

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

The Development of Methods for Road Network Reliability Analysis
and Its Reverse Application to the Lifeline Network

若林 拓史* , 飯田 恭敬**

By Hiroshi WAKABAYASHI and Yasunori IIDA

In this paper, firstly the differences of the characteristics of reliability analyses are discussed among an electrical circuit system, a road network system and a lifeline network system. Requirements for reliability analysis for the road network system are summarized. The road network reliability analysis becomes more complicated than the other systems since it requires the considerations of the route choice behaviour of drivers and of the multiple terminal reliability. Secondly, the approaches to the road network reliability analysis developed by the authors are introduced. Thirdly, a new method for a large scale network are proposed. This method focuses on the cut sets of network, and on the demand flow and capacity for each cut set. The characteristic of this method are discussed through the numerical analysis.

1. はじめに

本論文ではまず最初に、信頼性解析を行うにあたり、エレクトロニクスや機械システム等の一般システムと道路網および電力・通信網、パイプライン、ガス・水道管網等のライフラインシステムの特性を比較し、その相違点を明確にする。次に、道路網信頼性解析への種々のアプローチを整理する。さらに、新たに開発した簡便で一般的な方法を取りあげ、道路網のみならずライフラインネットワークも含めたその適用性を考察するものである。

道路網の信頼性を考える場合、その目的とするところは、新しい道路網整備水準指標を提案し、たとえ自然災害や渋滞によってネットワークの一部が機

* 正会員 工博 大阪府立工業高等専門学校 助教授

(〒572 寝屋川市幸町26-12)

** 正会員 工博 京都大学工学部 教授

(〒606 京都市左京区吉田本町)

能を喪失し不通区間が生じても、ODペア間の交通移動は保証できる道路ネットワークづくりを目指すことである。この基本的理念はライフラインネットワークの信頼性解析と同一であるが、交通流の特性（交通の経路の考慮が必要、多数のODペアの信頼性を対象とする必要がある）等を考慮する必要があるため、ライフラインネットワークの信頼性解析よりも複雑さが増している。また、道路網は大規模なシステムであり、一般に大規模システムでの信頼性解析は、計算量が膨大となりきわめて困難とされている。したがって、道路網信頼性解析では、交通の諸特性に合致した評価解析法の確立が重要となると同時に、計算の実用性と現象の記述性をどう両立させるか、さらに簡便な計算法の開発が課題となっている。

本論文では、そのための基本的アプローチとその後の展開を整理する。すなわち、基本的アプローチとしては

① 数理モデル的アプローチ

② 現象記述モデル的アプローチ

および、①、②それぞれから発展する、より実用的で計算の容易な方法への展開を整理する。最後に、②より発展する簡便なモデルについて、道路網のみならずライフラインネットワークへの適用性を考察する。この方法は、道路網のカットセットに着目したものであり、主として断面の容量とその断面への需要の両者から、ネットワークの信頼度を計算する方法である。この方法は、計算が容易であること、交通量配分計算の出力を用いることができるため、現在行われている交通需要推計プロセスに付加する形で信頼度が計算でき、実用性に優れていると考えられる。また、計算方法をより簡略化すれば、交通フローばかりではなく、電信・電話回線網やパイプライン・水道管網等の一般的なライフラインネットワークの信頼度解析にも適用することが可能という特徴も有している。

2. 一般的なシステムとライフラインネットワークおよび道路網での信頼性解析の考え方の比較

信頼性解析はエレクトロニクスや機械システムの分野で発祥・発展してきたものである。本節では、これらのシステムと道路網あるいはライフラインシステムとを比較して、その特性の相違を明確にする。信頼性解析法には、大きく分けてRGA（信頼性グラフ解析法）とFTA（フォールトツリー解析法）が存在する。道路網やライフラインネットワークは、グラフ理論で記述できるため、多くの共通点を有するRGAに基づいて述べる。これらのシステム間の主な相違点は以下のようにまとめられる。

（1）複数ノード間の信頼性解析の必要性

まず最初に、エレクトロニクスや機械システム（これらを一般システムとよぶ）における信頼性解析では、考慮の対象であるシステム信頼性すなわち、システムの達成目的が単一である。これは、システムを信頼性グラフで記述した場合、特定の入力・出力の2点間信頼度のみを扱うことを意味している。これに対し、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一般在に複数であるから、多点間の信頼性を対象とする必要がある。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は異なっている（通信ネットワークは双方向通信が行われる点で少し特殊である）。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おればよい。これらは例えば、電力網や水道網で1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は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。さらに、道路網では、一部のODペアが交通移動不能の状態になっていても、他の部分は生き残って機能している場合があり、マルチコモディティフローであることが道路網の信頼性解析を複雑にしている。

（2）経路の選択問題の取り扱い

信頼性工学でのシステムと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、相当な迂回経路であっても許容される。例えば、電話回線は空いている回線があれば、それは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とされている。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という特殊性がある。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、道路網では選択経路の考慮がきわめて重要であり、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。

（3）要求される解精度の相違

システムが大規模となると、信頼性解析に要する計算時間や記憶容量は指数的に増加するため、信頼度の厳密値は計算困難となり、近似解析法が一般に利用されている。

エレクトロニクス・機械システムの分野で対象とする通常のシステムでは使命達成要求がきわめて高く、ユニットが高信頼度、したがってシステムの信頼度も非常に高いので、RGAではシステム信頼度

ライフラインネットワークにおいては、信頼性指標の利用目的によって必要な解精度も異なるが、整備水準を問題にするのであれば、道路網の考え方に近いのではないかと考えられる。

3. 道路網信頼性の解析法

道路網信頼度とは、冒頭でも述べたように、たとえ自然災害や渋滞によってネットワークの一部が機能を喪失し不通区間が生じても、あるサービスレベルでODペア間の交通移動が保証できる状態の確率表現である。ここでは、サービスレベルとして円滑な走行移動が保証される状態を考え、道路網信頼度を算出する種々の方法を整理する。

(1) 数理モデル的アプローチ：少数のミニマルパス・カットを用いた解析法

リンク信頼度を与件として2点間の信頼性を解析するための代表的な方法に、ミニマルパスとミニマルカットを用いた方法がある²⁾。伝統的な信頼性工学の分野では、構造関数の期待値計算による厳密値解法³⁾の他、Inclusion-Exclusion Methodによる厳密値解法および近似解法²⁾、Esary・Proschanの π ・ Λ 下限

値³⁾、Fratta・Montanariによる方法⁴⁾等が知られている。しかし、これらの計算にはすべてのバス・カットが必要となる点に問題がある。道路網は大規模なシステムであるので、計算量が膨大になるばかりではなく、計算に必要なバス・カットの探索さえ困難となる。そこで、筆者らは、すべてのバス・カットを用いるのではなく、部分的なバス・カットを選択してきわめて効率的に信頼性計算を行う方法を提案した^{5)~7)}。提案した方法には2種類あり、ブール演算と組み合わせて上・下限値を求めるブール演算法と、ブール演算を省略した交点法とがある。

(a) ブール演算法^{5), 7)}

この方法は、部分的なミニマルパスおよびカットを選択し、ブール演算を用いてノード間信頼度の上・下限値を求める方法である。数式的には、パスおよびカットで構築されたそれぞれの構造関数の期待値をとることで信頼度の下限値および上限値が得られる。選択するパスやカットが、交通の経路やスクリーンラインに対応するため、道路網信頼性解析の要件である交通工学的特性を考慮することが可能となり、この結果、実際における交通対策と結び付けて信頼性解析の結果を利用することができる。この方法では、パスあるいはカットのどちらかだけで信頼度の近似値が計算可能であることが特色である。また、確率変数の情報が保存されるため、信頼性の向上策の指針となる確率重要度の計算が可能な点にも特色を有している。

(b) 交点法^{6), 7)}

信頼度計算が膨大化する原因の1つは、既に述べたようにシステムの大規模化に伴って計算に必要なバス・カット数が莫大な数となることであり、もう1つの原因は、ブール演算である。この方法は、(a)で述べた部分的なバス・カットの利用に加えて、ブール演算も省略したものである。この方法では、ミニマルバスで表現された式の値が、選択バス数の増加にともなって下限値から上限値へと単調増加し、ミニマルカットで表現された式の値が、選択カット数に関して上限値から下限値へと単調減少する性質を利用し、両曲線が交差する点をもって近似値とする方法である。得られる近似値は、すべてのミニマルバス・カットを利用して得られるEsary・Proschanの上限値と下限値にはさまれた値となることが保証

される。部分的なバスやカットしか必要としないこと、ブール演算を経由しないことから、本解析法は従来の解析法に比較して計算量が格段に少なくすむという大きな特徴を有している。そのため、大規模ネットワークに適用可能な方法となっている。

(2) 交通量の明示的考慮⁸⁾

(1)のアプローチでは、リンク信頼度を与件としていた。これは、ある時間帯のリンクのサービスレベルを一定期間観測した観測値を利用することを想定している。しかしこの方法では、ネットワーク上の対象リンクすべてに対して、統計的な調査と分析を行う必要があり、経済的にも作業量の面からも問題が多い。また、将来推定や交通計画の代替案に対する推計計算も不可能である。そこで、リンク信頼度を交通量の諸特性値や交通容量の関数として求めることが考えられる。すなわち、リンク a のリンク信頼度を r_a とすると、

$$r_a = r_a(V_a, C_a)$$

とするのである。筆者らは、リンク信頼度を、リンクフローの変動特性から推定するモデルを構築し、検討を進めている。リンク信頼度をこの方法によって推定し、(1)で述べたシステム信頼度推定モデルと組み合わせることが考えられる。この方法によって、交通管制や交通規制の信頼性向上にもたらす効果の分析等、動的な問題に対応できる。

(3) 交通現象記述型モデル⁹⁾

(1),(2)のモデルが、信頼性工学に基礎をもつ数理モデルであるのに対し、交通の現象を従来の交通工学的アプローチで記述しつつ、道路網の信頼度を求める現象記述的解析法が考えられる。

この方法は、信頼性解析に交通量配分を用いる手法である。モデルの概要は以下のとおりである。

ネットワーク中の任意の数のリンクを、所与の故障確率（リンク不信頼度）に従って故障させる。この故障リンクの集合を対象ネットワークから除去して、交通量配分を行う。交通量配分の過程で交通渋滞や迂回による容量超過リンクを見出し、これらのリンクを対象ネットワークからさらに取り除く。このときに、交通不能断面（グラフ理論でいうカット）が発生しているかどうかを調べる。交通不能断面が発生していなければ、このネットワークは所与のODフローを円滑な交通サービスで処理できることと

なる。このシミュレーションを多数回繰り返すことによって、ネットワークの信頼度を求める。

この方法では、Wardropの等時間原則を常に実現することから、より実際の検討が可能であるが、大規模ネットワークでは計算時間が膨大となるため、小規模ネットワークや集約されたネットワーク等での利用に限定される。したがって、マクロな観点からの検討が中心となっており、基本ネットワークに環状道路が追加された場合の信頼性向上効果の検討¹⁰⁾や環状道路パターンと放射道路パターンの優劣を、各種ODパターンとの適合性からみた検討⁹⁾等を行っている。

4. 交通断面に着目した簡便な信頼性解析法

(1) 本手法の特徴と目的

3.(3)で述べた信頼性解析法は、交通量配分を繰り返す行うため計算量が膨大となる欠点がある。しかしながら、1回の交通量配分の過程では種々の交通指標が得られる。また、交通計画のために交通量配分は実務レベルで従来から行われている。したがって、これらの情報を信頼性解析に利用することができればきわめて有用であると考えられる。本節では、交通量の配分時情報を利用して、道路網の信頼性を評価すると同時に、リスクのある交通断面を評価する手法の構築と提案を目的としている。ここで交通断面とは、後述するカットの概念であり、この断面を横切る交通の諸指標を用いてネットワークの評価をしようとするものである。具体的には、交通断面と、配分時の情報と組合わせて、断面における交通量や交通容量等から簡便に信頼度を求める方法を提案する。このモデルの特色は、実務レベルでの実用性を考え、モデルが複雑化することを避けて簡便性と実用性を追求した点である。そしてここでは、一般的な方法論を確立することを目的とし、そのための基本モデルを紹介する¹¹⁾。

(2) 交通断面の定義と本モデルの基本的考え方

交通断面とは、グラフ理論でいうカットセットの概念と同じものであり、この断面でネットワークが2つの部分に分離・分割されるものと定義する。リンクの信頼度とは、そのリンクが機能している（円滑な走行移動が可能な）確率とし、そうでない場合

にはリンクが機能していないと定義する。したがって、断面の信頼度を、その断面が円滑な交通処理機能を有する確率と定義する。本研究では、道路網信頼度を求める基本的考え方として、交通断面を、

(a) 断面の信頼度、

(b) その断面が道路網全体に占める重要度(後述)、で評価し、この評価指標を総合化して道路網全体の信頼性指標とすることを考える。

(3) 交通断面の信頼度とその計算法

交通断面が求められると、その断面の構成リンクに対する交通量と交通容量とから、その断面の信頼度を以下に述べる方法で求める。

この方法は、断面の構成リンクの総交通容量と当該断面への総交通需要との大小関係で断面の信頼度を求める方法である。

いま、断面の構成リンクの交通容量の総和を断面容量と呼ぶことにする。仮に、断面を通過する交通量(これを断面交通量と呼ぶ)が断面容量より小さい場合でも、その断面を構成するリンクのいくつかに故障が生じた場合には、その断面は交通需要を円滑に処理できないこととなる。

断面を構成するリンクに故障が生じる組み合わせは、断面リンク数が n ならば、 2^n 個存在する。 2^n 個の組合せそれぞれについて、断面内のリンクが機能していれば1、故障していれば0として真理値表を作成し、リンク信頼度 r_a を与え、それぞれの事象の発生確率を求める。

第 s 断面における第 t 事象の生起する確率 p_{Kst} は、

$$p_{Kst} = \prod_{a \in K_s} r_a^{x_{at}} (1 - r_a)^{1-x_{at}} \quad (1)$$

で与えられる。ここに、 K_s と a はそれぞれ第 s 断面及びリンク番号を表し、 r_a はリンク a の機能する確率(リンク信頼度)である。また x_{at} は、

$$x_{at} = \begin{cases} 1 & \text{, リンクが機能しているとき} \\ 0 & \text{, リンクが機能していないとき} \end{cases} \quad (2)$$

で与えられる2値変数である。またこのとき、断面 K_s の断面容量 C_{Kst} は、リンク a の容量を C_a として、

$$C_{Kst} = \sum_{a \in K_s} x_{at} \cdot C_a \quad (3)$$

で与えられる。配分時に得られるリンク a の交通量 x_a とすると、この断面の総交通量 x_{Ks} は、

$$x_{Ks} = \sum_{a \in K_s} x_a \quad (4)$$

である。以上から断面 K_s が機能するのは、 C_{Kst} が x_{Ks} を上回る場合であるから、

その確率 p_{Ks} は、

$$p_{Ks} = \sum_{a \in K_s} p_{st}, \text{ for } x_{Ks} \leq C_{Kst}, \quad (5)$$

で与えられる。通行不能となる確率は p_{Kst} を1から引けばよい。

(4) 断面の設定法

交通断面は多数存在するが、断面の抽出設定は重要な断面が洩れ落ちることなく、かつ断面数は少なく、機械的に進めることが望ましい。本研究では、オリジナルネットワークを横断するように双対ネットワークを作成し、外部ノード間でのミニマルパスを構成リンクの少ないものから1次独立性を考慮して交通断面を設定した。このようにすると道路網のすべてのリンクがいずれかの断面に含まれると同時に、同一リンクが過度に重複して複数の断面に含まれることもないという利点がある。図-1のネットワークを対象とし、このネットワークの上下に外部ノードをもつ双対ネットワークを用いて断面を設定すると、図-2の9個の交通断面が得られた。

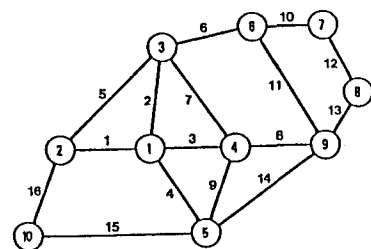


図-1 ネットワーク形状

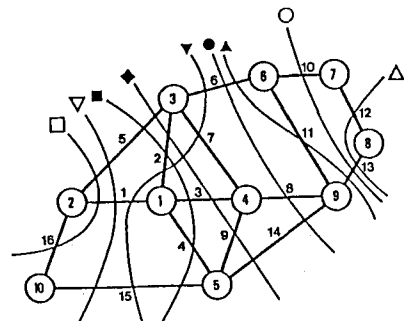


図-2 設定した交通断面

(5) 交通断面の重要度とネットワークの信頼度

本手法では、(a)で述べた交通断面の信頼度の他に、断面の重要度という概念を用いている。

交通断面がその機能を発揮せず、交通不能断面となると、その断面上でのノード間で円滑な走行移動が不可能となる。その断面が小規模であれば、ネットワーク全体に及ぼす影響も小さいといえるが、その断面が大規模となって多くの交通に大きな影響を及ぼすようになれば重大事となる。そこで、その断面がネットワークにとってどの程度重要か、という指標を考える。断面の重要度を反映する指標として、次の2種類を考える。

(a) 最も簡単な指標として、その断面を通過するトリップ数に着目する。その断面のネットワークへの影響度はその通過する交通量に反映すると考えられるからである。しかし、交通量のみを考慮するため、その断面を通過する交通の性質までは考慮できない。すなわち、その断面を通過する交通量が同じであっても、その構成が近距離交通からなる場合と遠距離交通からなる場合とでは、ネットワークへの影響度も異なると考えられる。そこでトリップ長を考慮した交通指標を考える。

(b) その断面を通過する交通量とその走行距離に着目する。これは前述の(a)の欠点を補うための考え方で、その断面を通過する近距離トリップ交通と長距離トリップ交通とを明確に区別しようというものである。具体的には交通量とトリップ長の積とし、台キロの次元をもつものとなる。

断面の重要度とは、上述の(a)あるいは(b)で求められた断面の交通指標(交通量や台キロ)のネットワーク全体での交通指標に対する割合と定義する。

最後に、ネットワークの信頼度を次のように考える。断面 K_s の重要度を I_{K_s} 、断面の信頼度を R_{K_s} とする。ネットワークの信頼度 R_N を次式で定義する。

$$R_N = \sum \{ (I_{K_s} / \sum I_{K_s}) \times R_{K_s} \} \quad (6)$$

(6) 数値計算例

対象ネットワークは図-1のネットワークとし、需要交通量は、発生・集中交通量が、中心部が高密度、周辺部が低密度となるODパターンを考える。本研究では、リンクの信頼度やOD交通量は簡便に与えることとし、リンクの信頼度は一律に0.9、交通量は

前出のOD交通量を基本交通量として、その1.0倍、1.5倍、2.0倍を配分交通量とした。

まず最初に、断面の信頼度と重要度との関係、および交通量の増加に対する変化を考察する。まず、断面の信頼度と重要度との間には、次のような関係があると考えられる。

断面の構成リンクが少なく、かつ断面容量も小さい場合、1つのリンクが通行困難となるとその断面への影響は大きいと考えられる。すなわち、断面が通行不能となる確率も大きくなるが、その反面その断面を通過する交通量は比較的小さいために、その断面の重要度は小さいと考えられる。逆に、断面の構成リンクが多く、かつ断面容量も大きい場合には、断面が通行不能となる確率も小さくなると考えられる。しかしながら、その断面を通過する交通量は多くなると考えられるので、その断面の重要度は大きくなる。本研究で提案するネットワークの信頼度指標は、このような性質をもつ2つの数量の積和で表す考え方である。

まず、基本交通量に対して、リンク交通量は図-3の上段のようになる。容量超過リンクはリンク10のみであり、リンク交通量は容量に対しかなりゆとりがあると考えられる。すなわち、断面容量の断面交通量に対する余裕は大きい。この交通量に対し断面の信頼度および重要度(重要度はトリップ数に基づく)の関係をみると(図-4)、上述のように断面容量が大きければ(例えば断面{1,2,6,7,15},断面容量28000台)、重要度も大きく、かつこの交通量に対し断面の信頼度も大きくなっている。これに対し、断面容量の比較的小さい断面では、重要度も小さく、断面の信頼度も低くなっている(例えば、断面{12,13},断面容量16000台)。次に、基本交通量の1.5倍の配分交通量に対して、容量超過リンクはリンク10と14のみであるが、他のリンクでも容量に対する余裕は少なくなっている。このとき、いくつかの断面では、断面の信頼度が急激に低下する(図-4)。さらに交通量が大きくなると、断面の信頼度が零となる断面が出現する。これは、配分時の交通量(基本交通量の2倍)で既に断面容量が不足していることに起因している。このように、断面によっては重要度が大きく、断面の信頼度が最初は大きくても、交通量が増大すると、急激に断面の信頼度が低下する

断面が存在する。この傾向は、台キロ指標についても同様であった。

以上述べたように、重要度が高くても断面の信頼度が急激に低下する断面があり、このような断面はリスクの高い断面であるといえる。これらの断面に関しては早急な道路網の整備が必要であると考えられる。

次に、ネットワークの信頼度について述べる。ここでは、図-2の上下方向の断面に加えて、双対ネットワークの外部ノードを左右方向に配した左右方向断面も考え、両者の比較を行いながら考察を行う。計算結果を、表-1,2に示す。

配分交通量が単位交通量の場合、指標間および断面間で各指標間に大きな差がなく、0.93~0.95の値をとっている。この場合、ネットワークの各リンクで、交通容量からみた余力が相当あり、そのため交通不能断面が生ずる確率も小さくなって、ネットワーク評価値が1に近くなったものと考えられる。また、トリップ数指標、台キロ指標の間でも、評価値の値の差は大きくない。この理由は、断面重要度をポテンシャルとしてのみ利用するため、重要度の断面間での相対的關係にのみ評価値が依存すること、また、ネットワークが小規模なために、トリップ長構成に大きな差がなく、したがって長トリップの影響が大きく出る断面が少なかったためと考えられる。

配分交通量が、単位交通量の1.5倍となると、ネットワーク評価値も低下する。この交通量では、容量を超過したリンクはまだ少ないが、いくつかの断面で断面の信頼度が低下することがネットワーク評価値が低下する原因となっている。

配分交通量が、単位交通量の2.0倍となると、ネットワーク評価値は急激に低下する。この原因は、図-4でみられるように、配分時点での断面交通量が断面容量を既に超過しており、それらの断面の信頼度が零となることが原因である。左右方向断面による評価値は、そのような断面が著しく増加することから上下方向断面よりもさらに低下している。したがって、このOD交通量に対して、このネットワークは左右方向の交通に対しては強く、上下方向の交通にはもろいネットワークといえそうである。

以上述べたように、ここで取り上げたネットワーク形状、ODパターンに対して、交通量が少ない段

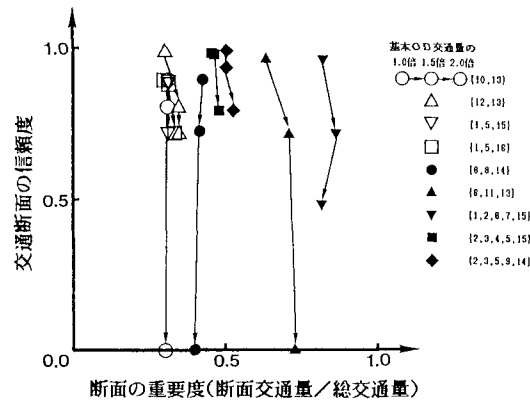


図-3 断面の信頼度と重要度との関係

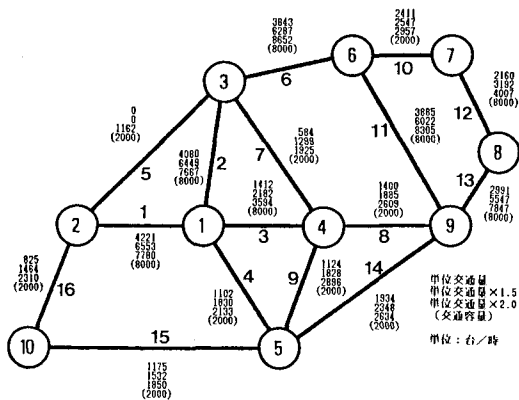


図-4 ネットワーク上の交通量と交通容量

表-1 ネットワークの信頼度(上下方向断面)

指標 \ 交通量	単位交通量 ×1.0	単位交通量 ×1.5	単位交通量 ×2.0
トリップ数指標	0.95359	0.81918	0.48019
台キロ指標	0.95339	0.81349	0.45639

表-2 ネットワークの信頼度(左右方向断面)

指標 \ 交通量	単位交通量 ×1.0	単位交通量 ×1.5	単位交通量 ×2.0
トリップ数指標	0.93550	0.82727	0.29559
台キロ指標	0.93600	0.82211	0.28288

階では断面設定の方法如何にかかわらず、本指標の値にあまり差はなかったが、交通量が増加すると、断面設定による相違が現れた。ネットワークにおける交通流動の方向性とネットワークの諸元とがあいまって、断面設定の相違によって評価指標に差が現れる。したがって、本指標では、交通量が増加する

と、ネットワークがどの方向の交通に強い、あるいはもろいことを明示できる。このことは、道路網の整備にあたっての有用な情報となると考えられる。

5. 本手法の課題とライフラインへの適用性の考察

以上述べたように、本研究では道路網の交通断面を利用してネットワークの信頼性評価が行えることを示した。この方法では、配分時情報を利用するので、ネットワークの交通量や交通容量を明示的に取り扱え、そのうえ計算量も比較的少なくすむという利点を有している。また、この方法は、大規模な道路網でも計算できるので、簡便な信頼性評価手法として利用することが可能である。ただしこの場合は、双対ネットワークによって設定される断面数が増加するので、断面の設定法を変えて代表的な断面を抽出して評価を行う必要がある。

この方法の問題点は、交通の経路として非現実的な大回りの経路にも交通が迂回することである。したがって、すべての経路に迂回が行われる小規模なネットワークに利用が限定されると考えられる。道路網では、長距離の迂回が行われないため、この方法を広域のネットワークに直接利用することは問題があると考えられる。この問題の解決法は、交通量配分から得られる他の指標、例えばリンク利用率等を利用して、迂回する経路を限定することであり、現在検討を進めている。

次に、ライフラインネットワークへの適用を考察する。2節で考察したように、ライフラインネットワークは道路ネットワークでの条件を緩和したものとなっている。したがって、本論文で述べた方法はライフラインへの適用が可能である。交通断面による方法は、相当な迂回が許容される電話回線網、電力網等のライフラインネットワークの信頼性解析には、そのまま利用が可能と考えられる。また、リンクに容量制限のある管路網の信頼性解析にも応用が可能であると考えられる。具体的には、断面を設定してその断面のもつ容量制約と、ネットワークと輸送物の特性に応じた配分手法（あるいは需要配分的手法）によってフロー値を計算すればよい。重要度の考え方も同様に扱える。これに対して、3節で紹介したバス・カット法は、交通の利用経路が限られていることから、対象ネットワークをある範囲に

限定して解析を行うことを前提としている。したがって、きわめて大回りの経路も重要な経路とみなされるシステムではこのようにネットワークを限定することはできず、一般システムと同様の取り扱いとなる。

参考文献

- 1) 井上統一：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。
- 2) 井上統一：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。
- 3) Barlow, R.E. and Proschan, F.: Mathematical Theory of Reliability, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 飯田恭敬・若林拓史・吉木 務：ミニマルバス・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。
- 7) 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。
- 8) 若林拓史・飯田恭敬・井上陽一：交通量変動に着目した道路網のリンク信頼度の推定法，土木学会第45回年次学術講演会概要集第4部，1990。
- 9) 飯田恭敬・若林拓史：ODパターンと道路網パターンの相違による道路網信頼性のマクロ的考察，交通工学，Vol. 23，No. 3，pp. 9-19，1988。
- 10) 若林拓史・飯田恭敬：信頼性からみた環状道路の整備効果の検討，第17回日本道路会議一般論文集，pp. 34-35，1987。
- 11) 若林拓史・飯田恭敬：交通断面に着目した道路網の性能評価法について，土木学会第43回年次学術講演会概要集第4部，pp. 236-237，1988。