

討議 (和文)

**DISCUSSION
/CLOSURE**

[討議・回答]

若林拓史

飯田恭敬 共著

井上陽一

“シミュレーションによる道路網の交通量 変動分析とリンク信頼度推定法”への 討議・回答

(土木学会論文集, No. 458/IV-18, pp. 35~44, 1993年1月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

溝上章志 (九州東海大学)

Shoshi MIZOKAMI

1. はじめに

筆者らも述べているように、ネットワークの信頼性解析は、(1) システムを構成するユニットの信頼性を与件としてシステム全体の信頼性を求める問題と、(2) 個々のユニットの信頼性を推定する問題の2つから構成される。とりわけ、交通ネットワークでは、その上を流れるフローがマルチコモディティであり、それらは経路選択などに関する交通主体の行動規範に基づいているという点で、通信網や電気回路ネットワークなどに比べてその信頼性の解析は容易ではない。

本論文は日々の交通量変動に対して、(2) のリンク信頼度を推定するモデルの開発を目的とした精力的なものである。しかし、上記のような交通ネットワークの持つ特性を個々のリンクの信頼度の特定化に反映させることが交通ネットワークを対象とした信頼性解析には必要不可欠であるという点、およびシミュレーションの使用法とその結果の利用に関して、いくつかの問題を含んでいると思われる。そこで、本論文に対して若干の討議を試みさせていただくことにする。

2. 交通ネットワークにおけるリンク信頼度

本論文では、リンク交通量は日々のOD交通量の変動によって確率的に変動し、その実現値が当該リンクの容量を越えない確率としてリンク信頼度を定義している。その際、正規乱数によって変動させたOD交通量を配分して得られるリンク交通量サンプルが各リンクで正規分布に従うことをシミュレーションより検証し、この分布はリンク相互に独立であると仮定してリンク信頼度の算出に用いている。ここには、大きな問題が二つあると考えられる。

交通ネットワーク上では、利用経路を構成するリンク上の交通量変動には相関がある。また、任意のODペ

ア間の有効経路上の経路交通量相互にも相関がある。にもかかわらず、リンク交通量の分布はリンク相互で独立と仮定することはネットワークフローの持つ特有の性質を全く無視していることになるといえよう。これが1つめの問題点である。

2つめの問題点は、リンク交通量の分布形を特定化する(ここでは交通量の分散値を平均値から推定する)のにも上述のシミュレーションから得られたデータが用いられている点である。現実道路網における特定道路区間の日交通量の平均値と日々の分散との関係は、その区間の相対的位置や機能、沿道の土地利用条件などから決まると考えられる。本論文も最終的には現実道路網上の各道路区間にリンク信頼度を設定することを目的としているはずであるから、交通ネットワークにおける交通量変動の分析は現実道路網における各道路区間の機能や物理的特性との関係から総合的に考察されるべきであろう。このような分析は、溝上¹⁾が時間帯別の交通量変動に対して、朝倉²⁾が日々の交通量変動に対してすでに行っており、ある程度の成果を挙げているので参考になるかもしれない。また、筆者らが現実データからの分析の困難さの理由に挙げている観測データの確保に関しては、常時観測データなどが容易に利用可能であることから、なんら問題はないと考えられる。かなり困難ではあるが、重要な課題であると思われるので、以上について著者のご意見や解決のための展望を示唆願いたい。

3. シミュレーションの方法について

ひるがえって考えると、これらの問題はシミュレーションの使用法とその結果の把握の仕方に本質的な問題があるということになる。実際の現象把握が容易でない場合、その再現手法として用いるシミュレーションは、その仮定や使用法の妥当性、および再現結果の現実性が検証されるべきである。

本論文において、日々のOD交通量変動に依存してリンク信頼性が評価されるという仮定を採用するのであれば、日々の変動を記述する方法の紹介やそれらの特徴を著者らの知る限りで述べる必要があると思われる。また、この仮定は適切としても、得られたリンク交通量サンプルの特性値（平均値や変動係数）は何らかの方法で現象との突き合わせが必要であろう。なぜなら、各道路区間に出現する交通現象（リンク交通量の平均値と分散、およびその分布形）そのものは物理的な現象であるからである。さらに、本論文では、シミュレーションにより得られたサンプルの特性値（変動係数）を、やはり同一サンプルの別の特性値（平均値）で説明するモデルを作成している。この結果はシミュレーション結果を説明するには適切であるかも知れないが、本来再現しようとした現象を説明するものではない。これらの点についてお考えを併せて伺いたい。

また、シミュレーションの方法については、たとえばOD交通量の確率変動に相関を与える方法などはいくつかの論文ですでに採用されているので、それらを適切に参考文献とするのが良いと考えられる。

4. おわりに

本方法の開発により、将来のネットワークについても、また交通条件に影響を受けることなくリンク信頼度の推定が可能であると7.で結論されている。しかし、本研究成果を現実道路網に適用しようとした場合、たとえば当該道路区間が通勤通学交通の処理機能を持つ道路なのか通過交通の処理機能を持つ道路なのかで日々の交通量は固有の特性を持って変動しているという現実をモデル化することが逆に不可能になるなどの課題を残しているように思われる。

参考文献

- 1) 溝上章志・松井 寛・可知 隆：日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発，土木学会論文集，Vol. 401，pp. 99～107，1989.
- 2) 朝倉康夫・柏谷増男・熊本仲夫：日リンク交通量変動の推定にもとづく道路網信頼性評価，土木計画学研究・講演集，No. 13，pp. 591～598，1990.

(1993. 6. 30 受付)

▶回答者 (Closure)———若林拓史 (大阪府立工業高等専門学校)，飯田恭敬 (京都大学工学部)
Hiroshi WAKABAYASHI and Yasunori IIDA

1. はじめに

道路網の信頼性評価の研究は、道路網の質的水準あるいはサービスレベルの評価を目指してはじめられたものである。その目的とすることは、ネットワークの形状比較や道路網管理運用策の評価、さらには道路網の管理運用計画やネットワーク構築を目指すものである。

溝上氏の討議に関してであるが、まず、拙稿に対してご精読をいただいたことおよび、貴重なご討議をお寄せいただいたことに深く感謝申し上げます。

2. 従属故障の考慮

まず、討議の第1点であるリンク間の従属性の取り扱いについては以下のように考えております。討議者は、リンク交通量の分布が各リンクで独立であると論文中で仮定していると指摘しておられますが、論文では特にこのことについては明示的に述べませんでした。以下で少し説明を付け加えておきたいと思えます。

各リンクの交通量は交通量配分によって求めていますので、交通量の平均値 \bar{v} と分散 σ^2 は各リンクで相関があるのは事実です。しかしこの論文においては、各リンクごとに分散（変動係数から求められる）は平均値（式中では混雑度を利用している）の関数で表されるとして取り扱っています。すなわち、

$$COV = \alpha \cdot \exp(-\beta(g + \delta)) + \gamma \dots \dots \dots (1)$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: パラメータ
 g : 混雑度 (\bar{v} /交通容量)
COV: 変動係数 (σ/\bar{v})

の関係式によって、交通量の平均値が求まれば、混雑度、変動係数を介することによって分散値も決まる構造となっています。交通量の変動が正規分布に従うとするなら、平均値と分散値が決まると正規分布の形が特定され、これからリンク交通量がその容量を超過する確率、すなわちリンク信頼度が求められることとなります。このようにして各リンクの信頼度を決めるのが、本論文の基本的な考え方となっています。

厳密なことをいえば、リンク交通量の変動分布は、リンク相互の相関を考慮した多変量分布形にするのが望ましいと思われます。このときはリンクの数だけの変量を有する多変量分布となります。この分布形を決めるには、配分シミュレーションを何度も繰り返し、母数パラメータとなる各リンクの平均値と分散共分散値を求めることによって行えます。しかしこの分布形から、あるリンク交通量はその容量を超える確率を決定するのは容易なことではありません。そしてこの前に、分布形を特定する統計的な検定が必要となりますが、これもまたきわめて困難な作業です。

ここで大事なことは、このような方法を用いたのでは、本論文の目的とする各リンクの信頼度を簡便に求めるこ

とに反してしまうことであります。式(1)のもととなった、

$$\sigma^2 = p\bar{v}^q \dots \dots \dots (2)$$

の関係が成立することや、リンク交通量の変動が単純正規分布に従うことはすでにいくつかの文献で検証されています。このようなこれまでの研究成果による仮定にもとづいて、平均値としてのOD交通量を1回配分するのみで、各リンクの信頼度をいとも簡単に求められるというのが、本論文で提案する方法の大きな特徴となっています。もう一度繰り返しになりますが、各リンクの信頼度を求めるためには、上で述べた理由から、リンク交通量の変動分布をそれぞれ独立に取り扱っても、実用的にはそれほど問題はなからうということでもあります。

この開発の意図は、データ制約の多い将来推定や代替案比較に利用しようとするものです。なお、従属性の問題は、(1)のユニットの信頼度を推定する問題ではなく(2)のシステム信頼度の推定に属する問題と考える方が妥当と思います。本論文は、(1)のリンクの交通量変動特性と信頼度を推定する方法を提案しただけで、(2)のノード間信頼度の推定問題を扱った論文ではありません。(2)については、従属性の考慮が重要であるという認識は筆者も持っているので、本論文の対象外になりますが、ノード間信頼度の推定問題にも踏み込んだ形でも回答したいと思います。

ユニットの信頼度を与えてシステムの信頼度を求めるいわゆるシステム信頼性解析の問題(上の(2)をさす)は、数学的記述の利便性からユニット間の独立性を仮定しているが、そのような仮定においても、その解析に相当な時間がかかり、その要する計算時間や記憶メモリの量はシステムの拡大に伴って指数的に増加する¹⁾。この原因は、計算を行うためには道路網でいうノード間のパス・カットをすべて必要とすること、および計算過程で必要となるブール演算によるものである。例えば、著者らの数値解析によると、厳密解法は9ノード24リンクの格子状ネットワークでは実行可能であるが、その場合でもCPU-TIMEは当時のスーパーコンピュータで約740秒であり、それ以上の規模のネットワークではCPU-TIMEが制限時間を超えるため計算が不可能であった²⁾(厳密解法では計算時間は2の累乗に比例するので、いくら計算機の計算速度が向上しても、その能力を上回るネットワークをつくることは可能である。仮に計算速度が倍になれば、ネットワークのリンクを1本増やすだけでその効果は相殺される)。また、従来提案されてきた近似解法でもシステムのパスあるいはカットがすべて必要であるので、理論上計算時間は指数的に増加することに変わりはなく、この方法の大規模道路網への適用は困難である。

筆者らが提案した交点法³⁾では、その計算過程でブー

ル演算が不要となり、また、パス・カットの探索を等価な n 番目最短経路探索問題に置き換えているためにきわめて簡単に信頼度が計算可能という利点を有している。道路網は大規模システムであるため、信頼度のリンク間独立性を前提とした従来の方法では膨大な計算が必要であるのに対し、道路網の整備水準を議論する目的から、実用的で簡便な近似解法として一歩進めることができた点に大きな特色があると考えている。この解の特色は、近似値がEsary・Proschanによる上・下限値の間にあることが保証される点である。ここに、Esary・Proschanによる上・下限値とは、複数パスセット間およびカットセット間に関連性の概念(あるユニットが故障したならば他のユニットも故障しやすくなること)を適用したものである。しかし、従来の手法と同様にユニット間の従属性を明示的には考慮しているものではない。

以上のような背景から、従属性の取り扱い、道路網信頼性解析では重要な問題であるが、信頼性の計算実行可能性と調和する形で進められるべきである。しかし現在の手法でも、信頼性指標を絶対的な意味よりは相対的の評価として利用するのなら問題は少ないと考えている。例えば、道路網計画や管理運用策の代替案評価あるいは道路網整備水準評価指標としての利用である。

信頼性工学の分野では、多少の従属性を考慮した故障の取り扱いは、長期にわたって蓄積された経験と技術者の工学的判断による数値計算上での補正で行われている⁴⁾。このことは、ユニット間の故障に従属性があっても、独立性の前提で構築された信頼性解析法が有用に利用されていることを示している。この背景は、上で述べたように従属故障の数学的な取り扱いに相当な困難があるためと思われる。しかしながら、従属故障の明示的考慮の必要性は高く、近年になって、原子力発電所等を対象とした従属故障の信頼性解析研究が進展している。いくつかの手法も提案されているが、現在のところ適用可能な従属故障のタイプは限定されている⁵⁾。道路網信頼性解析への適用という観点からこれらの手法をレビューしても、その適用可能性は小さいようである。シミュレーションを繰り返す方法も考えられるが、計算効率の点で問題も多い。したがって道路網における従属性の概念を考慮した信頼性解析は、独自の方法を開発する必要がある。道路網においては、従属故障の主たる原因は交通量であるので、単純化が可能かもしれない。1つの方法として考えられるのは、リンク信頼度を、リンク間に何らかの影響係数(例えば交通量の共分散行列等)を導入し、信頼性解析の過程でその従属性を考慮するものである。ここで、討議者が指摘するような信頼性解析の実行以前にリンク信頼度を修正するのではなく、パス・カットを選択した時点で考慮することが重要である。なぜなら、リンク間での信頼度の従属性は、パス・カットの選択に

依存して決まるからである。つまり、対象とするノードペアが変われば従属性の対象範囲も変わり、リンク信頼度を事前に修正することはメリットがない。このようにすることで、交点法の計算容易性を損なうことなく、従属性の考慮と計算可能性の両立が図れるのではないかと考えている。この研究は現在進行中であり、近い将来発表したいと考えている。

3. リンク交通量の変動について

2つ目のご指摘であるリンク交通量の分布を特定化することに關して、ご指摘あるいは拙稿中でも述べているように幹線性、昼夜率、休日係数、市街地性、交通の目的等の各道路区間の機能や物理的特性、あるいは沿道条件等の考慮も重要と考えております。しかしながら、リンク交通量の日々の変動の主要原因はODフローの変動であることから、このことの考慮を第一とすべきであると考えます。そして、この変動の背景として交通が経済的社会的活動の派生需要と考えている点に本研究の特徴があります。朝倉らの研究⁶⁾では交通量変動をリンクの属性と数量化理論で与えるモデルを提案しており、将来予測や代替案評価をする場合には操作性の問題もあって困難な点もあるとは思いますが、本研究でのモデルとは相補的なモデルであると思えます。本論文では予測モデルを念頭に置き、リンクフローの変動をできるだけ単純な形で捉えたいという意図もあって、このような形でリンク交通量の変動モデルを与えました。今後、平均フローから分散を求める際に他の要因を考慮することは今後の課題としています。しかし同時に、現況再現性を向上させようとするれば説明変数を増やせばよいが、予測モデルにおいては操作性を高めるために説明変数を減らすべきと考えます。また、常観データの利用については、リンクフローの変動は捉えられますが、ODフローの変動はわからず、また交通量—密度関数の2価性の問題もあり、単純には利用できないと思えます。このあたりは、論文の冒頭および5.で述べておりますのでもう一度ご確認ください。ただし、本モデルでは、実証分析の作業が課題として残されており、本モデルの検証のためのデータとして常観データの利用は重要であると考えています。

この問題と關連して、3.でのご指摘いただいている日々の変動を記述する方法について、論文中で述べているように、飯田・高山論文⁷⁾で提案された方法を発展させる形でモデルの提案を行っております。飯田・高山の方法は予測モデルという点で成功していると考えます。ただし、混雑率を明示的に考慮していないので、混雑度を明示的に考慮した関数モデルを本研究では提案したものです。日々の変動を表現する方法および特徴は、朝倉らの論文⁶⁾および拙著論文で挙げた文献がある程度で、論文のレビューが不足しているかもしれませんがあまり多く

はないと思います。溝上氏らの論文については、研究の目的や着眼点異なるため参考文献にはしませんでした。なお、本関数モデルの開発終了後に発表された、寺田・西村・日野らによる感知器データによる自動車交通量の変動特性の分析⁸⁾があります。この研究では、大阪市内における時間帯別の週間変動を分析し、都心部の朝夕の混雑にもかかわらず変動係数が0.1前後であることを明らかにした点で注目すべき研究であると思えます。現実のデータを分析したこの研究は、本研究の妥当性の一端を支持していると考えます。

最後に、モデルはシミュレーション結果を説明するには適切かもしれないが、本来再現しようとした現象を説明するものではないとされている点について、本研究での結果を観測データに照らして実証する研究が今後の課題であると思えます。繰り返しますが、本研究では、観測値からリンク交通量の変動を捉えることは可能でも、その根本原因であるOD交通量の変動を補足できないことから、シミュレーションによる方法を展開しております。また、OD交通量の確率変動に相関を与える方法については、いくつかの論文がありますが⁹⁾、その具体的方法については記述がなされていなかったため、操作変数を変えた数種の方法を試み、そのうちの1つを論文に載せております。これも、紙数の関係から詳しく述べることはできませんでした。参考文献については、交通量変動に關係のある文献のレビューはすべて載せるべきであるのかもしれませんが、そうすると何を主張している論文かわからなくなると思えます。引用した箇所にオリジナリティがある場合やその論文と全く同じ方法を利用した場合、および当該研究と密接に關係している論文の場合に参考文献を明記するのがよいと思えます。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 鬼沢武久・菅野道夫：あいま理論を用いた故障解析，計測自動制御学会論文集，Vol.20, No.6, pp.498~505, 1984.
- 5) 熊本博光：PRA（確率論的リスク評価）ガイド，日本原子力研究所昭和62年度受託調査『信頼性解析手法の現状調査』調査報告書，pp.88~100, 1988.
- 6) 朝倉康夫・柏谷増男・熊本仲夫：交通量変動に起因する広域道路網の信頼性評価，土木計画学研究・論文集7, pp.235~242, 1989.
- 7) 飯田恭敬・高山純一：高速道路における交通量変動特性

- の統計分析, 高速道路と自動車, Vol.24, No.12, pp.22~32, 1981.
- 8) 寺田幸紀・西村 昂・日野泰雄: 感知器データによる自動車交通量の変動特性の分析, 平成3年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, pp.IV-10, 1991.
- 10) 例えば高山純一・飯田恭敬: 周期変動を考慮した実測交通量による交通需要推計法, 土木計画学研究・論文集1, pp.43~50, 1984.
- (1993.11.25 受付)