6 3 7 14 21	1 2 6 10 14 17 20 24
1 5 9 6 3 7 14 21	4 11 15 19 23 20 17 21
1 5 9 6 3 7 14 17 20 24	1 5 8 11 15 16 17 21
1 5 9 6 3 7 14 17 16 19 23 24	4 8 5 2 6 13 20 24
4 11 18 22 23 24	1 2 3 7 14 17 16 19 23 24
4 11 18 22 23 20 17 21	4 11 18 22 23 20 13 10 14 21
4 11 18 22 23 20 13 10 14 21	1 2 6 10 14 17 16 19 23 24
4 11 15 19 23 24	4 11 15 19 23 20 13 10 14 21
4 11 15 19 23 20 17 21	1 5 8 11 15 16 13 10 14 21
4 11 15 19 23 20 13 10 14 21	4 8 5 2 6 13 16 19 23 24
4 8 5 2 6 13 20 24	1 5 9 6 3 7 14 17 20 24
4 8 5 2 6 13 16 19 23 24	4 8 12 15 18 22 23 20 17 21
4 8 5 2 6 13 16 15 18 22 23 24	1 5 8 11 15 16 13 6 3 7 14 21
4 8 12 15 18 22 23 24	4 8 5 2 6 13 16 15 18 22 23 24
4 8 12 15 18 22 23 20 17 21	1 5 9 6 3 7 14 17 16 19 23 24
4 8 12 15 18 22 23 20 13 10 14 21	4 8 12 15 18 22 23 20 13 10 14 21

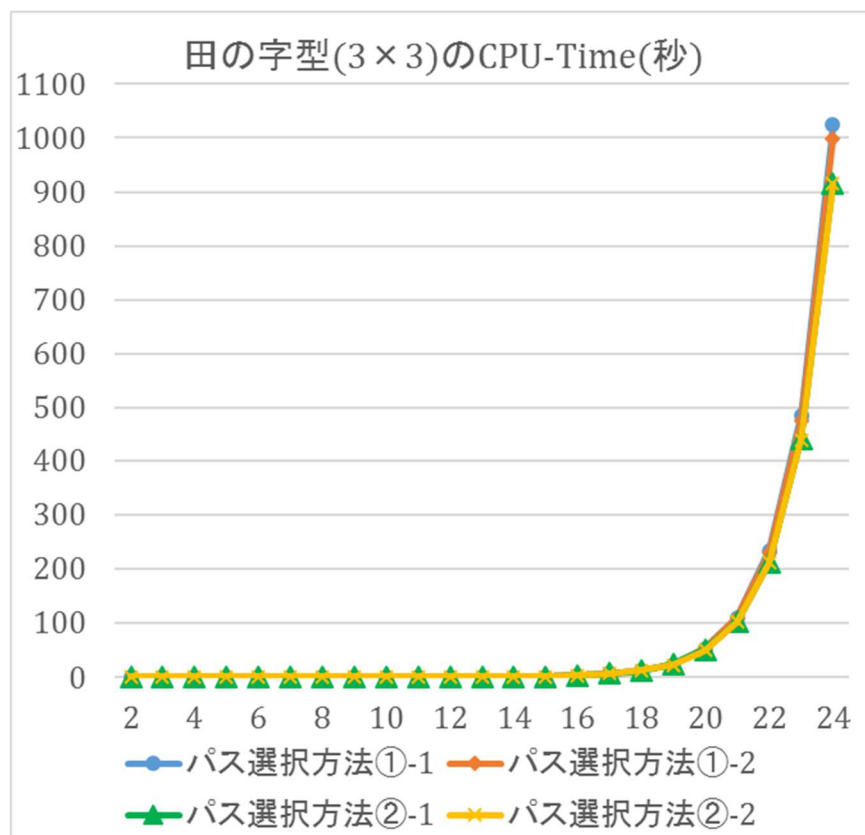


図 5-3-6 パス選択方法別の近似解法の計算時間(3×3)

それについては、田の字型ネットワーク(3×3)(図 5-3-1)の結果と比較することで理解が可能となる。

田の字型ネットワーク(3×3)(図 5-3-1)では、すべてのリンクが最低でも1回以上は出現し、かつパスの数が少なくなるようにパス選択方法を行った(表 5-3-3)。3×3では、総パス数は184本であるが、今回使用したのはそのうち24本である。

①-1は、1本のパスに含まれるリンクの数が少ないものからパスを選択したものである。①-2は、①-1とほぼ同じだが、全体として出発地のリンクが均等になるようにしたものである。②-1は、出発地より数えてリンク番号の小さい順にパスを並べたものである。②-2は、リンクの数が少なく、かつ出発地のリンクが交互になるように並べたものである。

その結果、どの方法でも計算時間にそれほどの差は見られないことが判明した(図 5-3-6)。図 4-3-2のネットワークでは、リンクの数を少なくしたパス選択方法が計算時間が若干短かったが、図 5-3-6を見るとリンクの数を少なくした①-1はむしろ他の方法

に比べて計算時間が若干長くなっている。したがって、部分パスセットによる近似解法の計算時間はあくまで使用するパス数に依存するのであって、その中でのリンク数には影響されないことが判明した。この結果より、部分パスセット選択の方法として、従来からある生起確率順・距離順を使用することには問題がないともいえる。

図 5-3-1 のネットワークでもパス数が 24 の場合で CPU-Time は約 20 分であり、25, 26, ... の場合はその倍々で増加し、31 本で 2560 分となり、1 日 = 1440 分を超える。このネットワークで厳密値を得るには、最短ルート (6 リンク使用) のみでもパス総数が 20 本 (計算時間約 1 分)、8 リンク使用のルートのみでも 36 本 (計算時間 56 日以上) となり、きわめて長大となる。最新鋭、最速のコンピュータを用いてもこの結果であるから、時間がかかっても少なくとも翌日には計算結果を得たい場合には、実用に耐えない。

したがって、依然として道路網の信頼性の計算には近似解法が必要であることがわかる。

5.4 パスセット選択方法による重要度の順位の変動

前節までで、パスセット選択方法によって CPU-Time が変化するかどうかを確認した。計算時間の短縮に関しては、パスセット選択の方法は生起確率順・距離順ともに使用可能であるといえる。

次に、ノード間信頼度の厳密値が計算不可能な規模のネットワークで、部分パスセット選択による信頼度計算および重要度の計算を行う。ここでも、重要度の順位に変動がなければ近似解を計算するのに必要なパス数が判明することになる。

今回新たに、Sioux Falls ネットワーク (図 4-3-5) で部分パスセット選択を行い、重要度指標 (RI , ICI) の計算を行った。パス選択方法は、前節の田の字型ネットワークでの近似解法の結果から、すべ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 4-3-5) の 24 パスで、以下の 3 つの方法でパス選択を行った (表 5-4-1)。

(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 1 本置きにパスを選んですべてのリンクが含まれるように 25 本のパスを選択する。

(b) パス選択方法 II

距離の短い経路 (パス) から順に並べて、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 25 本のパスを選択する.

(c) パス選択方法Ⅲ

距離の短い経路(パス)から順に並べて, パスを選択する. 同じ距離のパスから 2 本ずつ, かつ起点に近いリンクから見て異なる経路のパスを選んですべてのリンクが含まれるように 25 本のパスを選択する.

リンク信頼度の値は, 最小値と最大値の差が大きいもの($0.3 \leq r < 0.7$)と, 差が小さいもの($0.4 \leq r < 0.6$), 値が中くらいのもの($0.5 \leq r < 0.7$), 実際のリンク信頼度に近いと考えられる値($0.95 \leq r < 0.99$)を用意しその範囲内で乱数を発生させるものとした.

表 5-4-1 (a) Sioux Falls ネットワークでのパス選択方法 I

パス選択方法 I													
1	3	10	14	29	31								
1	3	10	14	28	30	32							
2	4	7	16	19	30	32							
2	4	7	21	24	27	34							
2	5	20	16	18	29	31							
2	5	20	21	24	26	32							
2	5	20	21	25	37	34							
1	3	8	9	13	14	29	31						
1	3	10	13	15	17	27	34						
1	3	10	13	15	19	30	32						
1	3	10	14	18	17	27	34						
2	4	6	8	10	11	12	31						
2	4	6	9	13	11	12	31						
2	4	6	9	15	17	27	34						
2	4	6	9	15	19	30	32						
2	4	7	16	19	28	29	31						
2	4	7	21	25	38	36	33						
2	4	7	20	22	23	36	33						
2	5	20	16	19	28	29	31						
2	5	20	21	25	38	36	33						
1	3	8	6	7	16	19	30	32					
1	3	8	6	7	21	24	27	34					
1	3	8	9	13	14	28	30	32					
1	3	10	13	15	17	27	35	33					
1	3	10	13	15	19	28	29	31					

表 5-4-1 (b) Sioux Falls ネットワークでのパス選択方法Ⅱ

パス選択方法Ⅱ														
2	4	7	16	19	30	32								
2	5	22	23	36	33									
2	4	7	16	19	30	26	27	34						
1	3	10	14	29	31									
1	3	10	13	15	17	27	34							
1	3	10	13	15	17	26	32							
2	4	7	16	19	28	29	31							
1	3	10	13	15	19	30	26	27	34					
1	3	8	9	13	11	12	31							
1	3	8	6	7	16	19	30	32						
1	3	8	6	7	21	24	26	32						
1	3	10	13	15	19	28	29	31						
1	3	8	6	7	16	19	30	26	27	34				
2	4	7	21	24	17	18	29	31						
1	3	8	6	4	5	20	16	17	27	34				
1	3	8	6	4	5	22	23	36	33					
2	4	7	21	24	17	19	28	29	31					
1	3	8	6	4	5	20	16	19	30	26	27	34		
1	3	8	6	4	5	20	16	18	29	31				
1	3	8	6	7	20	22	23	38	37	34				
1	3	8	6	7	20	22	23	38	37	35	33			
1	3	8	6	4	5	20	16	19	28	29	31			
1	3	8	6	4	5	20	16	19	30	26	24	25	37	34
2	5	22	23	36	35	27	17	18	29	31				
1	3	8	6	4	5	20	21	24	17	19	30	32		

表 5-4-1 (c) Sioux Falls ネットワークでのパス選択方法Ⅲ

パス選択方法Ⅲ														
2	4	7	16	19	30	32								
2	5	20	16	19	30	32								
2	5	22	23	36	33									
1	3	10	14	28	30	32								
2	4	7	16	19	30	26	27	34						
2	5	20	16	19	30	26	27	34						
1	3	10	14	29	31									
2	4	7	16	18	29	31								
1	3	10	13	15	17	27	34							
2	4	7	21	25	38	36	35	34						
1	3	10	13	15	17	26	32							
2	4	7	20	22	23	36	33							
2	4	7	16	19	28	29	31							
2	4	7	16	19	30	26	24	25	37	34				
1	3	10	13	15	19	30	26	27	34					
2	4	7	16	15	13	11	12	31						
1	3	8	9	13	11	12	31							
2	4	7	21	24	17	19	30	32						
1	3	8	6	7	16	19	30	32						
2	4	7	21	24	17	18	28	30	32					
1	3	8	6	7	21	24	26	32						
2	4	7	16	19	28	14	11	12	31					
1	3	10	13	15	19	28	29	31						
2	5	20	7	6	9	15	19	30	26	27	34			
1	3	8	6	7	16	19	30	26	27	34				

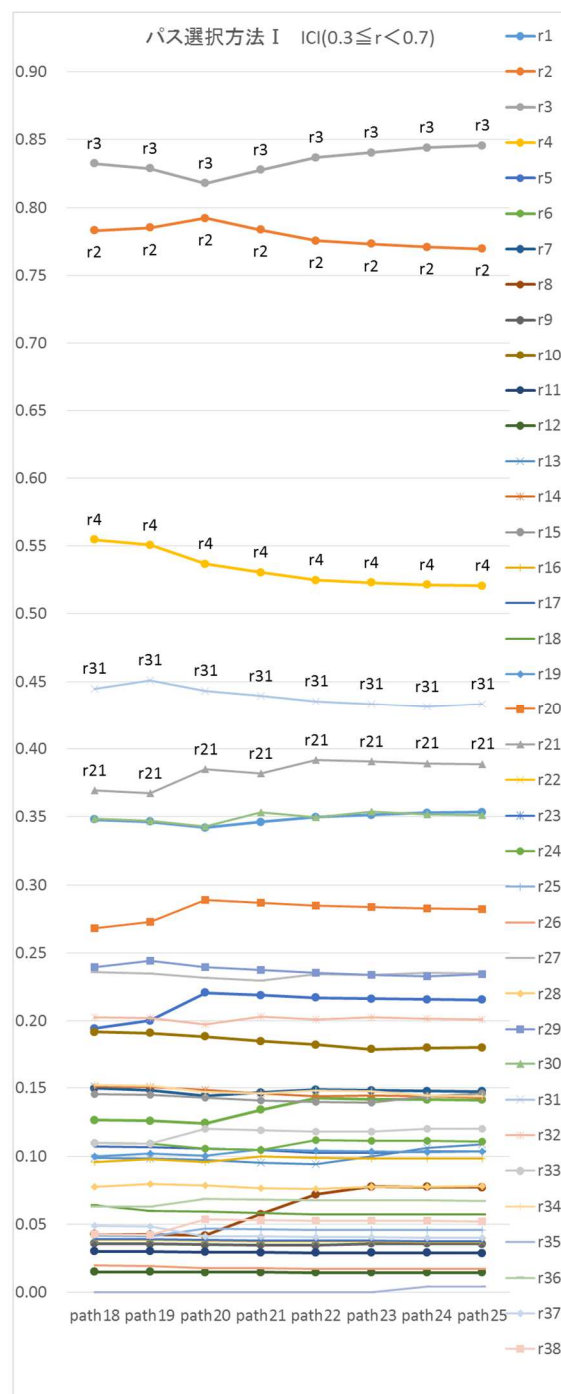
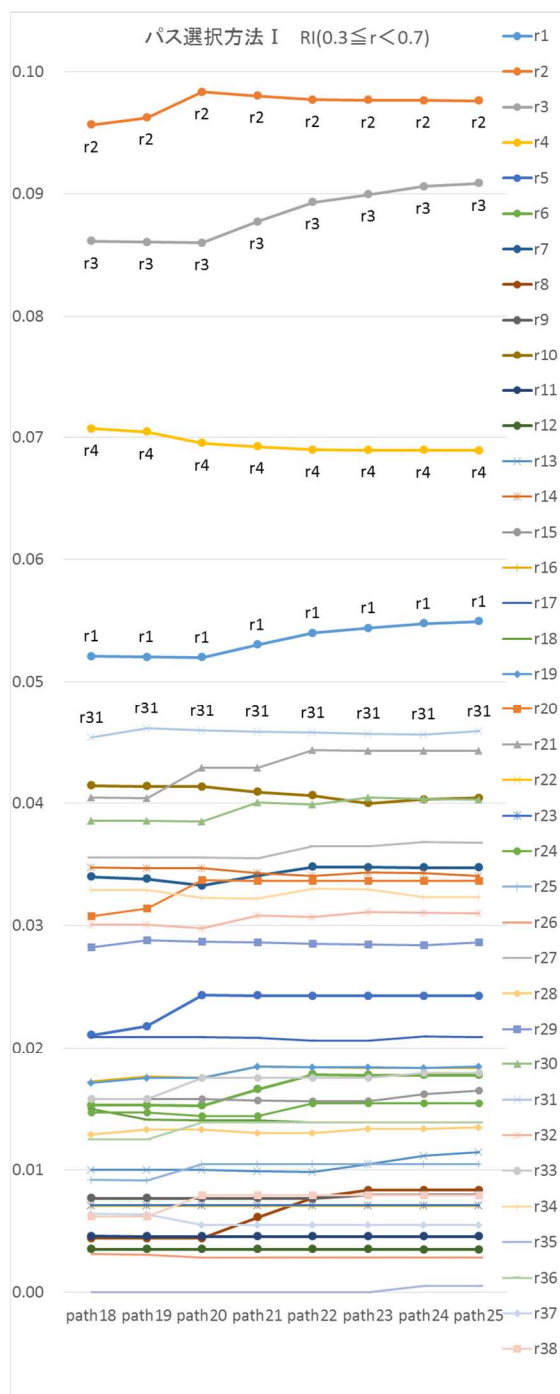


図 5-4-1 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法 I $0.3 \leq r < 0.7$)

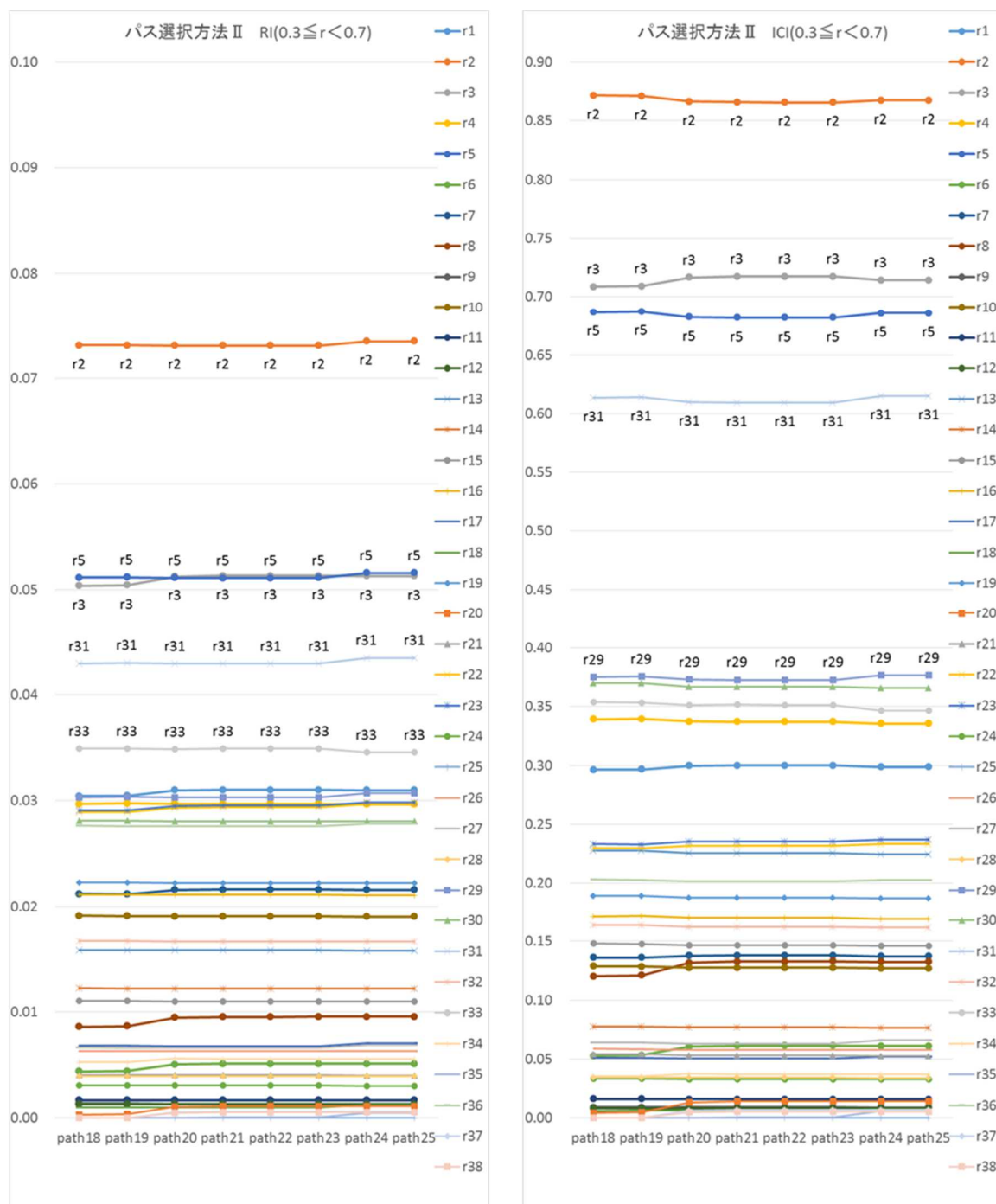


図 5-4-2 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法Ⅱ $0.3 \leq r < 0.7$)

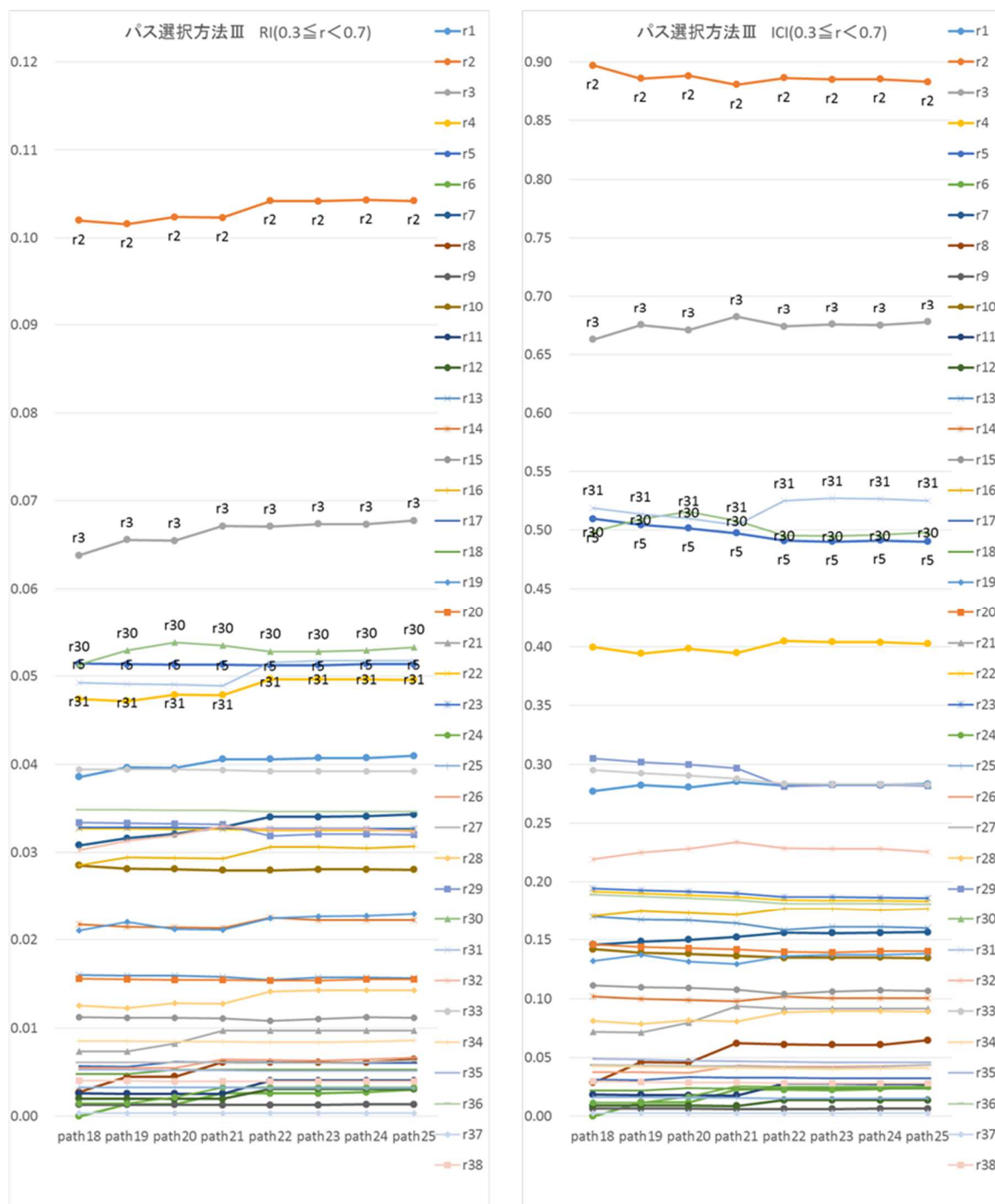


図 5-4-3 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法Ⅲ $0.3 \leq r < 0.7$)

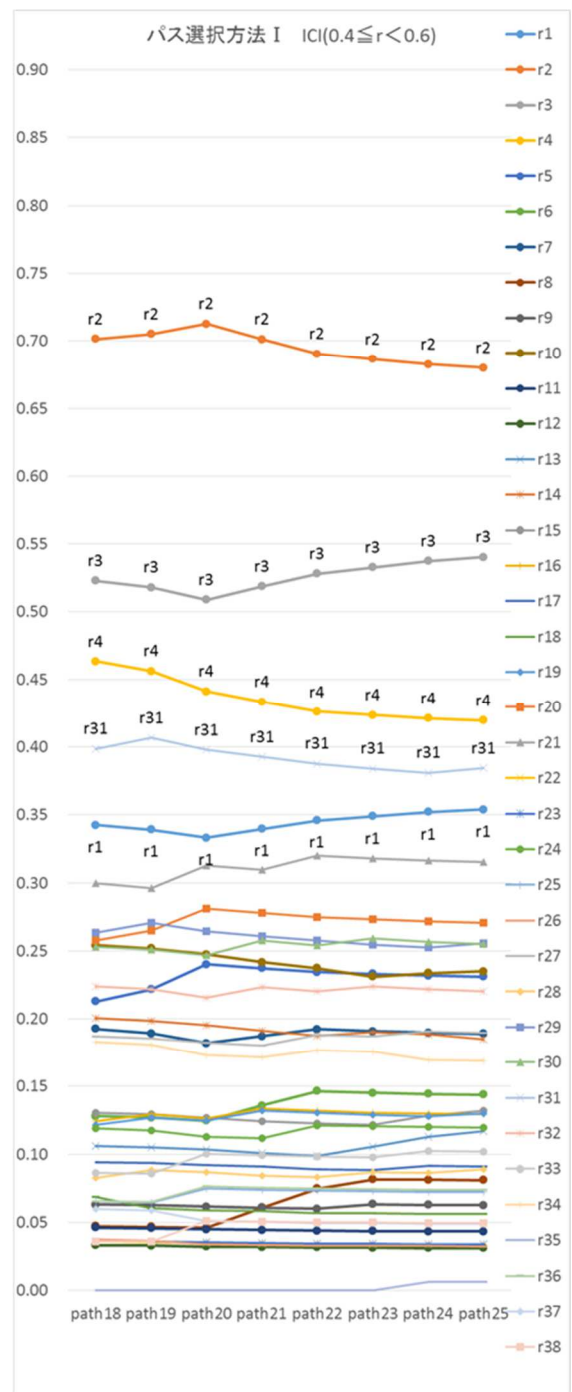
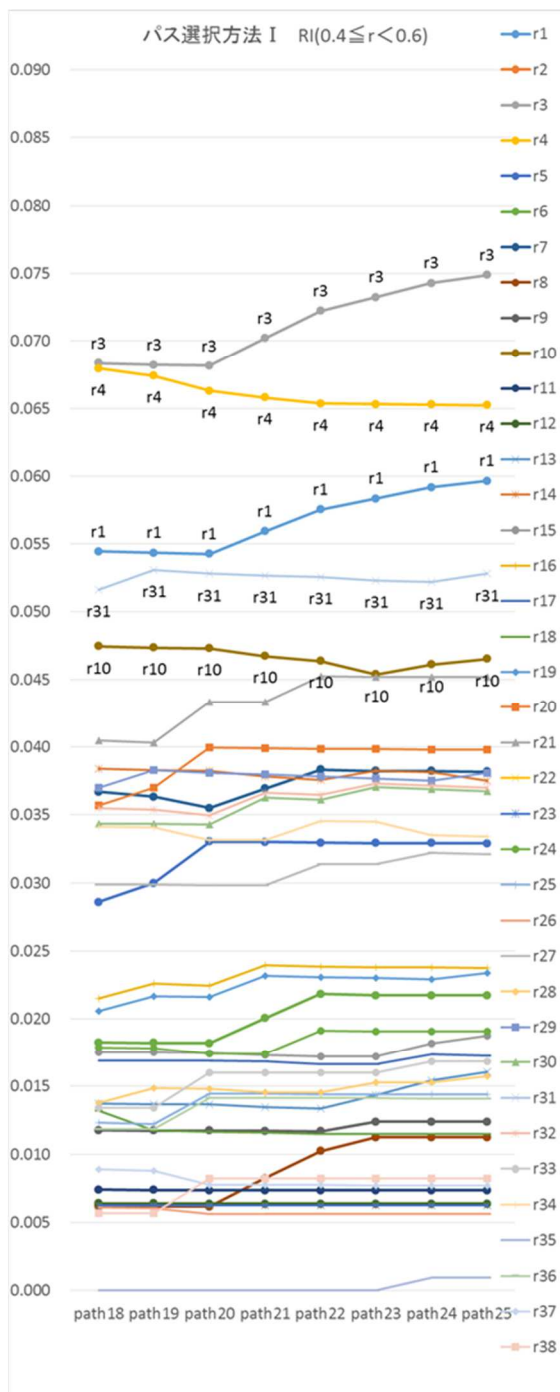


図 5-4-4 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法 I $0.4 \leq r < 0.6$)

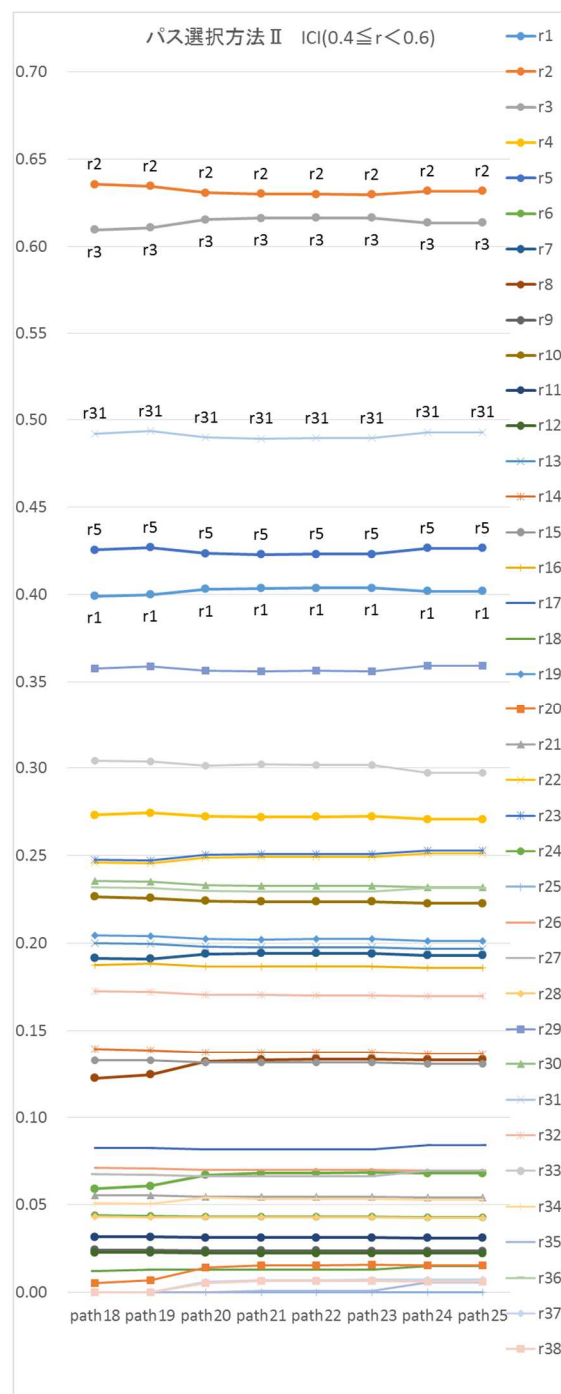
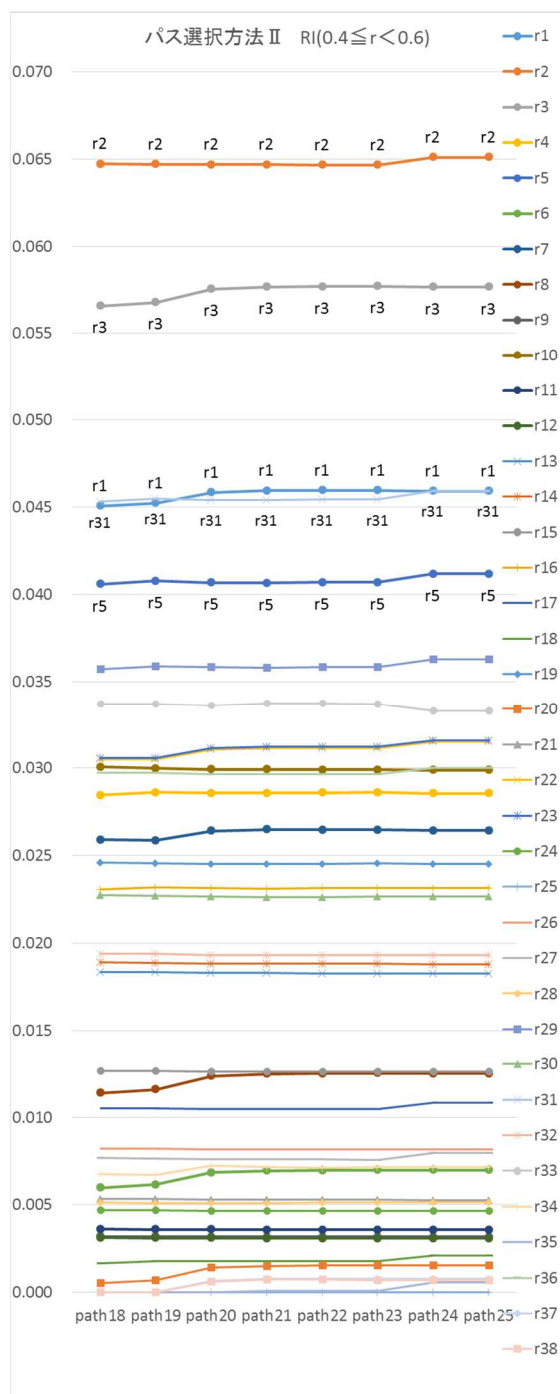


図 5-4-5 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法Ⅱ $0.4 \leq r < 0.6$)

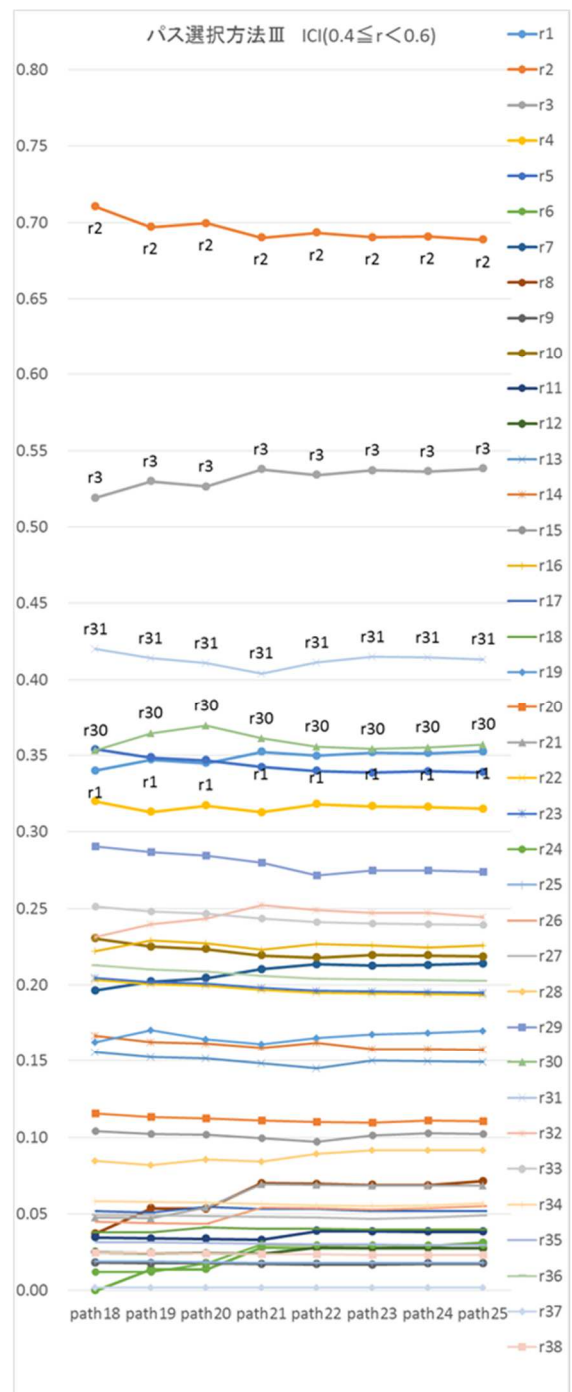
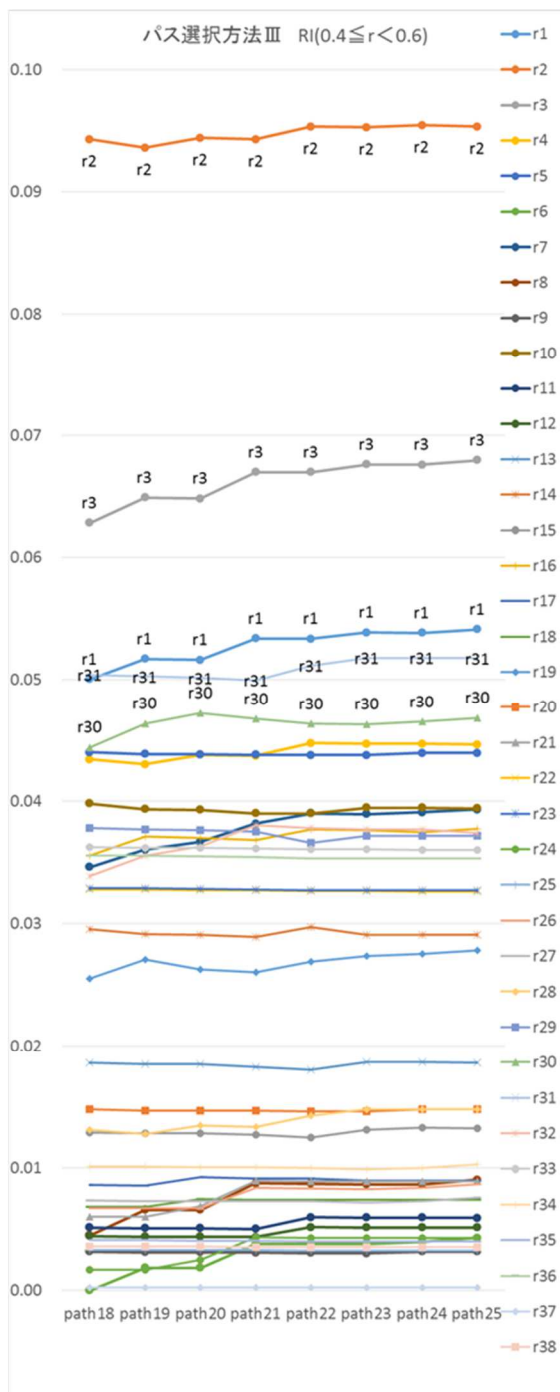


図 5-4-6 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法Ⅲ $0.4 \leq r < 0.6$)

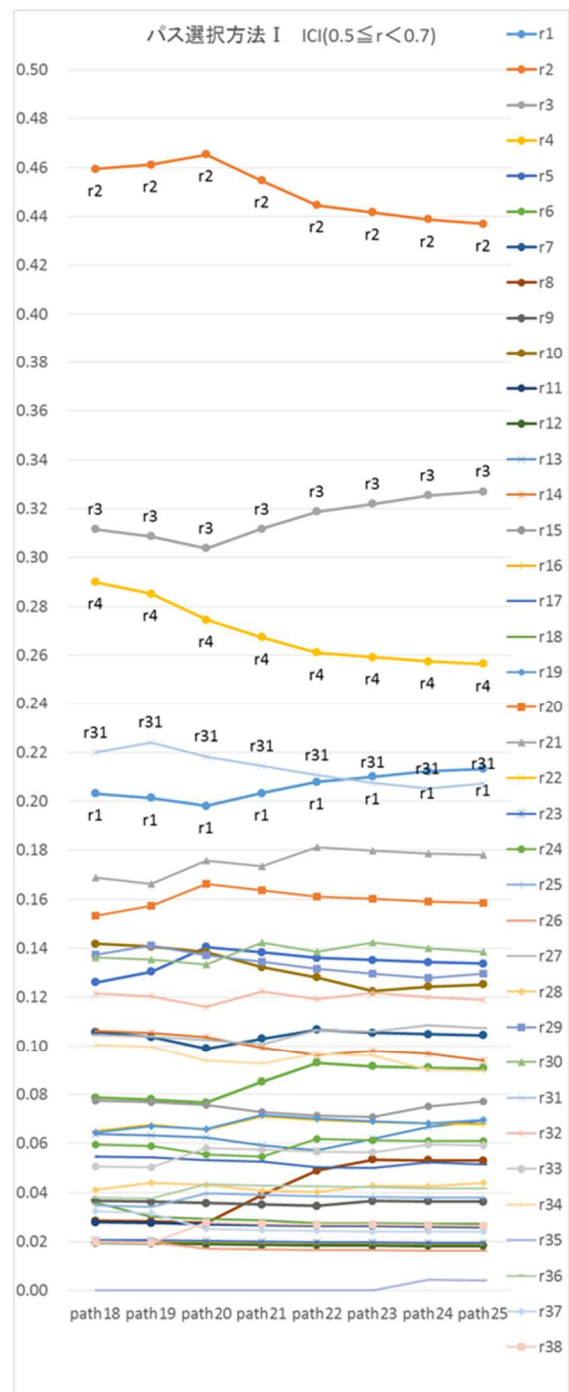
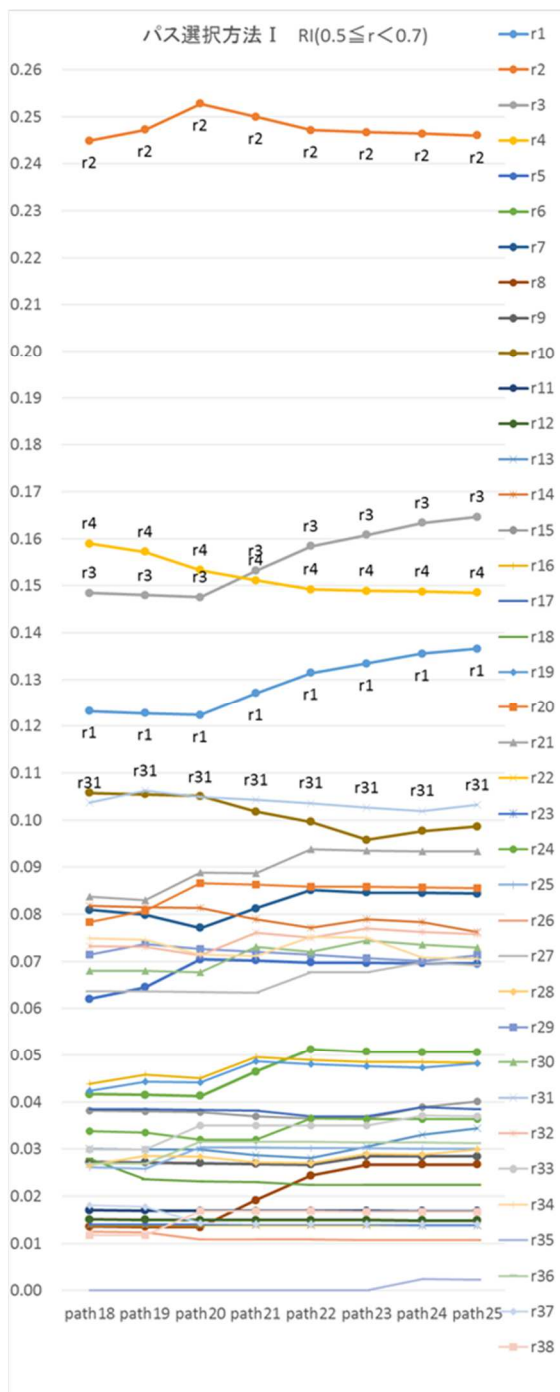


図 5-4-7 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法 I $0.5 \leq r < 0.7$)

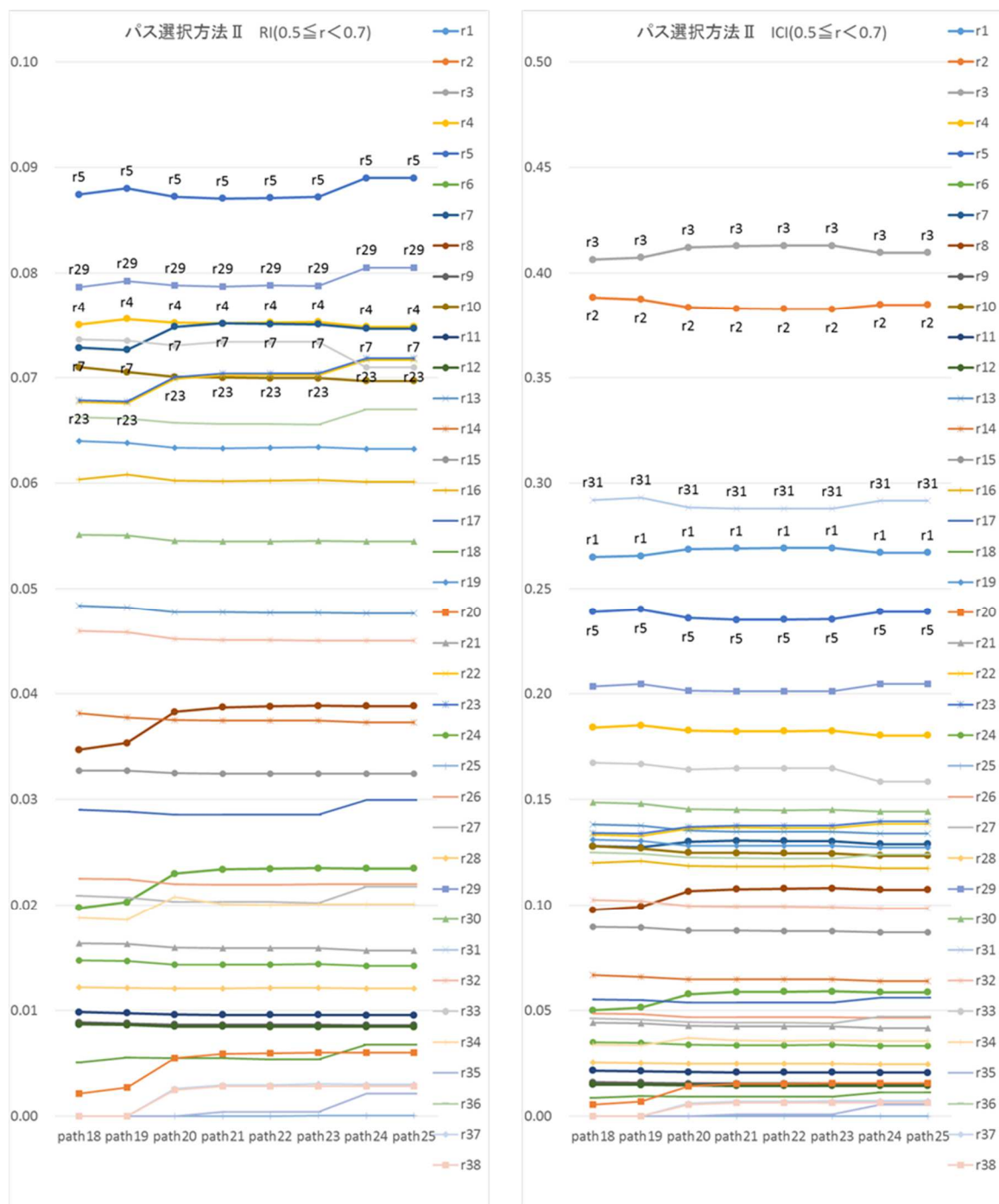


図 5-4-8 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法Ⅱ $0.5 \leq r < 0.7$)

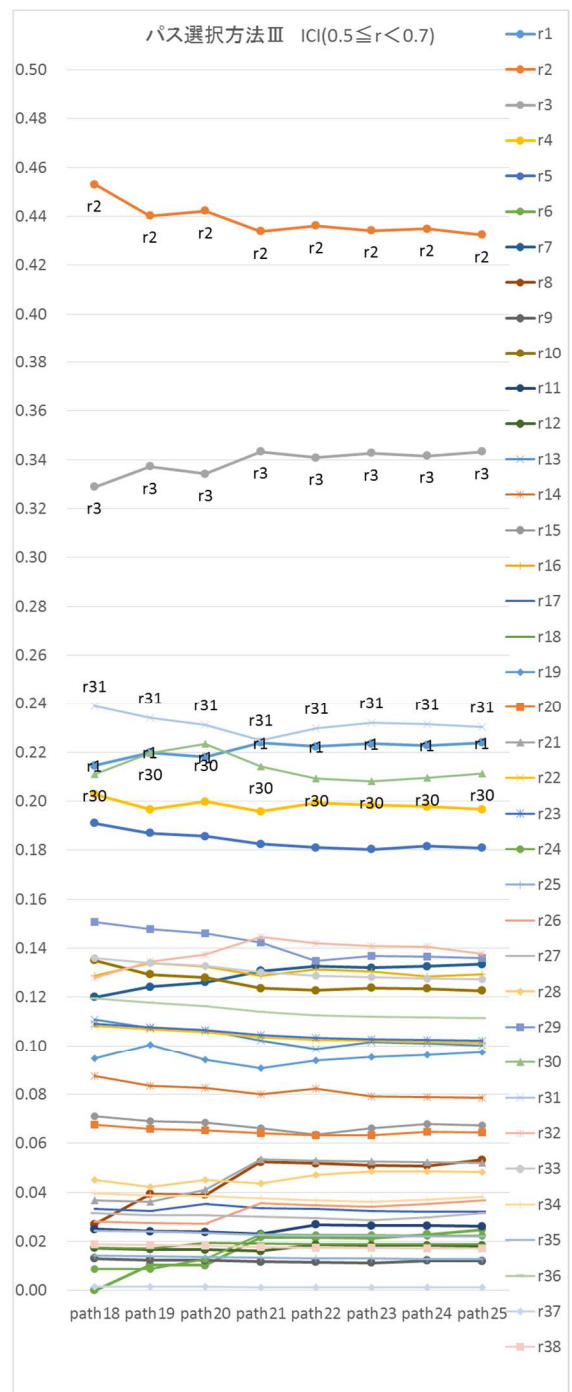
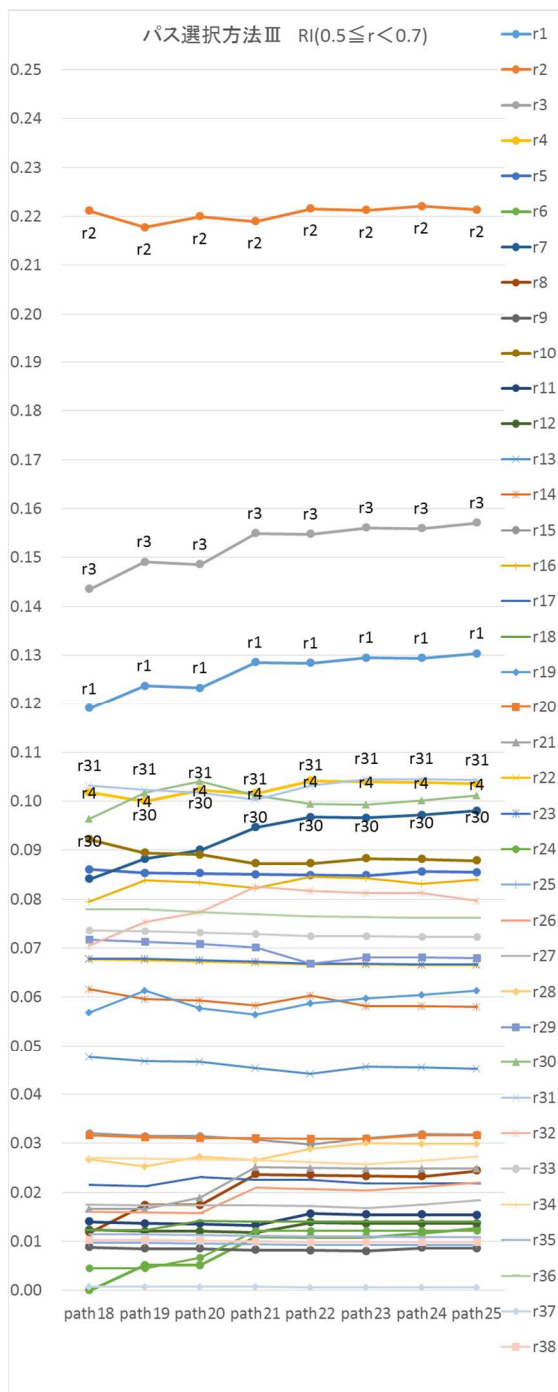


図 5-4-9 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法Ⅲ $0.5 \leq r < 0.7$)

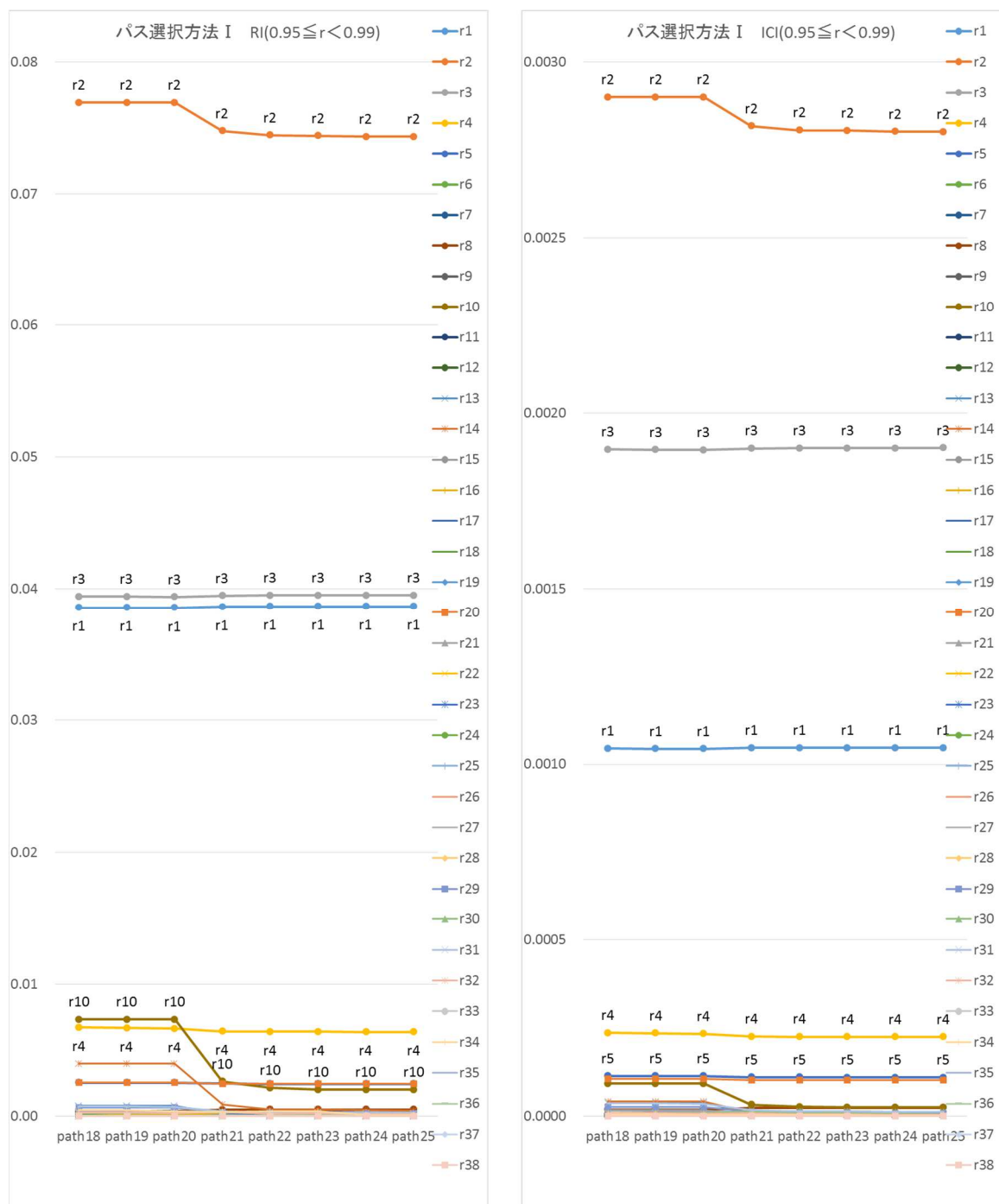


図 5-4-10 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法 I $0.95 \leq r < 0.99$)

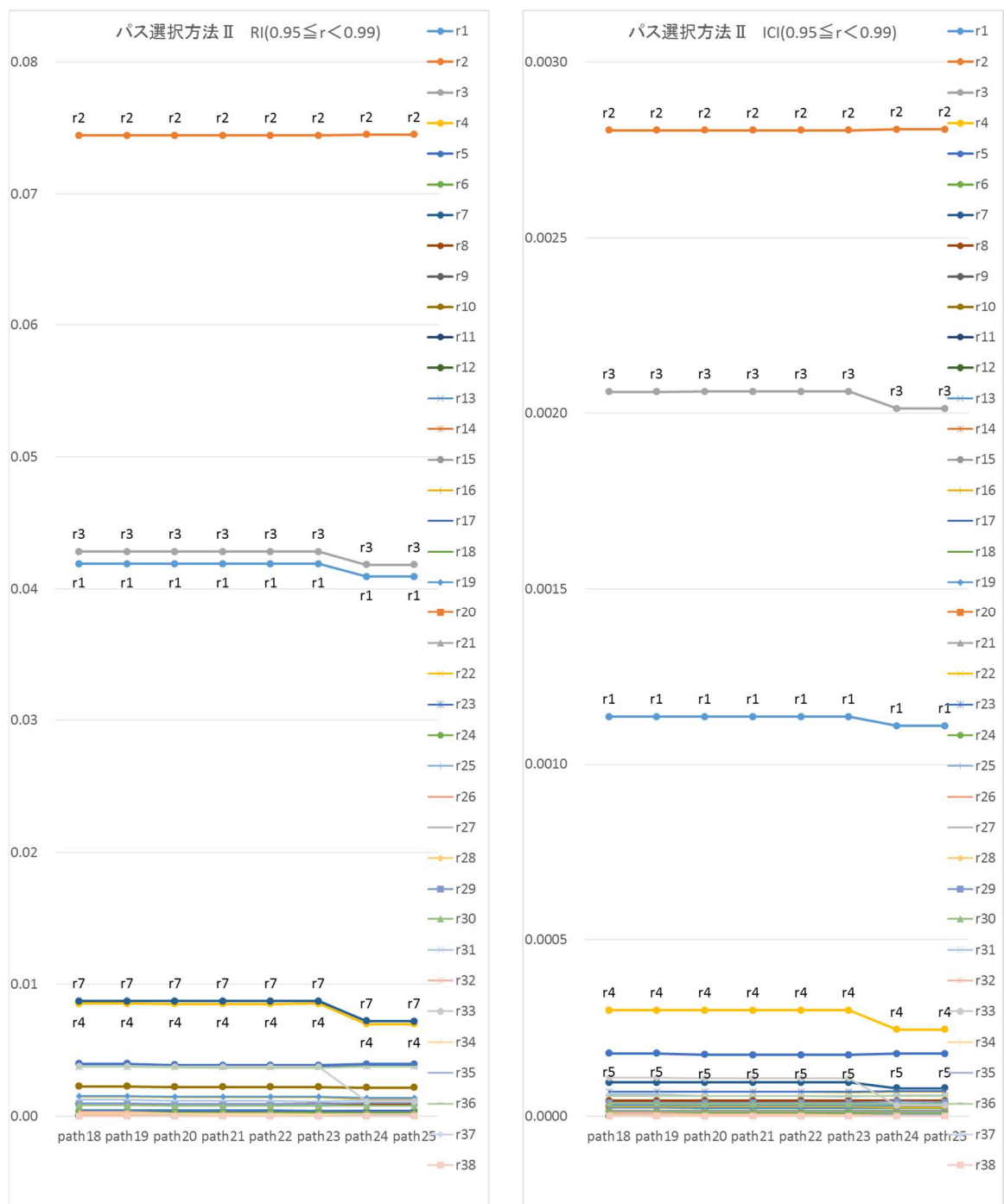


図 5-4-11 Sioux Falls ネットワークで部分パスセットを用いた重要度指標の値
(パス選択方法Ⅱ $0.95 \leq r < 0.99$)

図 5-4-1～5-4-12 は、Sioux Falls ネットワークにおいて 3 種類のパスの順位の比較を表したものである(リンク信頼度の値は 4 種の組み合わせを用意)。横軸はパス数を表し、折れ線は各々のリンクの重要度の値である。

全体的な傾向として、すべてのリンクが含まれる範囲での重要度の値の変動は小さくなっている。また、重要度の種類に関わらず値が最大となるリンクは概ね同じになっている。

それぞれのリンク信頼度の値の組み合わせにおいて、重要度の順位に変動がなければ、近似解法として十分なパス数であるといえる。

図 5-4-1～5-4-3 を見ると、*RI* については上位 5 位までのリンクは概ね同じものが選択されている。一方、*ICI* については最大値となるリンクでもパス選択方法によって異なる場合が出てきている。

図 5-4-4～5-4-6 を見ると、*RI* については最大値となるリンクでもパス選択方法によって異なる場合が出てきている。一方、*ICI* については上位 3 位までのリンクは概ね同じものが選択されている。

図 5-4-7～5-4-9 を見ると、*RI*、*ICI* とともに最大値となるリンクでもパス選択方法によって異なる場合が出てきている。

ここまで見る限りでは、前述の「すべてのリンクが含まれる範囲でパス数を減じれば近似解法として充分」とは言いがたい。パス数が増えていても、パスの順位は変動し続けている。

ただし、「ノード間信頼度の向上に寄与する重要度の発見」という本来の趣旨に照らして考えれば、複数の方法で部分パスセット選択を行って「どのパス選択でも下位となるリンク」は重要でないリンクと判断することはでき、消去法で重要なリンクを発見することは可能ではあるといえる。

また、もっとも現実的と考えられるリンク信頼度($0.95 \leq r < 0.99$)の部分パスセット選択の結果(図 5-4-7～5-4-9)を見ると、*RI*、*ICI* とともに上位 3 位までならパス選択方法に関わらず重要度の順位は同じである。また、パス数が 24 以上の段階では順位の急激な変動も起きていない。

したがって、すべてのリンクが含まれる範囲でパス数を減じるのであれば、近似解法として実用可能であることを示唆している。

5.5 結語

この章では、大規模道路ネットワークにおいて信頼度計算を行うための、近似解法について考察した。まず第 2 節において、システム信頼度の種々の近似解法について整理した。

ここで得られた結論は以下の通りである。

すべてのミニマルパス・カットを用いる近似解法では、計算量がネットワークの規模に依存することになり、大規模ネットワークでの計算の制約が解消されない。一方、一部のミニマルパス・カットを用いる近似解法(部分パスセット選択)では、パス数を制限することによってネットワークの拡大に対処しやすい。また、計算に使用するパス数を1本ずつ減らせば、計算量は指数的に減少するので近似解法として極めて有効である。

第3節では、近似解法の必要性として、ネットワークが拡大した際の計算時間や部分パスセット選択に必要なパス数などを検証した。

ここで得られた結論は以下の通りである。

信頼性の計算は、パス数が増加するにつれて計算時間が指数的に増加することが判明した。また部分パスセット選択による近似解法は、いかにパス数を抑えるかが計算量の削減の鍵となる。厳密値と比較して、重要度の順位に変動がなければ近似解として有用であるため、パス数毎に重要度の計算を行った。その結果、すべてのリンクが含まれる範囲でパス数を減じれば、重要度の順位の変動が抑えられ、近似解として実用的であることが判明した。

第4節では、厳密解の計算が困難な規模のネットワークで同様に部分パスセット選択を行い、重要度の順位の変動を検証した。その際、複数のパス選択方法によって重要度の順位が異なるかを比較した。ここで結果が変わらなければ、そのパス数が最低限必要な計算量となる。その結果、リンク信頼度の値の範囲が大きい場合はすべてのリンクが含まれるパス数であったとしても、パス選択方法によって重要度の順位が変動することが判明した。ただし、重要度の最大値を示すリンクはほぼ同じリンクとなった。また、より現実的と考えられるリンク信頼度で計算した際は、依然として「すべてのリンクが含まれる範囲のパス数」であれば、パス選択方法に関わらずリンクの重要度の順位はほぼ同一となった。結論としては、リンク信頼度の範囲次第ではあるが、第3節とほぼ同じであるといえる。

参考文献

- 1) 湊 真一：超高速グラフ列挙アルゴリズムー〈フカシギの数え方〉が拓く組合せ問題への新アプローチ，森北出版，2015.
- 2) Barlow, R.E. and Proschan, F.:Mathematical Theory of Reliability, pp.205-209, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.
- 3) 三根久・河合一：信頼性・保全性の数理，pp.112-117，朝倉書店，1982.
- 4) 前掲 3)
- 5) 井上紘一・稲垣敏之：大規模システムの信頼性解析へのグラフ理論の応用，システムと制御，Vol.20, No.12, pp.641-648，1976.
- 6) 小林正美：道路網・ネットワークシステムの信頼度解析法に関する研究，都市計画別冊，No.15, pp.385-390, 1980.
- 7) 前掲 6)
- 8) 若林拓史・飯田恭敬：交通ネットワーク信頼性解析への信頼性グラフ理論適用の考え方，土木計画学研究・講演集 10, pp.125-132，1987.
- 9) 飯田恭敬・若林拓史：ブ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.
- 10) 飯田恭敬・若林拓史・吉木 務：ミニマルパス・カットを用いた道路網信頼度の近似計算法，交通工学，Vol.23, No.4, pp.3-13，1988.
- 11) Iida, Y. and Wakabayashi, H.:An Approximation Method of Terminal Reliability of Road Network Using Partial Minimal Path and Cut Sets, Transport Policy, Management and Technology Towards 2001 (Selected Proceedings of The Fifth World Conference on Transport Research), Vol.4, pp. 2185-2198, Western Periodicals, Co., 1990.
- 12) 飯田恭敬・若林拓史・福島 博：道路網信頼性の近似解析方法の比較研究，土木学会論文集，No.407/IV-11, pp.107-116, 1989.
- 13) 若林拓史・飯田恭敬：信頼性グラフ理論に基づく交通ネットワークの信頼度の算出法について，土木学会第 42 回年次学術講演会概要集第 4 部，pp.140-141，1987.
- 14) 吉木 務・飯田恭敬・若林拓史：ミニマルパス・ミニマルカットによる道路ネットワークの信頼度の近似計算法について，土木学会第 42 回年次学術講演会概要集第 4 部，pp.142-143，1987.
- 15) 若林拓史・飯田恭敬：信頼性からみた道路網整備水準の評価手法，加藤晃代表文部省科学研究費総合研究(A) pp.89-94，1988.
- 16) 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.
- 17) 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.

18) 前掲 16)

第6章 実際の道路網における信頼性・重要度の計算

6.1 概説

ここまで、モデルネットワークにおいて信頼性・重要度の計算を行ってきたが、本章では実際の道路網における信頼性・重要度の計算について取り扱う。前述したようにリンク信頼度の推定方法が課題となるが、4.5で述べたように災害の種類・シナリオを限定することである程度の推定は可能であると考えられる。したがって、今回はあくまで信頼性計算に基づく重要度の推定に限定し、脆弱性の計算は行わないこととする。

まず、第2節でリンク信頼度の値の元となるデータについて述べる。本研究では、内水ハザードマップ(後述)を用いて大雨の際のリンク信頼度の推定を行う。また、リンク信頼度推定対象区域についても説明する。

第3節では、第2節のデータからリンク信頼度を推定する方法を述べる。内水ハザードマップでは、過去最大の降水量の際の浸水深データを公表しているため、これを元に車両が通行不能となる浸水深、降水量毎の浸水深を推定する。

第4節では、降水量毎のリンク信頼度・重要度指標の試算を行う。

6.2 リンク信頼度の推定の根拠となるデータ

道路網の連結信頼性・重要度の計算には、リンク信頼度の値が前提として必要となる。また、その値は確率的に与えられるものである。しかし、4.5で述べたように災害の種類によっては確率論で考えるのが必ずしも適するわけではないといえる。そこで、本研究では内水ハザードマップの想定浸水深を利用してリンク信頼度の推定を試みる。

6.2.1 内水ハザードマップの概要

内水とは、堤防で守られた内側の土地(人が住んでいる場所)にある水のことを指す(対して、河川の水を外水と呼ぶ)。雨の量が下水道などの排水施設の能力を超える時や、河川の水位が高くなった時、雨水を排水できなくなり浸水することがある。このような現象を「内水氾濫」という。

内水ハザードマップは、内水氾濫が予想される際に、浸水が発生した区域(あるいは予想される区域)の浸水に関する情報(避難場所・洪水予報・避難情報の伝達方法等)を記載したものであり、住民を円滑に避難・誘導するための機能、内水による浸水に関する

る住民・行政間の情報共用ツールとしての機能，住民の自助及び共助を促す機能，適正な土地利用を促す機能，平常時からの防水意識の向上を図る機能等を有する。

内水ハザードマップの主な利用目的としては，緊急時の避難行動についてあらかじめ確認して家族で相談するなど，日ごろから災害に備えるため，浸水が想定される範囲や，避難場所等に関する情報を図示したものである。

内水浸水想定区域図の作成は，浸水シミュレーションによる浸水想定を原則としている。しかしながら，内水浸水想定区域図は，下水道施設等の各種情報の整理状況，採用する内水浸水想定手法等により，作成に要する時間等が大きく異なる。このため，緊急性，必要とする精度，地域の特性を踏まえて検討した内水ハザードマップ作製の基本方針に基づき，間接的な内水浸水想定手法を選定し，作成される。

一方，外水によって生じる災害，いわゆる洪水についても同様な目的で洪水ハザードマップが作成・利用されている。

6.2.2 内水ハザードマップをリンク信頼度推定に用いる理由・目的

内水ハザードマップは，洪水ハザードマップと比較すると現状では作成自治体が少ない。内水ハザードマップが 84 市町村(平成 21 年度 2 月末)で作成されているのに対し，洪水ハザードマップは，887 市町村(平成 20 年 12 月末)で作成されている¹⁾。内水氾濫の場合は，洪水と比較すると発生頻度が比較的多い。近年では市街地の発展や局地的大雨の増加に伴い，下水道の雨水排水能力を上回る雨水流出が頻繁に生じている²⁾。また，都市部への資産集中や地下空間利用の進展など都市機能の高度化が進むことにより，浸水に対する被害予測は増大している。このような状況を緩和するには，将来にわたってハード対策を着実に推進し，起こりうる内水による浸水を未然に防止するとともに，緊急にソフト対策として，内水による浸水被害の最小化を図る必要がある。

したがって，内水ハザードマップは将来的により局地的大雨の対策として重要なツールになるのではないかと考える。また，局地的豪雨による都市型災害であることと，発生頻度の高さから，道路網のリンク信頼度推定には比較的適したデータであると考えられる。

6.2.3 リンク信頼度推定の対象区域について

本研究の対象区域は，名古屋市東区の主要な道路とする。ここでいう主要な道路とは，国道，県道，その他の 4 車線以上の幅員のある道路を指す。ノード・リンクの詳しい説明は 6.4 で述べる。

地震、火災に対する避難可否については、あなたの家の地震ハザードマップをご覧ください。

この図と裏面の「避難行動の目安」を参考に、避難など適切な行動について、事前に確認してください。

この地域の治水に関する問い合わせ先	972-376
内水によるはん水について	上下水道計画部下水計画課
河川によるはん水について	緑地土木河川部河川工務課
	972-289

972-2891

大雨による浸水の場合(内水は、大雨警報が発表された場合に浸水が予想されます。避難などの参考には、くたさい。

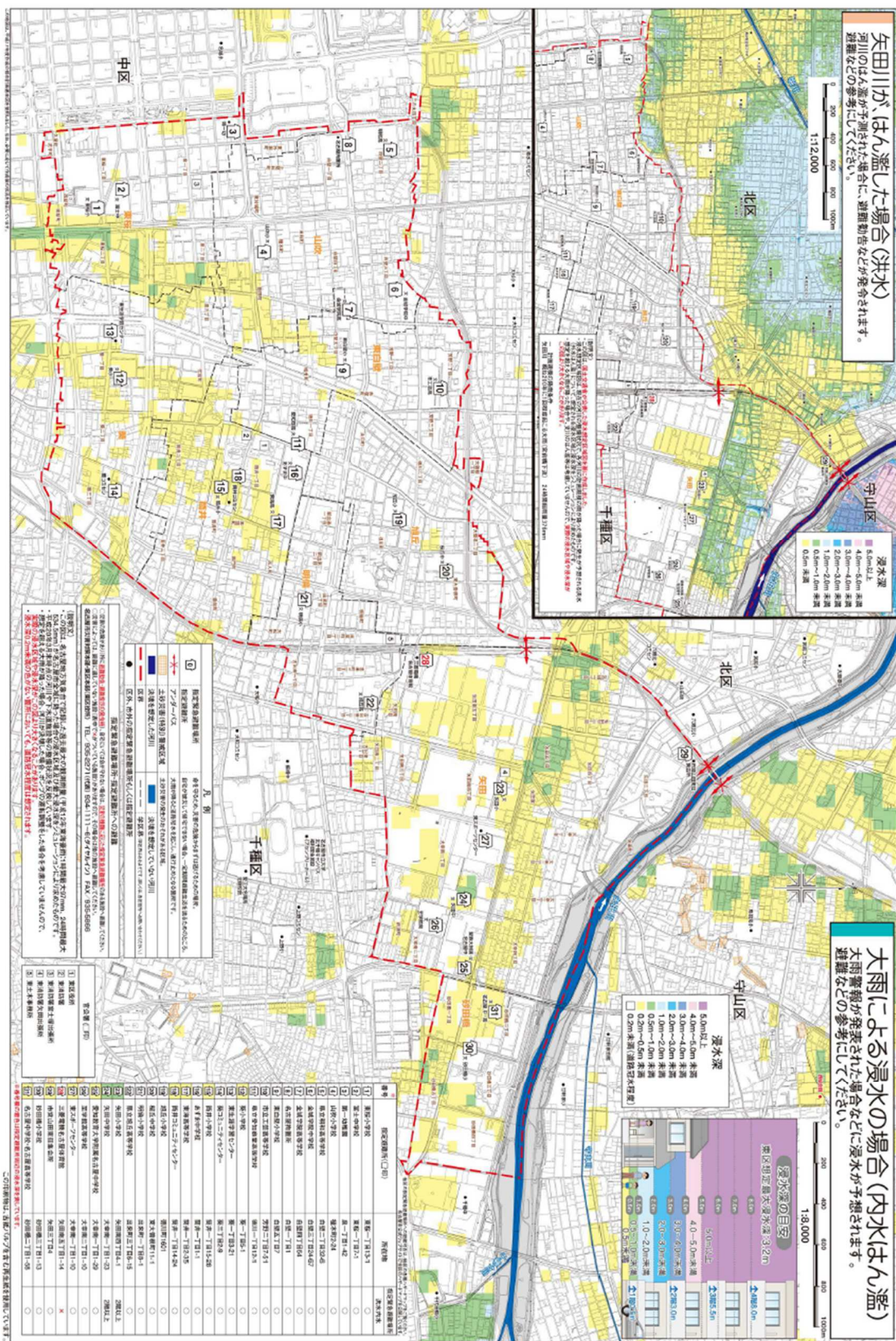


図 6-2-1 名古屋市東区の内水ハザードマップ³⁾

6.3 リンク信頼度の推定方法

ここでは、浸水により通行不能が発生する生起確率を求める手順について述べる。リンク信頼度を求める上で浸水により通行不能になる生起確率が必要になるため、その一連の手順と方法について述べる。第1項では、車両が通行不能になる浸水深の設定について述べる。次に、第2項では内水ハザードマップをもとに降水量に対する浸水深の変動の仮定について説明する。第3項では、浸水深毎に仮定した正規分布グラフについて述べる。第4項では降水量に対して通行不能になる確率の算出について述べる。

6.3.1 車両が通行不能になる浸水深の設定

浸水深とは、洪水や内水氾濫によって市街地や家屋、田畑が水で覆われることを浸水といい、その深さ（浸水域の地面から水面までの高さ）を浸水深という。

局地的豪雨による浸水により、通行不能となる生起確率を求める上で、車両が通行不能になる浸水深が前提として必要である。車両が浸水によって走行不能になる主な原因として、マフラーなどの冠水によってエンジンが停止し走行不能になる例が挙げられる。しかし、車両が通行不能になる浸水深は、浸水時に走行する車種や走行中の対向車による波の影響など様々な要因が考えられ、それらをすべて考慮することは困難である。そのため、浸水により車両が通行不能になる明確な浸水深データの確定値は存在しない。

国土交通省・川の防災情報の浸水深と避難行動⁴⁾において、浸水深 30cm～50cm で自動車走行はエンジンが停止し、車から退出を図らなければならないと記されている。本研究では、このデータを参考に車両が通行不能になる浸水深を 0.3m に設定する。したがって浸水深 0.3m 以上の値が出た場合、その地点は車両が通行不能であると仮定する。

ただし、内水ハザードマップでは過去最大の観測雨量時の降水量、浸水深の範囲が固定値として記されている。よって浸水深が 0.3m 以上の値であるか判断することも困難であり、絶えず変動する降水量の変化にも対応できない。

そのため、本研究では固定値である降水量と浸水深の値をもとにその値を変動させる方法を仮定し求める必要がある。

正規分布は、以下の式で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (-\infty < x < \infty) \quad (6.3.1)$$

ここで、 μ は平均、 σ^2 は分散、 σ は標準偏差を表す。また、 $\exp(x) = e^x$, $e \doteq 2.718$ である。

ある確率変数 x の確率分布が $N(\mu, \sigma^2)$ のとき $x \sim N(\mu, \sigma^2)$ と表記する。

本研究では、内水ハザードマップにおいて提示されている浸水深を用いて、それぞれの浸水深の範囲をもとに正規分布グラフに表す。

x に従う正規分布を仮定する前に浸水域の浸水深の平均、分散、標準偏差を求める。

平均の算出方法は、

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (6.3.2)$$

ここで、 N はデータの総数、 x_i は個々のデータである。

次に、分散を求めるには、

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6.3.3)$$

ここで、 N はデータの総数、 x_i は個々の数値、 $\bar{x}$ は平均値である。

以上より分散が求められる。

次に標準偏差を求める。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.3.4)$$

以上より標準偏差が求められる。

ここで求めた値である平均、標準偏差などをもとに正規分布グラフを作成する。

(3) 浸水深の範囲と標準偏差の仮定

浸水深の範囲をもとに浸水深の分布が正規分布すると仮定したが、正規分布のグラフを作成するうえで範囲、平均値、標準偏差が必要である。内水ハザードマップの情報からは範囲、範囲の平均値しか得られないため標準偏差の仮定が必要になる。

本研究では、標準偏差に 6σ を使用し浸水深の範囲の分散を表す。 6σ は、品質管理手法でよく用いられている値である^{6),7)}。

6.3.3 浸水深の正規分布グラフ

本研究の対象区域では、予想される浸水深は 0.2m 未満, 0.2m～0.5m 未満, 0.5m～1.0m 未満の 3 つの地点が存在する。今回、車両が通行不能になる浸水深を 0.3m 以上と設定しており、また内水ハザードマップは過去最大の観測雨量が名古屋市全域に降った想定であるため、浸水深 0.2m 未満の地点は対象から外した。したがって、残った 2 つの地点の浸水深の正規分布グラフの作成法を述べる。

(1) 浸水深 0.2m～0.5m 地点

本研究では、浸水深 0.2m～0.5m 地点の正規分布グラフを作成するうえでの前提条件として、範囲は予想される浸水深の範囲をとる。平均値は予想される浸水深の平均の値をとり、標準偏差は平均値から範囲の最小値と最大値を 6σ の値から算出する。

内水ハザードマップに基づいて、1 時間最大降水量 97mm を観測した場合の正規分布グラフの作成法を述べる。範囲を 0.2m～0.5m, 平均は 0.2m～0.5m の平均値である 0.35m を平均にとる。標準偏差は平均値である $0.35\text{m} \pm 0.15$ の範囲に分布しており、ここで 6σ を利用して、 $6\sigma = 0.15$ より $\sigma = 0.025$ とする。

こうして対象範囲 0.2m～0.5m において求められた、平均値 0.35, 標準偏差 0.025 を使用し正規分布グラフを作成する(表 6-3-1, 図 6-3-2)。

表 6-3-1 浸水深 0.2~0.5m 地点の分布データ

[illegible]

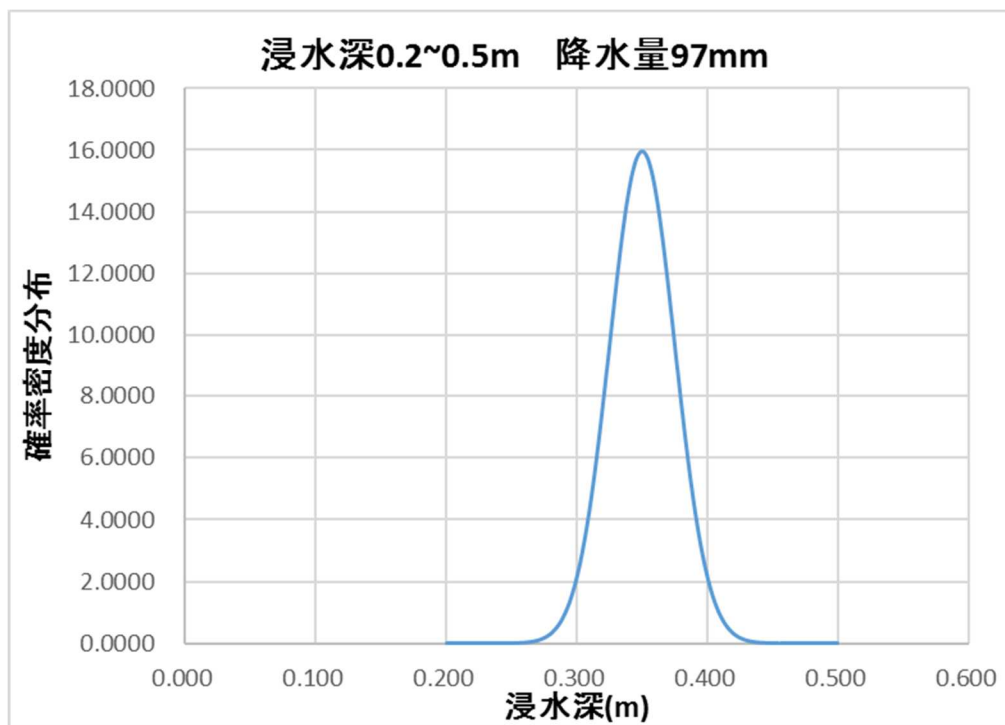


図 6-3-2 浸水深 0.2~0.5m 地点の分布グラフ

(2) 浸水深 0.5m~1.0m 地点

本研究では浸水深 0.5m~1.0m 地点の正規分布グラフを作成するうえでの前提条件として平均値は予想される浸水深の平均の値をとり、標準偏差は平均値から範囲の最小値、最大値を 6σ の値から算出する。

今回の場合、範囲を 0m から予想される浸水深の最大値に設定する。0m から設定した理由は、浸水深 0.5m~1.0m 地点は 0.2m~0.5m 地点と比較して浸水が起こりやすい地点という考え方に基づく。したがって、浸水が起こりやすい地点で並べると今回の対象範囲では、0.2m~0.5m 未満<0.5m~1.0m 未満ということになる。

内水ハザードマップに基づいて、1 時間最大降水量 97mm を観測した場合の正規分布グラフの作成方法を述べる。データより対象の範囲は 0m~1.0m に設定する。平均の値は 0.5m~1.0m の平均の値である 0.75m を平均にとる。標準偏差は平均値である 0.75m $\pm$ 0.25 の範囲に分布しており、ここで 6σ を利用して $6\sigma = 0.25$ より $\sigma = 0.04166\cdots$ とする。

こうして対象範囲 0.0m~1.0m において求められた、平均値 0.35、標準偏差 0.025 を使用し正規分布グラフを作成する(表 6-3-2, 図 6-3-3)。

表 6-3-2 浸水深 0.5~1.0m 地点の分布データ

[illegible]

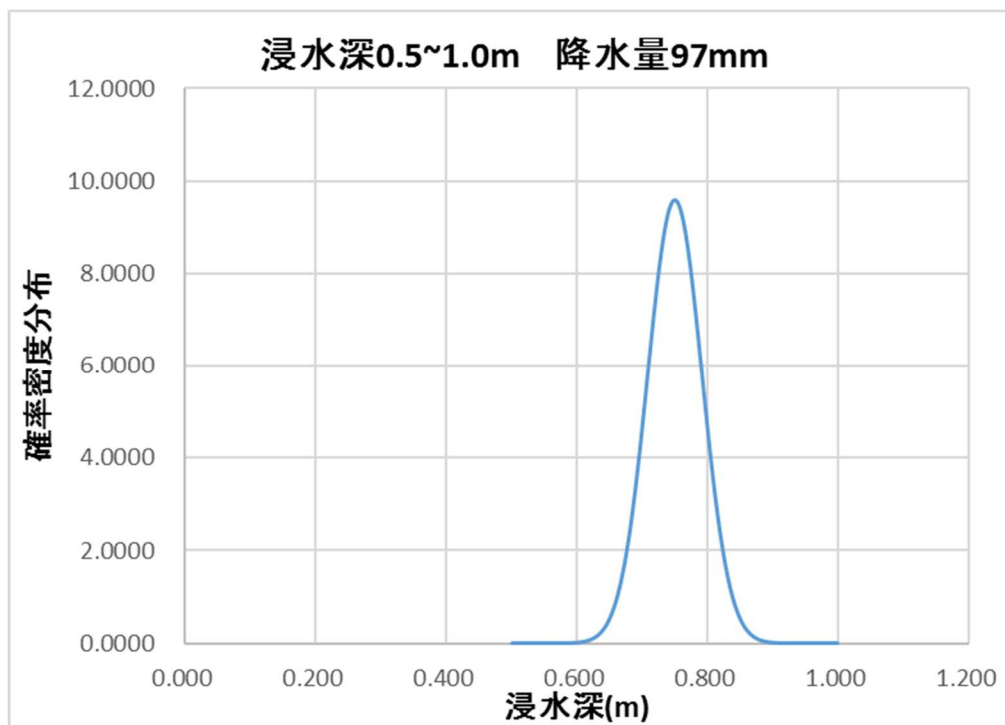


図 6-3-3 浸水深 0.5~1.0m 地点の分布グラフ

6.3.4 降水量毎の浸水深の推定

本研究では、降水量毎の浸水深の推定法として比例関係を仮定する．今回、降水量と浸水深の関係は正比例であると仮定し、降水量毎の浸水深を求める．現実的に考えると、降水量が少ないうちは下水道の排水能力内なので、浸水深はより浅くなると予想できるが、実際にそれがどの程度になるのかまでは不明であるため、今回は正比例とする．比例グラフを作成していく中での条件として、降水量 0mm の場合の浸水深は 0m であるとする．

例として、浸水深 0.2m～0.5m の場合での降水量毎の比例グラフ作成法を述べる．グラフでは、降水量毎の予想される浸水深の範囲の変動を表すため、1 時間最大降水量 97mm(内水ハザードマップ表示値)の場合、0.2m～0.5m の間の浸水深の変動を表す．

X 軸を降水量、Y 軸を浸水深としてグラフを作成する．0.2m の場合は $(x, y) = (0, 0), (97, 0.2)$ 、0.5m の場合は $(x, y) = (0, 0), (97, 0.5)$ を通る直線をグラフに表す．その 2 つの直線の間の範囲の分布を正規分布とする．

これを基にして作成された比例グラフを利用して、降水量毎の浸水深の範囲から正規分布グラフを作成し、車両が通行不能になる浸水深が発生する生起確率を求める．降水量は、30mm から 80mm まで 10mm 刻みに設定する．

(1) 降水量に対して通行不能になる確率(浸水深 0.2m~0.5m 地点)

表 6-3-3 は, 作成した正規分布(表 6-3-1)と比例グラフ(図 6-3-4)を基に算出した浸水により通行不能になる確率を算出し示したものである。通行不能になる浸水深である 0.3m 以上を観測する降水量は, 59mm である。本研究での基準値である内水ハザードマップでの 1 時間最大降水量 97mm を観測した場合, 0.2m~0.5m 地点での通行不能になる浸水深の生起確率は 0.978315 である。それを元に, 降水量毎の通行不能となる浸水深 0.3m の生起確率を計算した。降水量が 50mm, 40mm, 30mm の時は 0.3 以上になることがなかったので, 通行不能になる確率は 0 である。80mm の場合は, 0.3 以上になる確率が 0.29448667 であった。つまり, リンク信頼度は 0.70551333 である。同様にしてリンク信頼度を計算すると, 70mm の場合は 0.99508210, 60mm の場合は 0.99999996 である(表 6-3-3)。

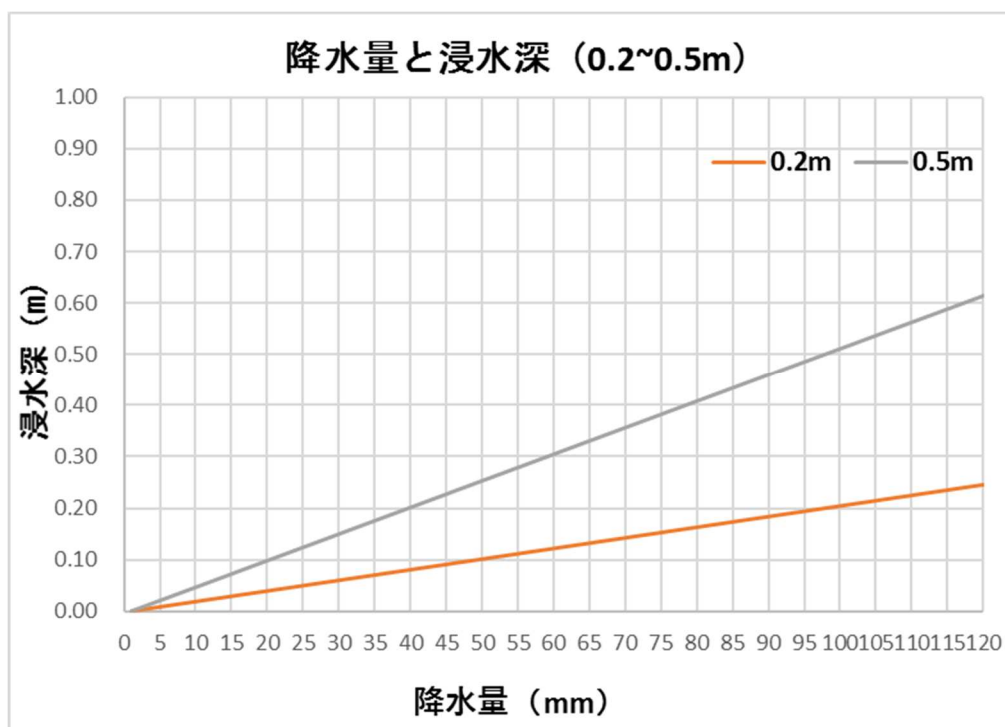


図 6-3-4 降水量と浸水深の関係(浸水深 0.2~0.5m 地点)

表 6-3-3 (a) 浸水深 0.2~0.5m 地点の降水量 80mm の分布

0.2~0.5m 降水量80mm			
平均	標準偏差		
0.28865979	0.020618557		
x	f(x)	x	f(x)
0.16494845	0.00000029	0.29113402	19.20989027
0.16742268	0.00000060	0.29360825	18.79940583
0.16989691	0.00000121	0.29608247	18.13466436
0.17237113	0.00000239	0.29855670	17.24332763
0.17484536	0.00000468	0.30103093	16.16139324
0.17731959	0.00000901	0.30350515	14.93078613
0.17979381	0.00001710	0.30597938	13.59667483
0.18226804	0.00003199	0.30845361	12.20475054
0.18474227	0.00005899	0.31092784	10.79869469
0.18721649	0.00010723	0.31340206	9.41802367
0.18969072	0.00019212	0.31587629	8.09644652
0.19216495	0.00033932	0.31835052	6.86080831
0.19463918	0.00059072	0.32082474	5.73062881
0.19711340	0.00101367	0.32329897	4.71819006
0.19958763	0.00171460	0.32577320	3.82908268
0.20206186	0.00285874	0.32824742	3.06309323
0.20453608	0.00469821	0.33072165	2.41530426
0.20701031	0.00761089	0.33319588	1.87728252
0.20948454	0.01215305	0.33567010	1.43824737
0.21195876	0.01912852	0.33814433	1.08613472
0.21443299	0.02967724	0.34061856	0.80849989
0.21690722	0.04538495	0.34309278	0.59322903
0.21938144	0.06841421	0.34556701	0.42905304
0.22185567	0.10165457	0.34804124	0.30587623
0.22432990	0.14888595	0.35051546	0.21494465
0.22680412	0.21494465	0.35298969	0.14888595
0.22927835	0.30587623	0.35546392	0.10165457
0.23175258	0.42905304	0.35793814	0.06841421
0.23422680	0.59322903	0.36041237	0.04538495
0.23670103	0.80849989	0.36288660	0.02967724
0.23917526	1.08613472	0.36536082	0.01912852
0.24164948	1.43824737	0.36783505	0.01215305
0.24412371	1.87728252	0.37030928	0.00761089
0.24659794	2.41530426	0.37278351	0.00469821
0.24907216	3.06309323	0.37525773	0.00285874
0.25154639	3.82908268	0.37773196	0.00171460
0.25402062	4.71819006	0.38020619	0.00101367
0.25649485	5.73062881	0.38268041	0.00059072
0.25896907	6.86080831	0.38515464	0.00033932
0.26144330	8.09644652	0.38762887	0.00019212
0.26391753	9.41802367	0.39010309	0.00010723
0.26639175	10.79869469	0.39257732	0.00005899
0.26886598	12.20475054	0.39505155	0.00003199
0.27134021	13.59667483	0.39752577	0.00001710
0.27381443	14.93078613	0.40000000	0.00000901
0.27628866	16.16139324	0.40247423	0.00000468
0.27876289	17.24332763	0.40494845	0.00000239
0.28123711	18.13466436	0.40742268	0.00000121
0.28371134	18.79940583	0.40989691	0.00000060
0.28618557	19.20989027	0.41237113	0.00000029
0.28865979	19.34870060	浸水しない割合:	0.70551333

表 6-3-3 (b) 浸水深 0.2~0.5m 地点の降水量 70mm の分布

0.2~0.5m 降水量70mm			
平均		標準偏差	
0.25257732		0.018041237	
x	f(x)	x	f(x)
0.14432990	0.00000034	0.25474227	21.95416031
0.14649485	0.00000069	0.25690722	21.48503524
0.14865979	0.00000138	0.25907216	20.72533070
0.15082474	0.00000274	0.26123711	19.70666015
0.15298969	0.00000535	0.26340206	18.47016370
0.15515464	0.00001030	0.26556701	17.06375558
0.15731959	0.00001954	0.26773196	15.53905694
0.15948454	0.00003656	0.26989691	13.94828634
0.16164948	0.00006741	0.27206186	12.34136536
0.16381443	0.00012254	0.27422680	10.76345562
0.16597938	0.00021957	0.27639175	9.25308174
0.16814433	0.00038779	0.27855670	7.84092379
0.17030928	0.00067510	0.28072165	6.54929007
0.17247423	0.00115848	0.28288660	5.39221721
0.17463918	0.00195954	0.28505155	4.37609449
0.17680412	0.00326713	0.28721649	3.50067798
0.17896907	0.00536938	0.28938144	2.76034772
0.18113402	0.00869816	0.29154639	2.14546574
0.18329897	0.01388921	0.29371134	1.64371127
0.18546392	0.02186117	0.29587629	1.24129682
0.18762887	0.03391685	0.29804124	0.92399987
0.18979381	0.05186851	0.30020619	0.67797603
0.19195876	0.07818767	0.30237113	0.49034633
0.19412371	0.11617666	0.30453608	0.34957283
0.19628866	0.17015537	0.30670103	0.24565103
0.19845361	0.24565103	0.30886598	0.17015537
0.20061856	0.34957283	0.31103093	0.11617666
0.20278351	0.49034633	0.31319588	0.07818767
0.20494845	0.67797603	0.31536082	0.05186851
0.20711340	0.92399987	0.31752577	0.03391685
0.20927835	1.24129682	0.31969072	0.02186117
0.21144330	1.64371127	0.32185567	0.01388921
0.21360825	2.14546574	0.32402062	0.00869816
0.21577320	2.76034772	0.32618557	0.00536938
0.21793814	3.50067798	0.32835052	0.00326713
0.22010309	4.37609449	0.33051546	0.00195954
0.22226804	5.39221721	0.33268041	0.00115848
0.22443299	6.54929007	0.33484536	0.00067510
0.22659794	7.84092379	0.33701031	0.00038779
0.22876289	9.25308174	0.33917526	0.00021957
0.23092784	10.76345562	0.34134021	0.00012254
0.23309278	12.34136536	0.34350515	0.00006741
0.23525773	13.94828634	0.34567010	0.00003656
0.23742268	15.53905694	0.34783505	0.00001954
0.23958763	17.06375558	0.35000000	0.00001030
0.24175258	18.47016370	0.35216495	0.00000535
0.24391753	19.70666015	0.35432990	0.00000274
0.24608247	20.72533070	0.35649485	0.00000138
0.24824742	21.48503524	0.35865979	0.00000069
0.25041237	21.95416031	0.36082474	0.00000034
0.25257732	22.11280069	浸水しない割合:	0.99508210

表 6-3-3 (c) 浸水深 0.2~0.5m 地点の降水量 60mm の分布

0.2~0.5m 降水量60mm			
平均		標準偏差	
0.21649485		0.015463918	
x	f(x)	x	f(x)
0.12371134	0.00000039	0.21835052	25.61318703
0.12556701	0.00000080	0.22020619	25.06587444
0.12742268	0.00000161	0.22206186	24.17955248
0.12927835	0.00000319	0.22391753	22.99110351
0.13113402	0.00000624	0.22577320	21.54852432
0.13298969	0.00001201	0.22762887	19.90771484
0.13484536	0.00002280	0.22948454	18.12889977
0.13670103	0.00004265	0.23134021	16.27300072
0.13855670	0.00007865	0.23319588	14.39825959
0.14041237	0.00014297	0.23505155	12.55736489
0.14226804	0.00025616	0.23690722	10.79526203
0.14412371	0.00045242	0.23876289	9.14774442
0.14597938	0.00078762	0.24061856	7.64083841
0.14783505	0.00135156	0.24247423	6.29092008
0.14969072	0.00228613	0.24432990	5.10544357
0.15154639	0.00381165	0.24618557	4.08412431
0.15340206	0.00626427	0.24804124	3.22040567
0.15525773	0.01014786	0.24989691	2.50304336
0.15711340	0.01620407	0.25175258	1.91766315
0.15896907	0.02550470	0.25360825	1.44817963
0.16082474	0.03956966	0.25546392	1.07799985
0.16268041	0.06051327	0.25731959	0.79097204
0.16453608	0.09121895	0.25917526	0.57207072
0.16639175	0.13553943	0.26103093	0.40783497
0.16824742	0.19851459	0.26288660	0.28659286
0.17010309	0.28659286	0.26474227	0.19851459
0.17195876	0.40783497	0.26659794	0.13553943
0.17381443	0.57207072	0.26845361	0.09121895
0.17567010	0.79097204	0.27030928	0.06051327
0.17752577	1.07799985	0.27216495	0.03956966
0.17938144	1.44817963	0.27402062	0.02550470
0.18123711	1.91766315	0.27587629	0.01620407
0.18309278	2.50304336	0.27773196	0.01014786
0.18494845	3.22040567	0.27958763	0.00626427
0.18680412	4.08412431	0.28144330	0.00381165
0.18865979	5.10544357	0.28329897	0.00228613
0.19051546	6.29092008	0.28515464	0.00135156
0.19237113	7.64083841	0.28701031	0.00078762
0.19422680	9.14774442	0.28886598	0.00045242
0.19608247	10.79526203	0.29072165	0.00025616
0.19793814	12.55736489	0.29257732	0.00014297
0.19979381	14.39825959	0.29443299	0.00007865
0.20164948	16.27300072	0.29628866	0.00004265
0.20350515	18.12889977	0.29814433	0.00002280
0.20536082	19.90771484	0.30000000	0.00001201
0.20721649	21.54852432	0.30185567	0.00000624
0.20907216	22.99110351	0.30371134	0.00000319
0.21092784	24.17955248	0.30556701	0.00000161
0.21278351	25.06587444	0.30742268	0.00000080
0.21463918	25.61318703	0.30927835	0.00000039
0.21649485	25.79826747	浸水しない割合:	0.99999996

(2) 降水量に対して通行不能になる確率(浸水深 0.5m~1.0m 地点)

表 6-3-4 は, 作成した正規分布(表 6-3-2)と比例グラフ(図 6-3-5)を基に算出した浸水により通行不能になる確率を算出し示したものである。通行不能になる浸水深である 0.3m 以上を観測する降水量は, 30mm である。本研究での基準値である内水ハザードマップでの 1 時間最大降水量 97mm を観測した場合, 0.5m~1.0m 地点での通行不能になる浸水深の生起確率は 0.99984811 である。それを元に, 降水量毎の通行不能となる浸水深 0.3m の生起確率を計算した。降水量が 80mm, 70mm, 60mm の時は 0.3 未満になることがなかったので, 通行不能になる確率は 1 である。50mm の場合は, 0.3 以上になる確率が 0.99997120 であった。つまり, リンク信頼度は 0.00002880 である。同様にしてリンク信頼度を計算すると, 40mm の場合は 0.29448667, 30mm の場合は 0.99999991 である(表 6-3-4)。

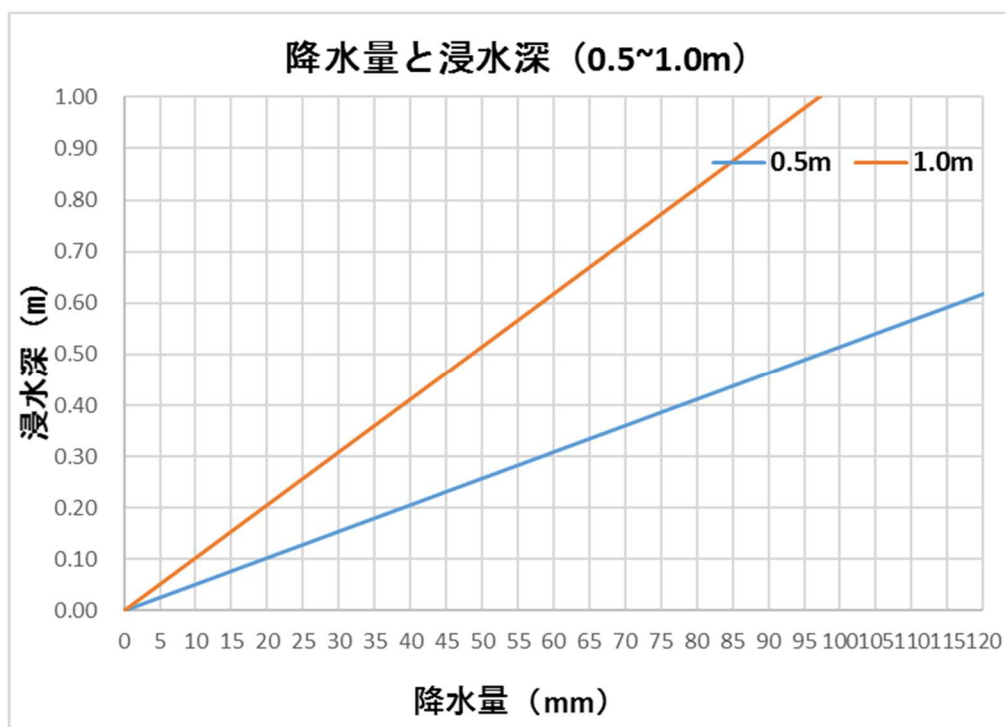


図 6-3-5 降水量と浸水深の関係(浸水深 0.5~1.0m 地点)

表 6-3-4 (a) 浸水深 0.5~1.0m 地点の降水量 50mm の分布

0.5~1.0m 降水量50mm			
平均	標準偏差		
0.38659794	0.021477663		
x	f(x)	x	f(x)
0.25773196	0.00000028	0.38917526	18.44149466
0.26030928	0.00000058	0.39175258	18.04742960
0.26288660	0.00000116	0.39432990	17.40927779
0.26546392	0.00000230	0.39690722	16.55359453
0.26804124	0.00000449	0.39948454	15.51493751
0.27061856	0.00000865	0.40206186	14.33355469
0.27319588	0.00001641	0.40463918	13.05280783
0.27577320	0.00003071	0.40721649	11.71656052
0.27835052	0.00005663	0.40979381	10.36674690
0.28092784	0.00010294	0.41237113	9.04130272
0.28350515	0.00018444	0.41494845	7.77258866
0.28608247	0.00032574	0.41752577	6.58637598
0.28865979	0.00056709	0.42010309	5.50140366
0.29123711	0.00097313	0.42268041	4.52946246
0.29381443	0.00164602	0.42525773	3.67591937
0.29639175	0.00274439	0.42783505	2.94056950
0.29896907	0.00451028	0.43041237	2.31869208
0.30154639	0.00730646	0.43298969	1.80219122
0.30412371	0.01166693	0.43556701	1.38071747
0.30670103	0.01836338	0.43814433	1.04268933
0.30927835	0.02849015	0.44072165	0.77615989
0.31185567	0.04356955	0.44329897	0.56949987
0.31443299	0.06567764	0.44587629	0.41189092
0.31701031	0.09758839	0.44845361	0.29364118
0.31958763	0.14293051	0.45103093	0.20634686
0.32216495	0.20634686	0.45360825	0.14293051
0.32474227	0.29364118	0.45618557	0.09758839
0.32731959	0.41189092	0.45876289	0.06567764
0.32989691	0.56949987	0.46134021	0.04356955
0.33247423	0.77615989	0.46391753	0.02849015
0.33505155	1.04268933	0.46649485	0.01836338
0.33762887	1.38071747	0.46907216	0.01166693
0.34020619	1.80219122	0.47164948	0.00730646
0.34278351	2.31869208	0.47422680	0.00451028
0.34536082	2.94056950	0.47680412	0.00274439
0.34793814	3.67591937	0.47938144	0.00164602
0.35051546	4.52946246	0.48195876	0.00097313
0.35309278	5.50140366	0.48453608	0.00056709
0.35567010	6.58637598	0.48711340	0.00032574
0.35824742	7.77258866	0.48969072	0.00018444
0.36082474	9.04130272	0.49226804	0.00010294
0.36340206	10.36674690	0.49484536	0.00005663
0.36597938	11.71656052	0.49742268	0.00003071
0.36855670	13.05280783	0.50000000	0.00001641
0.37113402	14.33355469	0.50257732	0.00000865
0.37371134	15.51493751	0.50515464	0.00000449
0.37628866	16.55359453	0.50773196	0.00000230
0.37886598	17.40927779	0.51030928	0.00000116
0.38144330	18.04742960	0.51288660	0.00000058
0.38402062	18.44149466	0.51546392	0.00000028
0.38659794	18.57475258	浸水しない割合:	0.00002880

表 6-3-4 (b) 浸水深 0.5~1.0m 地点の降水量 40mm の分布

0.5~1.0m 降水量40mm			
平均		標準偏差	
0.30927835		0.017182131	
x	f(x)	x	f(x)
0.20618557	0.00000035	0.31134021	23.05186833
0.20824742	0.00000072	0.31340206	22.55928700
0.21030928	0.00000145	0.31546392	21.76159723
0.21237113	0.00000287	0.31752577	20.69199316
0.21443299	0.00000561	0.31958763	19.39367189
0.21649485	0.00001081	0.32164948	17.91694336
0.21855670	0.00002052	0.32371134	16.31600979
0.22061856	0.00003838	0.32577320	14.64570065
0.22268041	0.00007079	0.32783505	12.95843363
0.22474227	0.00012867	0.32989691	11.30162840
0.22680412	0.00023055	0.33195876	9.71573583
0.22886598	0.00040718	0.33402062	8.23296998
0.23092784	0.00070886	0.33608247	6.87675457
0.23298969	0.00121641	0.33814433	5.66182808
0.23505155	0.00205752	0.34020619	4.59489921
0.23711340	0.00343049	0.34226804	3.67571188
0.23917526	0.00563785	0.34432990	2.89836511
0.24123711	0.00913307	0.34639175	2.25273903
0.24329897	0.01458367	0.34845361	1.72589684
0.24536082	0.02295423	0.35051546	1.30336166
0.24742268	0.03561269	0.35257732	0.97019987
0.24948454	0.05446194	0.35463918	0.71187483
0.25154639	0.08209705	0.35670103	0.51486365
0.25360825	0.12198549	0.35876289	0.36705148
0.25567010	0.17866313	0.36082474	0.25793358
0.25773196	0.25793358	0.36288660	0.17866313
0.25979381	0.36705148	0.36494845	0.12198549
0.26185567	0.51486365	0.36701031	0.08209705
0.26391753	0.71187483	0.36907216	0.05446194
0.26597938	0.97019987	0.37113402	0.03561269
0.26804124	1.30336166	0.37319588	0.02295423
0.27010309	1.72589684	0.37525773	0.01458367
0.27216495	2.25273903	0.37731959	0.00913307
0.27422680	2.89836511	0.37938144	0.00563785
0.27628866	3.67571188	0.38144330	0.00343049
0.27835052	4.59489921	0.38350515	0.00205752
0.28041237	5.66182808	0.38556701	0.00121641
0.28247423	6.87675457	0.38762887	0.00070886
0.28453608	8.23296998	0.38969072	0.00040718
0.28659794	9.71573583	0.39175258	0.00023055
0.28865979	11.30162840	0.39381443	0.00012867
0.29072165	12.95843363	0.39587629	0.00007079
0.29278351	14.64570065	0.39793814	0.00003838
0.29484536	16.31600979	0.40000000	0.00002052
0.29690722	17.91694336	0.40206186	0.00001081
0.29896907	19.39367189	0.40412371	0.00000561
0.30103093	20.69199316	0.40618557	0.00000287
0.30309278	21.76159723	0.40824742	0.00000145
0.30515464	22.55928700	0.41030928	0.00000072
0.30721649	23.05186833	0.41237113	0.00000035
0.30927835	23.21844072	浸水しない割合:	0.29448667

表 6-3-4 (c) 浸水深 0.5~1.0m 地点の降水量 30mm の分布

0.5~1.0m 降水量30mm			
平均	標準偏差		
0.23195876	0.012886598		
x	f(x)	x	f(x)
0.15463918	0.00000047	0.23350515	30.73582444
0.15618557	0.00000096	0.23505155	30.07904933
0.15773196	0.00000193	0.23659794	29.01546298
0.15927835	0.00000383	0.23814433	27.58932421
0.16082474	0.00000749	0.23969072	25.85822918
0.16237113	0.00001441	0.24123711	23.88925781
0.16391753	0.00002736	0.24278351	21.75467972
0.16546392	0.00005118	0.24432990	19.52760087
0.16701031	0.00009438	0.24587629	17.27791150
0.16855670	0.00017156	0.24742268	15.06883787
0.17010309	0.00030740	0.24896907	12.95431444
0.17164948	0.00054291	0.25051546	10.97729330
0.17319588	0.00094515	0.25206186	9.16900610
0.17474227	0.00162188	0.25360825	7.54910410
0.17628866	0.00274336	0.25515464	6.12653228
0.17783505	0.00457398	0.25670103	4.90094917
0.17938144	0.00751713	0.25824742	3.86448681
0.18092784	0.01217743	0.25979381	3.00365204
0.18247423	0.01944489	0.26134021	2.30119578
0.18402062	0.03060564	0.26288660	1.73781555
0.18556701	0.04748359	0.26443299	1.29359982
0.18711340	0.07261592	0.26597938	0.94916644
0.18865979	0.10946274	0.26752577	0.68648486
0.19020619	0.16264732	0.26907216	0.48940197
0.19175258	0.23821751	0.27061856	0.34391144
0.19329897	0.34391144	0.27216495	0.23821751
0.19484536	0.48940197	0.27371134	0.16264732
0.19639175	0.68648486	0.27525773	0.10946274
0.19793814	0.94916644	0.27680412	0.07261592
0.19948454	1.29359982	0.27835052	0.04748359
0.20103093	1.73781555	0.27989691	0.03060564
0.20257732	2.30119578	0.28144330	0.01944489
0.20412371	3.00365204	0.28298969	0.01217743
0.20567010	3.86448681	0.28453608	0.00751713
0.20721649	4.90094917	0.28608247	0.00457398
0.20876289	6.12653228	0.28762887	0.00274336
0.21030928	7.54910410	0.28917526	0.00162188
0.21185567	9.16900610	0.29072165	0.00094515
0.21340206	10.97729330	0.29226804	0.00054291
0.21494845	12.95431444	0.29381443	0.00030740
0.21649485	15.06883787	0.29536082	0.00017156
0.21804124	17.27791150	0.29690722	0.00009438
0.21958763	19.52760087	0.29845361	0.00005118
0.22113402	21.75467972	0.30000000	0.00002736
0.22268041	23.88925781	0.30154639	0.00001441
0.22422680	25.85822918	0.30309278	0.00000749
0.22577320	27.58932421	0.30463918	0.00000383
0.22731959	29.01546298	0.30618557	0.00000193
0.22886598	30.07904933	0.30773196	0.00000096
0.23041237	30.73582444	0.30927835	0.00000047
0.23195876	30.95792096	浸水しない割合:	0.99999991

6.4 リンク信頼度・重要度の試算

前節までに計算した降水量・浸水深毎のリンク信頼度を利用して、名古屋市東区の道路網のリンク信頼度・重要度の試算を行う。これまでの計算結果を表 6-4-1 にまとめた。

6.2.3 で述べた範囲の道路でノード・リンクの設定を行ったものが図 6-4-1 である。リンク信頼度・重要度の計算にあたって設定した発着ノードは(3, 14)である。このノード間の移動には特定の目的(施設間の移動など)は想定していない。ただし、(3)が一番郊外側、(14)が一番都心側のノードになるので移動のイメージとしては都心⇄郊外となる。

また、重要度の計算には 5.3.2 の考えに基づいて部分パスセット選択を用いた。使用したパスセットを一覧にしたものが図 6-4-2 である。

表 6-4-1 降水量・浸水深毎のリンク信頼度のまとめ

降水量	リンク信頼度		
	浸水深0.2m未満	浸水深 0.2～0.5m	浸水深 0.5～1.0m
30mm	1(浸水しない)	1(浸水しない)	0.99999991
40mm	1(浸水しない)	1(浸水しない)	0.29448667
50mm	1(浸水しない)	1(浸水しない)	0.00002880
60mm	1(浸水しない)	0.99999996	0(完全に浸水)
70mm	1(浸水しない)	0.99508210	0(完全に浸水)
80mm	1(浸水しない)	0.70551333	0(完全に浸水)

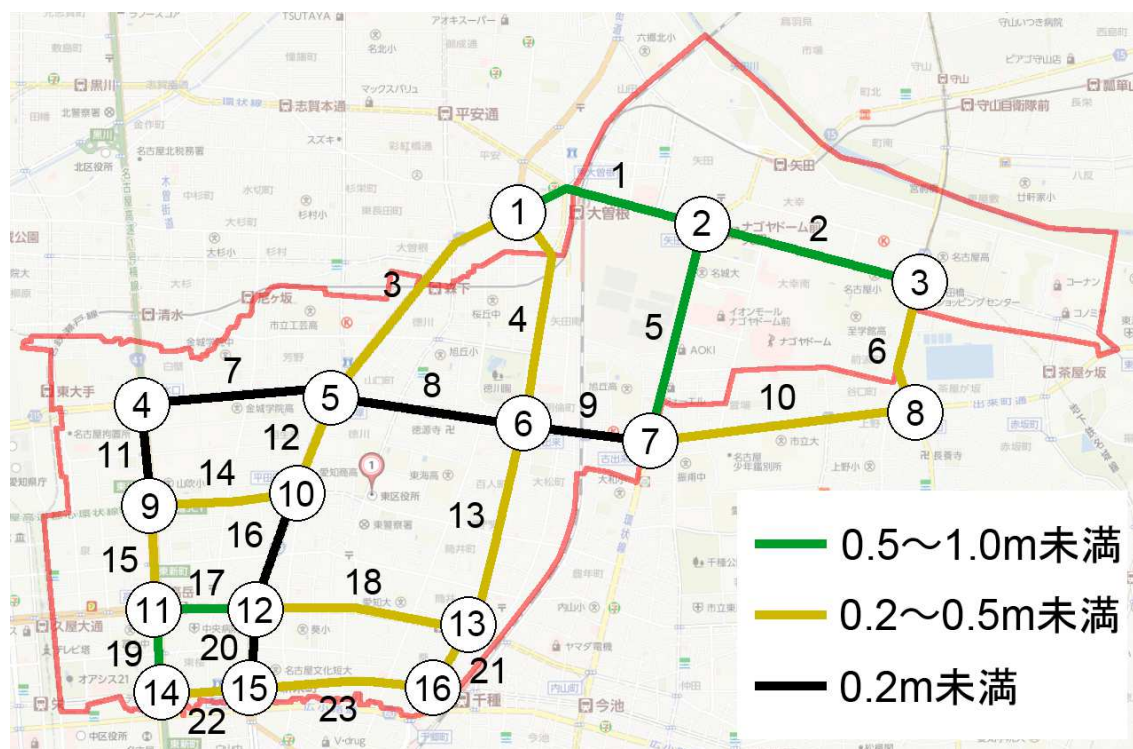


図 6-4-1 信頼度・重要度の試算を行う範囲（名古屋市東区）

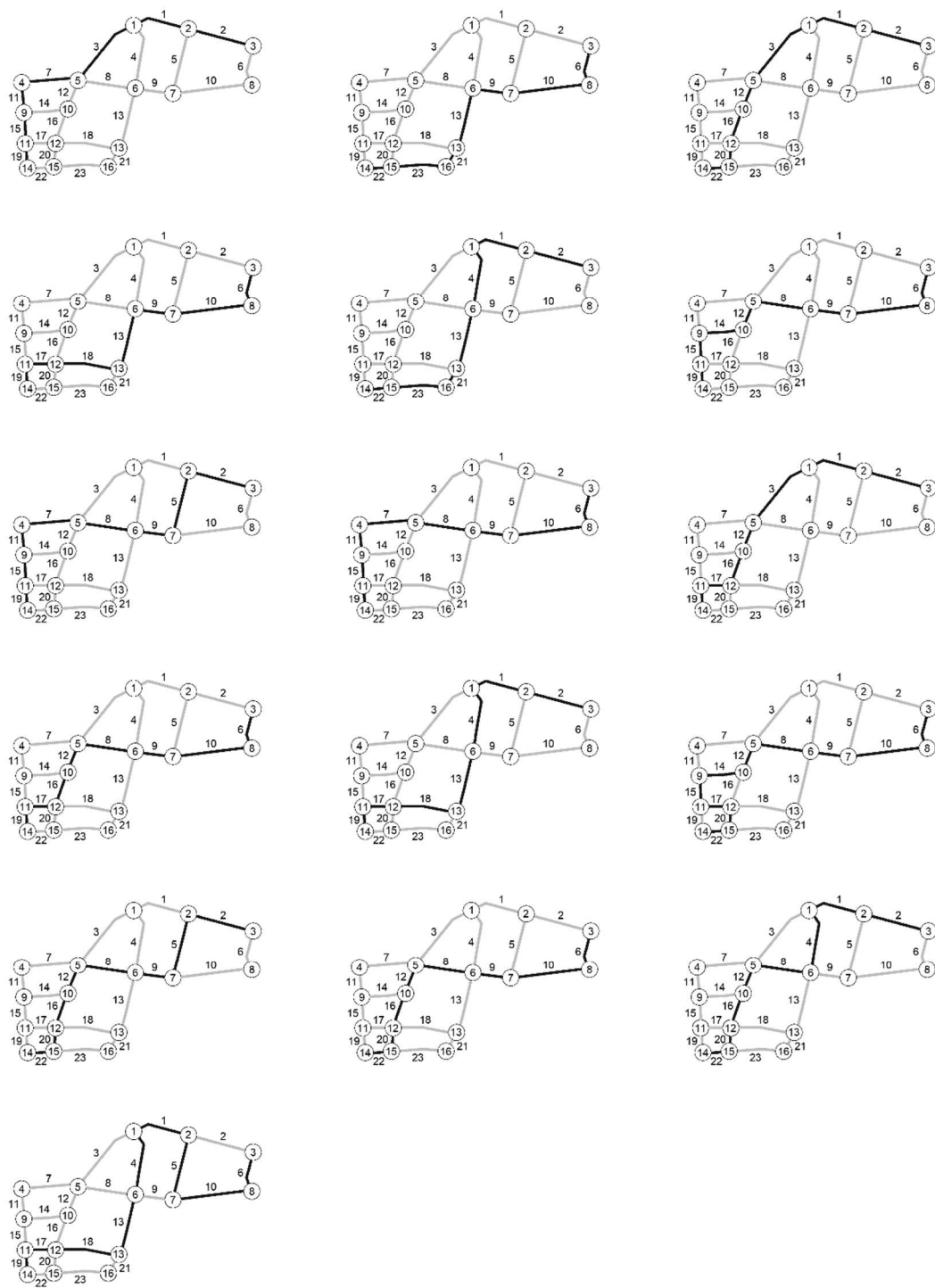


図 6-4-2 信頼度・重要度を計算する際に用いたパスセット一覧

6.4.1 内水ハザードマップとリンク信頼度の対応

今回用いるリンク信頼度は、正規分布グラフより算出した通行不能になる浸水深が発生する生起確率を、全体から引いた値とする。内水による浸水が発生した場合、浸水は1つの地点が浸水することによってその地点周辺への浸水も連動して発生していくと考えられる。そのため、浸水地点は部分的に発生するものではなく従属的に発生するものである。本研究では従属故障による方法を利用しリンク信頼度を求める。

故障個所が2箇所の場合、 r_a を一般的に表現すると、

$$r_a = (1 - R^{a_1})(1 - R^{a_1})^{(1-p/2)}(1 - R^{a_2})^{(1-p/2)} \quad (6.4.1)$$

と表すことができる。ここに p は、相関係数である。このとき従属故障時は、 $p = 1$ となり、この場合には

$$(1 - R^{a_1})^{(1-\frac{1}{2})}(1 - R^{a_2})^{(1-\frac{1}{2})} = (1 - R)^{(1-\frac{1}{2})}(1 - R)^{(1-\frac{1}{2})} = (1 - R) \quad (6.4.2)$$

となり、2ユニットの直列表現が1ユニットの直列表現となることで、従属性の表現ができる。したがって、本研究では従属故障を簡略的に表現する方法としてリンク内での最も大きい通行不能になる浸水深の生起確率を、そのリンクの故障率、すなわち通行不能確率として与える方法を用いることとする。図 6-4-1 はこの方法に基づいて各々のリンク信頼度を定めたものである。

6.4.2 降水量毎のリンク信頼度・重要度

上述のネットワークで降水量毎にリンク信頼度・重要度の計算を行った結果を表 6-4-2 にまとめた。プログラムの計算の都合上、1 の場合は 0.99999999 で代用している。重要度の覧の数字は、重要度の値を大きい順に並べた際の順位である。例えばこの数字が 1 ならば、重要度の最大値ということになる。

(1) 降水量が 30mm の場合

リンク信頼度は、どのリンクも 1 に近い値となる。重要度について上位 5 位程度までを見ると、 RI は (9)・(22)・(6)・(10)・(2) のリンクが、 ICI は (2)・(1)・(6)・(9)・(10)・(19)・(22) のリンクが選択された。 RI と ICI を比較すると、やはり RI の方が元々信頼度の高いリンクを選択する傾向にあることがわかる。

(2) 降水量が 40mm の場合

リンク信頼度は、浸水深 0.5～1.0m (表 6-4-2 の緑色の部分) の範囲が悪化する。重要度について上位 5 位程度までを見ると、 RI は (9)・(6)・(10)・(22)・(13) のリンクが、 ICI は (2)・(9)・(6)・(10)・(19)・(22) のリンクが選択された。30mm の時と比べると RI と ICI ともに、重要度の値にばらつきが出ている。ただし、依然として RI の方が元々信頼度

の高いリンクを選択する傾向にある。

(3) 降水量が 50mm の場合

リンク信頼度は、浸水深 0.5～1.0m(表 6-4-2 の緑色の部分)の範囲はかなりゼロに近くなる。重要度について上位 5 位程度までを見ると、*RI* は(9)・(6)・(10)・(22)・(21)・(23)のリンクが、*ICI* は(9)・(6)・(10)・(19)・(22)のリンクが選択された。40mm の時と比べると *RI* と *ICI* とともに、重要度の値にばらつきは減っていて同じ値を示すリンクが多い。ただし、依然として *RI* の方が元々信頼度の高いリンクを選択する傾向にある。30～50mm の範囲では重要度の順位はそこまで変動しない。

(4) 降水量が 60mm の場合

リンク信頼度は、浸水深 0.5～1.0m(表 6-4-2 の緑色の部分)の範囲はゼロとなる。重要度について上位 5 位程度までを見ると、*RI* は(22)・(6)・(10)・(9)・(12)のリンクが、*ICI* は(19)・(6)・(10)・(22)・(9)のリンクが選択された。50mm の時と比べると *RI* と *ICI* の選択リンクが類似している。(1)・(2)・(5)の順位が *ICI* でも低いのは、あまりにもリンク信頼度の値が小さすぎると *ICI* でも選択されないケースが出てくるのかもしれない。

(5) 降水量が 70mm の場合

リンク信頼度は、浸水深 0.5～1.0m(表 6-4-2 の緑色の部分)の範囲はゼロとなる。また、浸水深 0.2～0.5m(表 6-4-2 の橙色の部分)のリンク信頼度も悪化する。重要度について上位 5 位程度までを見ると、*RI* は(6)・(10)・(22)・(9)・(12)のリンクが、*ICI* は(19)・(6)・(10)・(22)・(13)・(21)・(23)のリンクが選択された。(1)・(2)・(5)の順位が *RI*、*ICI* とともに低いのは、50mm の時と同様である。

(6) 降水量が 80mm の場合

リンク信頼度は、浸水深 0.5～1.0m(表 6-4-2 の緑色の部分)の範囲はゼロとなる。また、浸水深 0.2～0.5m(表 6-4-2 の橙色の部分)のリンク信頼度もさらに悪化する。重要度については、上位 5 位程度までは *RI*、*ICI* とともに 70mm の時と同じ結果となった。

表 6-4-2 降水量毎のリンク信頼度・重要度の試算結果まとめ

降水量 リンクNo.	30mm			40mm			50mm		
	リンク信頼度	RI	ICI	リンク信頼度	RI	ICI	リンク信頼度	RI	ICI
1	0.99999991	7	2	0.29448667	14	7	0.00002880	14	7
2	0.99999991	5	1	0.29448667	12	1	0.00002880	13	6
3	0.99999999	17	8	0.99999999	20	18	0.99999999	17	16
4	0.99999999	15	8	0.99999999	19	18	0.99999999	17	16
5	0.99999991	11	8	0.29448667	15	8	0.00002880	15	8
6	0.99999999	3	2	0.99999999	2	3	0.99999999	2	2
7	0.99999999	21	8	0.99999999	21	18	0.99999999	17	16
8	0.99999999	9	8	0.99999999	8	13	0.99999999	8	12
9	0.99999999	1	2	0.99999999	1	2	0.99999999	1	1
10	0.99999999	3	2	0.99999999	2	3	0.99999999	2	2
11	0.99999999	21	8	0.99999999	21	18	0.99999999	17	16
12	0.99999999	8	8	0.99999999	10	14	0.99999999	11	12
13	0.99999999	14	8	0.99999999	5	10	0.99999999	5	9
14	0.99999999	20	8	0.99999999	21	18	0.99999999	17	16
15	0.99999999	21	8	0.99999999	16	17	0.99999999	16	16
16	0.99999999	13	8	0.99999999	11	14	0.99999999	10	12
17	0.99999991	10	8	0.29448667	17	9	0.00002880	17	16
18	0.99999999	16	8	0.99999999	18	18	0.99999999	17	16
19	0.99999991	6	2	0.29448667	13	5	0.00002880	12	4
20	0.99999999	12	8	0.99999999	9	14	0.99999999	9	12
21	0.99999999	18	8	0.99999999	6	10	0.99999999	5	9
22	0.99999999	2	2	0.99999999	4	6	0.99999999	4	5
23	0.99999999	18	8	0.99999999	6	10	0.99999999	5	9
降水量 リンクNo.	60mm			70mm			80mm		
	リンク信頼度	RI	ICI	リンク信頼度	RI	ICI	リンク信頼度	RI	ICI
1	0.00000000	13	13	0.00000000	13	13	0.00000000	13	13
2	0.00000000	13	13	0.00000000	13	13	0.00000000	13	13
3	0.99999996	13	13	0.99508210	13	13	0.70551333	13	13
4	0.99999996	13	13	0.99508210	13	13	0.70551333	13	13
5	0.00000000	13	13	0.00000000	13	13	0.00000000	13	13
6	0.99999996	2	2	0.99508210	1	2	0.70551333	1	2
7	0.99999999	13	13	0.99999999	13	13	0.99999999	13	13
8	0.99999999	6	10	0.99999999	8	10	0.99999999	6	10
9	0.99999999	4	5	0.99999999	4	9	0.99999999	4	9
10	0.99999996	2	2	0.99508210	1	2	0.70551333	1	2
11	0.99999999	13	13	0.99999999	13	13	0.99999999	13	13
12	0.99999996	5	6	0.99508210	5	5	0.70551333	5	5
13	0.99999996	11	7	0.99508210	10	6	0.70551333	10	6
14	0.99999996	13	13	0.99508210	13	13	0.70551333	13	13
15	0.99999996	13	13	0.99508210	13	13	0.70551333	13	13
16	0.99999999	6	10	0.99999999	6	10	0.99999999	6	10
17	0.00000000	13	13	0.00000000	13	13	0.00000000	13	13
18	0.99999996	13	13	0.99508210	13	13	0.70551333	13	13
19	0.00000000	12	1	0.00000000	9	1	0.00000000	9	1
20	0.99999999	6	10	0.99999999	6	10	0.99999999	6	10
21	0.99999996	9	7	0.99508210	10	6	0.70551333	10	6
22	0.99999996	1	2	0.99508210	1	2	0.70551333	1	2
23	0.99999996	9	7	0.99508210	10	6	0.70551333	10	6

6.4.3 降水量全体でみた重要度の計算結果の比較

6.4.2 の結果を元に、降水量全体でみた場合の *RI*, *ICI* の計算結果の傾向を比較したのが表 6-4-3 となる。この表は、降水量 6 パターンで算出したリンクの重要度の順位の数値を合計して、その値の小さい順に並べたものである。例えば、すべての降水量で順位が 1 位ならば、その合計は 6 となる。この数字が小さければ降水量に関わらず、当該リンクが重要であることを表す。

ネットワークの構造上、発着ノード(3, 14)に直接隣接するリンク(2)・(6)・(19)・(22)は重要度の順位も高くなるが、リンク(19)は浸水しやすい個所(浸水深 0.5～1.0m: 緑色)であるにも関わらず *RI* では順位が 12 位になっている。この結果はリンク信頼度の改善の指標としてはやはり問題があるといえる。一方、*ICI* ではリンク(19)は 3 位になっている。

また、すべての浸水深 0.5～1.0m のリンク(表 6-4-3 の緑色の部分)で *RI* よりも *ICI* の方が上位になっている。つまり、リンク信頼度の低いものを改善対象に選択する確率が高いということである。

表 6-4-3 降水量全体でみたリンクの重要度の順位

RI		ICI	
リンクNo.	順位の数値合計	リンクNo.	順位の数値合計
6	11	6	13
10	11	10	13
22	13	19	14
9	15	22	19
12	44	9	28
8	45	13	46
20	48	21	46
16	52	23	46
13	55	2	47
21	58	12	50
23	58	1	55
19	61	5	63
2	69	8	63
1	74	16	64
5	80	20	64
17	83	17	72
4	90	15	80
18	90	3	81
15	92	4	81
3	93	7	81
14	97	11	81
7	98	14	81
11	98	18	81

したがって、第 4 章と同様に道路網の信頼度改善には *RI* よりも *ICI* の方が適しているという結果を得た。

6.5 結語

この章では、実際の道路ネットワークにおいて内水災害を想定してリンク信頼度・重要度の計算を行った。

まず、第 2 節で内水ハザードマップの概要を説明し、リンク信頼度推定に用いる理由・目的について述べた。また、本研究におけるリンク信頼度推定の対象地域について概説した。

次に、第 3 節で内水ハザードマップを元にリンク信頼度を推定する方法について述べた。まず、通行不能になる浸水深の設定方法について記した。次に、降水量に対して浸水深がどのように変動するか仮定する方法を述べた。それを用いて正規分布グラフを作成し、降水量毎の推定を行った。

第 4 節では、上述の方法に基づいて実際に信頼度・重要度の計算を行った。内水ハザードマップのデータをリンク信頼度に適用する際は、リンクの範囲内の最大の浸水深を信頼度に置き換える方法をとった。これは、1 か所でも通行不能な範囲の浸水深があれば、そのリンクは通行できないという考え方に基づくものである。また、これらの計算には部分パスセット選択を用いた。計算の結果、降水量毎の重要度の高いリンクを比較すると、*RI* の方が *ICI* よりも信頼度の高いリンクを選択する傾向にあることが判明した。また、降水量全体でみた場合の計算結果をみるとネットワークの構造上、発着ノードに直接隣接するリンクは重要度の順位が *RI*、*ICI* とともに高くなる傾向があった。しかし、その中でリンク(19)は浸水しやすい個所であるにも関わらず *RI* では順位が低くなった。この結果はリンク信頼度の改善の指標としては問題があるといえる。一方、*ICI* では当該リンクは上位となった。また、すべての浸水しやすいリンクで *RI* よりも *ICI* の方が上位の結果となっている。つまり、信頼度の低いリンクを改善対象に選択する確率が高いということである。これは第 4 章、第 5 章と同様の結果である。したがって、*RI* よりも *ICI* の方が道路網に好適な重要度指標であるといえる。

参考文献

- 1) http://www.mlit.go.jp/report/press/city13_hh_000063.html [最終閲覧日:2021 年 2 月 10 日]
- 2) http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html [最終閲覧日:2021 年 2 月 10 日]
- 3) <https://www.city.nagoya.jp/bosaikikikanri/page/0000112396.html> [最終閲覧日:2021 年 2 月 10 日]
- 4) <http://www.river.go.jp/kawabou/reference/index05.html> [最終閲覧日:2021 年 2 月 10 日]
- 5) 前掲 4)
- 6) <https://www.sbbi.jp/article/cont1/32530> [最終閲覧日:2021 年 2 月 10 日]
- 7) https://mba.globis.ac.jp/about_mba/glossary/detail-11826.html [最終閲覧日:2021 年 2 月 10 日]

第 7 章 結論

本研究の結論と今後の課題について取りまとめる。

第 2 章では、信頼性工学・安全工学における大規模システムの信頼性解析方法を整理した。道路網の信頼性解析が他の一般システムと異なる主要な点は、次の 3 点に要約される。交通の経路を考慮する必要があること、多数の OD ペアの信頼性を対象とする必要があること、要求される精度はそれほど高くないことである。これらの要件を考慮した道路網における信頼性として、旅行時間信頼性と連結信頼性がある。本研究では、連結信頼性について取り上げた。連結信頼性は、「ネットワークの構成要素がある確率を持って途絶する場合、あるノードペア間が連結されている確率」と定義される。また、本研究における道路網の信頼性解析の考え方を以下のようにまとめた。

- ・ リンク信頼度を『規定の時点で機能を維持している確率または、ある期間中に機能を維持する時間の割合』と定義する。
- ・ 道路網の信頼度を、対象とするノード間があるサービス水準以上で連結される確率と定義する。
- ・ 道路網を一つのシステムと考え、ネットワークを構成するリンクをユニットと考えて、ネットワーク形状を与件としたときのシステム信頼度の解析法を研究する。
- ・ 道路網は定常な状態を想定する
- ・ 道路網における交通の諸特性を考慮して、効率的でかつ解精度も保証される道路網信頼性解析法の開発とその解法を解明する。

次に、本研究における重要度評価について、『リンク信頼度を向上させた場合のノード間信頼度への寄与度』と定義した。また、現状の重要度指標の課題について整理した。

- (1) 確率重要度 RI 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) 重要度指標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。

第 3 章では、信頼性グラフ解析の基礎的事項を整理するとともに、道路網の信頼性解析に適用する方法論を考察した。まず、構造関数と信頼度との関係、および構造関数の構成法を述べた。道路網の信頼性解析には、多数の OD ペアの信頼性を対象とする必要があるので、構造関数の構成法にはミニマルパス・カットによる方法が適している。

次に、信頼度の厳密値を求める諸方法の比較と問題点を整理し、道路網での利用可能性を考察した。厳密値の計算法は、いずれもネットワーク拡大にともなって計算量が指数的に増加する。しかし、その増加量を規定する要因は解析方法によって異なる。ミニマルパス・ミニマルカット数に規定される方法では、パス・カット数を操作可能変数とすることで、後述する近似計算法として有効な方法になる。

第4章では、重要度指標を道路網に適用する際に必要なことを考察した。

確率重要度(RI)やクリティカリティ重要度(CI)では並列ネットワークにおいて、低信頼度のリンクが無視される、高信頼度のリンクをさらに改善することが技術・費用面で難しいことを反映できない、の2点が問題となった。これを克服するために提案するのが改良型クリティカリティ重要度(ICI)である。

そこで、 RI 、 ICI の信頼度改善の計算の比較分析を行うことで、道路網に適した重要度指標を検討した。並列・田の字型・Sioux Falls ネットワークで試算を行った結果、改善に必要な総コスト・費用対効果・リンク改善の公平性の観点で概ね ICI が RI よりも優れていることが判明した。ただし、リンク信頼度の値が大きくなると両者の差が縮まる傾向があるとの結果を得た。

したがって、高信頼度のシステムで用いられる PSA の重要度を加えて信頼度改善の試算を行った。その結果、全体的な傾向としてリンク信頼度に関わらず結果の値は概ね RI と RAW 、 ICI と FV が類似していることが判明した。総コストについては、低信頼度では ICI が、高信頼度では FV が優れていた。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、高信頼度での値は、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。リンク改善の公平性の観点では、 ICI が優れていた。

全体としては、道路網に好適な重要度指標は ICI であるという結果を得た。

また、リンク信頼度の値を必要としない脆弱性の概念について検討・考察を行った。結論として、重要度指標と脆弱性指標の最大の違いは、所要時間の要素が最初から含まれているかどうかである。連結信頼性における重要度は、はじめからその要素が含まれているわけではないが、それを考慮することは可能であるといえる。

第5章では、大規模道路ネットワークにおいて信頼度計算を行うための、近似解法について考察した。まず、システム信頼度の種々の近似解法について整理した。一部のミニマルパス・カットを用いる近似解法(部分パスセット選択)では、パス数を制限することによってネットワークの拡大に対処しやすい。また、計算に使用するパス数を1本ずつ減らせば、計算量は指数的に減少するので近似解法として極めて有効である。

次に、近似解法の必要性として、ネットワークが拡大した際の計算時間や部分パスセット選択で必要なパス数などを検証した。信頼性の計算は、パス数が増加するにつれて

計算時間が指数的に増加することが判明した。また部分パスセット選択による近似解法は、いかにパス数を抑えるかが計算量の削減の鍵となる。厳密値と比較して、重要度の順位に変動がなければ近似解として有用であるため、パス数毎に重要度の計算を行った。その結果、すべてのリンクが含まれる範囲でパス数を減じれば、重要度の順位の変動が抑えられ、近似解として実用的であることが判明した。

さらに、厳密解の計算が困難な規模のネットワークで同様に部分パスセット選択を行い、重要度の順位の変動を検証した。その際、複数のパス選択方法によって重要度の順位が異なるかを比較した。その結果、リンク信頼度の値の範囲が大きい場合はすべてのリンクが含まれるパス数であったとしても、パス選択方法によって重要度の順位が変動することが判明した。ただし、重要度の最大値を示すリンクはほぼ同じリンクとなった。また、より現実的と考えられるリンク信頼度で計算した際は、依然として「すべてのリンクが含まれる範囲のパス数」であれば、パス選択方法に関わらずリンクの重要度の順位はほぼ同一となった。

第6章では、実際の道路ネットワークにおいて内水災害を想定してリンク信頼度・重要度の計算を行った。

まず、内水ハザードマップの概要を説明し、リンク信頼度推定に用いる理由・目的について述べた。また、本研究におけるリンク信頼度推定の対象地域について概説した。

次に、内水ハザードマップを元にリンク信頼度を推定する方法について述べた。まず、通行不能になる浸水深の設定方法について記した。次に、降水量に対して浸水深がどのように変動するか仮定する方法を述べた。

そして、上述の方法に基づいて実際に信頼度・重要度の計算を行った。その結果、降水量毎の重要度の高いリンクを比較すると、*RI*の方が*ICI*よりも信頼度の高いリンクを選択する傾向にあることが判明した。また、降水量全体でみた場合の計算結果はネットワークの構造上、発着ノードに直接隣接するリンクは重要度の順位が*RI*、*ICI*ともに高くなる傾向があった。しかし、その中で浸水しやすいリンクであるにもかかわらず*RI*では順位が低くなるリンクが存在した。この結果はリンク信頼度の改善の指標としては問題があるといえる。一方、*ICI*では当該リンクは上位となった。また、すべての浸水しやすいリンクで*RI*よりも*ICI*の方が上位の結果となっている。つまり、信頼度の低いリンクを改善対象に選択する確率が高いということである。

したがって、*RI*よりも*ICI*の方が道路網に好適な重要度指標であるといえる。

今後の課題としては、他の災害シナリオも含めて*FV*、*RAW*も併せて実際のネットワークで計算を行い、重要度指標間の比較をすることが必要である。また、今回は他分野における指標についても考察を行ったため、これをさらに発展させ分野横断的に重要度・脆弱性指標群の長短を用途別にまとめるのも一考である。

(謝辞)

最後になりましたが、今回の研究を遂行するにあたって、終始暖かいご指導を賜ってくださった若林拓史教授に心から御礼を申し上げます。また、大野栄治教授、森杉雅史教授ならびに柄谷友香教授には、本論文の審査をしていただくなど、論文執筆にあたり有益なご助言を賜りました。深く感謝申し上げます。最後に、研究を進める過程で計算の補助などで助力を頂いた大嶋康平君、河村航太君、若林研究室の皆様にも感謝を申し上げます。