

交通ネットワークサービスの信頼性解析に関する研究動向*

Reliability Analysis of Transport Network Services: Research Trends*

倉内文孝**・宇野伸宏***・嶋本寛****・山崎浩気*****

By Fumitaka KURAUCHI**・Nobuhiro UNO***・Hiroshi SHIMAMOTO****・Hiroki YAMAZAKI*****

1. はじめに

21世紀における社会経済システムはより複雑かつ活動的になり、交通サービスの量的な充実のみならず、サービスの質を評価し向上させることが重要である。交通サービスの質を評価する一つの指標として信頼性の考え方がある。災害などの突発事象が発生してもネットワーク全体として大きな機能低下が生じない、といった災害等に関する耐性や、交通集中などに起因する渋滞時発生時にも深刻な遅れが生じない、という交通需要の変動に対する頑健性の評価がその考え方の一例である。本稿では、交通信頼性評価指標、計測評価手法について、国内外の研究動向を整理する。今後の交通サービスの信頼性研究の方向性を議論するための情報提供を目的とする。

2. 文献調査の方針

英文論文は、Web of ScienceにおいてTransport, Network, Reliabilityのキーワードにより抽出された文献に加え、交通ネットワーク信頼性に関する国際会議に関連する書籍^{1), 2)}に含まれる論文について引用文献および被引用文献を収集した。和文論文は、CiNiiにおいて交通・ネットワーク・信頼性のキーワードによりピックアップされた文献のうち、車両制御技術開発等の本研究の対象とするものと合致しないものを除き、整理した。

3. 交通ネットワーク信頼性の概念整理

交通ネットワーク信頼性分析は、日々の需要変動や些細な突発事象の影響など日常的に生じうる事象に関する評価の側面と、災害発生時などの日々の知識が通用しないような状況に関する評価の側面に分類される。これら2つの側面は大きく異なった観点からのものであり、それらを同列に表現することは適当ではない。

(1) 非日常的な状況に関する指標

非日常的な状況とは、ネットワークにおいて想定外の事象が発生したことを前提とするケースである。ネットワークの構成要素が機能低下した際に、それが機能する

かどうかを評価するのが基本的な概念である。ネットワークの信頼性評価は、システム工学などでは古くから研究が進められているが、土木工学分野においても同様の考え方を採用し、災害発生時における信頼性をどのように確保するのかに注目されてきた。非日常的な状況を評価するための指標としてまず提案されたのが連結信頼性(Connectivity reliability)³⁾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。そもそも連結性のみを評価するものであるため、リンク容量までを評価していないという点が問題点として指摘されている。一方で、各リンクの途絶に関して、各道路区間の容量以上を超えた場合にはその区間は途絶している、として取り扱うことで容量も考慮する考え方も提案されている⁴⁾。オリジナルの連結信頼性の評価においては、ノードペア間の連結性のみを評価するため、ネットワークへフローを配分する必要はない。しかしながら、その厳密解を求めるためにはノードペアを接続しうる経路を数え上げる必要があるため、大規模ネットワークにおいては求解が困難な問題として位置づけられている⁵⁾。

連結信頼性の考え方が、交通容量を明示的に考慮していない点を受けて提案されたのが、容量信頼性(Capacity reliability)⁶⁾である。容量信頼性は、「ネットワーク構成要素が機能低下する場合に、ネットワーク容量がある許容可能なレベルを保持する確率」と定義される。ネットワーク容量を算定する際には、機能低下による利用者の対応行動を仮定しており、利用者均衡状態として記述されている。容量信頼性指標は、連結信頼性指標とは異なり、ネットワークレベルでの指標である。

連結信頼性、容量信頼性の課題として、発生需要が固定的に扱われている点が挙げられる。この課題に対応したのがDu and Nicholson⁷⁾の提案したフロー減少信頼性(flow decrement reliability)である。需要変動型の利用者均衡モデルを活用し、需要供給関係の結果として生じる交通需要の減少がある閾値を超えない確率としてflow decrement reliabilityを定義している。朝倉ら⁸⁾の災害時における信頼性評価において、交通抵抗に応じてトリップ取りやめを考慮しているのも類似した考え方といえる。

(2) 日常的な変動に対する信頼性解析指標

* キーワーズ：交通ネットワーク信頼性

** 正員，博士（工学），京都大学工学研究科都市社会工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂，Tel: 075-383-3235, kurauchi@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp）

*** 正員，博士（工学），京都大学経営管理大学院

**** 正員，博士（工学），（社）システム科学研究所

***** 学生員，京都大学工学研究科都市社会工学専攻

交通ネットワークシステムに想定外の機能低下がなかったとしても、日々の需要変動や天候などの外的要因などによって、交通のサービスレベルは変動する。このような日常的な所要時間の変動を評価することも交通ネットワーク信頼性解析の重要な事項である。

所要時間信頼性 (travel time reliability)³⁾は、連結信頼性の概念が接続性のみを考慮するのに対して、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できる確率」と定義され、定時性を評価する指標となる。所要時間信頼性指標は、経路ベースで定義されるものであり、それをノードペア間、ネットワーク全体に拡張する場合、経路選択確率を考慮する、OD需要により重み付けする、などの工夫が必要である。

また、需要パターンの変動に対してネットワーク容量がある閾値を確保する確率、という形で、容量信頼性指標を日々の変動に対して活用することも可能である。

4. 交通ネットワーク信頼性研究のアプローチ

本章においては、様々に提案されている交通信頼性研究に関して多側面から整理を試みる。

(1) 問題のフレームワークの設定

信頼性研究の対象を、現状のネットワークを評価することを目的とするのか、あるいは全く何も無い状態から信頼性の高いネットワークの構築を試みるのか、という視点で分類する。システム工学の分野においては、いかに信頼性の高いシステムを低コストで構築するか、という視点での研究が多い。一方で、道路交通ネットワークにおいては、全く道路網が存在しないケースを想定することは非現実であり、現状ネットワークの信頼性評価⁸⁾、現状ネットワークにおける信頼性の観点から重要なリンクの抽出⁹⁾、もしくは信頼性の観点から新規のリンク構築位置の検討¹⁰⁾、といった研究事例が中心である。

(2) 求解手法の検討

システム工学分野においては、新規ネットワーク(システム)構築における信頼性評価に関する研究が多いため、定式化される問題のほとんどは厳密解を得ることは困難であるため、求解方法の検討が非常に多かった。効率的な求解法としてGraph分割法の検討¹¹⁾や、問題の数理特性の検討⁵⁾などが行われている。また、システム工学や通信工学の分野における信頼性解析においては、ネットワーク上を移動する際の経路について問題となることはない。しかしながら、交通ネットワークにおいては、利用者の所要時間が重要な要素となり大きな迂回は許されない。さらに、一般的には利用者の経路選択は利用者自身の意思決定に任されており、ネットワーク管理者がコントロール可能なものではない。利用者行動を考慮する場合、一般には利用者均衡などを前提とした行動規範の下で、目的関数を最適化する2レベル最適化問題とし

て定式化しなければならない。この場合、信頼性評価をする際に、均衡問題を毎回解く必要があるため、計算負荷が高い。それを緩和するために、ベースケースにおける均衡計算を行った後に、感度分析によって機能低下時のフローを表現する方法¹²⁾が提案されている。

(3) 変動の取り扱い

機能低下や需要変動を考え、信頼性指標を算定する際には、モンテカルロ法によるシミュレーションアプローチを用いることが一般的である。たとえば、朝倉¹³⁾は、OD交通量は所与の確率分布に従うと仮定し、乱数を用いてそれを変化させ計算を繰り返すことで連結信頼性および所要時間信頼性評価を試みている。これを拡張し、たとえばネットワークデザインを評価するとすれば、試行解ごとにモンテカルロシミュレーションを実施する必要があり非常に計算負荷が高い。前提とする変動要因にも起因するが、インプットの変動を解析的に表現し、アウトプットの変動をとらえる方法もいくつか提案されている。Clark and Watling¹⁴⁾や中山ら¹⁵⁾は、Probit-based SUE均衡を前提とし、OD交通需要の変動に対する総走行時間の変動を解析的に求める方法を提案している。また、Lo et al¹⁶⁾は、リンク容量のみが変動することを仮定し、その際の所要時間変動を解析的に求める方法を提案している。これらの方法を活用することで、少なくとも交通需要あるいはリンク容量の変動に対するサービスレベルの変動が解析的に求められるため、これらをベースとした信頼性評価モデルの提案が可能となる。

(4) 潜在的危険性の評価

非日常時の状況に対する評価においては、リンクの機能低下などが発生した際の評価を行うが、このような手法のひとつの問題点は、リンクの機能低下の危険性をどのように評価するか、という点である。一般的には過去の経験に基づきその発生確率を想定することとなるが、地震災害など稀事象ではその確率を精度よく推定することは容易ではない。一つの考え方として、最悪のケースを考える方法が提案されている。このような評価方法は、脆弱性分析 (Vulnerability analysis) と呼ばれる。中心となる考え方は、事象の発生確率に重きを置くのではなく、あくまでその結果 (impact) の評価を考える、というものである。Berdica¹⁷⁾は、ネットワークモデルにおける入力変数の変化を出力指標の変化としてとらえる考え方を提案しており、また、D'Este and Taylor¹⁸⁾は、アクセシビリティを評価指標とした脆弱性評価を提案している。さらに、Bell¹⁹⁾は、利用者と邪悪な存在 (evil entity) を仮定し、両者のゲームを通じて脆弱性評価を行う考え方を提案している。

(5) 想定する利用者行動と道路交通管理者の権限範囲

利用者行動を全く考えず、なおかつリンク容量も考慮する必要がない場合には、ノードペア間の連結信頼性の

みの評価で十分となる。一方で、リンク容量も考えた上でネットワークへ需要を配分するのであれば、何らかの配分原則を用いる必要がある。その配分規範は、道路交通を管理しているものの利用者行動への権限範囲とも関連することに注意する必要がある。一般的には、災害を考えると緊急時 - 復旧時 - 復興時 - 平常時というサイクルがある。災害発生直後の緊急時には、緊急車両のみの通行を許可し、利用可能な道路資源をそれらに割り当てることが可能である。このような状況下においては、いかにシステム全体を効率的に活用するか、という視点での議論が重要であり、限定された緊急需要に対して総走行時間の最小化を前提とした評価が適切と考えられる。一方で、時間がたてば道路利用者の自由度も大きくなっていき、その元では異なった仮定も重要となる。また、利用者の対応可能な行動選択肢も災害からの発生時点に応じて変化する可能性が高い。経路選択の変化のみを評価するのか、交通機関の選択も含め議論すべきであるのか、さらには発生需要の変化までをとらえる必要があるのか、という点についても考慮すべき問題である。

(6) 不確実性の定量化

不確実性下の交通行動について、とりわけ旅行時間信頼性と交通行動という切り口で既存の研究を概観してみると、SPならびにRPデータを用いて、旅行時間の変動や信頼性を説明変数として明示的に用いて、非集計行動モデルの構築を試みた研究^{20),21)}と、交通の混雑や旅行時間の不確実性の緩和につながる施策(例えば交通情報の提供)の効果に関する示唆を得ることを目的とした研究^{22), 23), 24)}に大別される。前者は、推定された行動モデルのパラメータに基づき、時間価値や旅行時間信頼性の価値が推定される場合が多い。例えば、Lam and Small²⁰⁾では、ロジットモデルにより通勤者の経路選択と車両の乗車人数、料金支払いの車載器の搭載などの選択とを結合したモデルを推定し、その結果に基づき通勤者の時間価値ならびに旅行時間の信頼性の価値を推定している。施策評価を目的とした研究としては、例えばEttema and Timmermans²⁴⁾の研究では、旅行時間の不確実性に伴う負の効果ならびに旅行時間情報の便益を評価するため、旅行時間の不確実性が存在し、情報が提供されている状況下での出発時刻選択を表す概念モデルを提案している。

信頼性評価を目的としたネットワーク配分モデルにおいては、利用者の行動規範としては平均的な所要時間の最小化を仮定しているものも多く、不確実性下の行動を考慮した研究事例は多くはない。わずかに、行動規範に不確実性を考慮した配分問題の定式化を試みている例がいくつかある^{25), 26)}。確率的な経路選択については、Maher and Zhang²⁷⁾などが、指定時刻への到着確率を最大化するような経路選択の表現方法について提案している。

(7) マルチモードへの対応

マルチモードを考慮した研究はそれほど多くない。その理由は、乗客配分のネットワークモデルが道路のそれと比較して開発が遅れてきたためと考えられる。研究事例としては、頻度ベースの公共交通を前提に、有効頻度アプローチを前提とした乗客配分モデルを用いた信頼性評価を行ったYin et al.の研究²⁸⁾などが挙げられる。マルチモードを前提とした信頼性評価は、特に平常時の変動に関する評価として今後ますます重要と考えられる。

(8) 信頼性向上を目的とした施策提案

ここまでで紹介してきた研究事例は、どちらかといえば信頼性をどのように評価するのか、といった研究が中心である。一方で、評価手法の充実をうけ信頼性向上を目的とした施策提案を考究する研究も増えてきた。たとえば、Lam et al.²⁹⁾は、簡単なネットワークにおける出発時刻と経路の選択を再現することで、情報提供によって所要時間の信頼性が向上することを示している。また、Uno et al.³⁰⁾は、渋滞あるいは所要時間情報提供に付加的に傾向情報を付与することによって所要時間信頼性を改善できる可能性があることを示している。所要時間信頼性向上の一施策として高速道路の予約制を分析対象としシミュレーションモデルを活用してその可能性を示したものもある³¹⁾。さらに、Shimamoto et al.³²⁾は、公共交通ネットワークにおける連結信頼性の公平性を最大化するような多目的2レベル最適化問題を提案している。

(9) 実ネットワークへの適用

様々なネットワーク信頼性評価手法が提案されているものの、それらを適用し実世界の計画評価に活用された事例は多くない。実ネットワークを模したものを活用した計算結果を報告するものもあるが、実ネットワークへの適用可能性を示すことがその目的であることがほとんどである。わずかに、Levinson and Zhang³³⁾によるramp meteringの評価は、実際にramp meteringが中止されたときとそうでないときを比較しており、実証的な評価を行っていると考えられる。また、近年のプロープデータなどの整備に伴い、所要時間信頼性の評価を実証することが可能³⁴⁾となりつつあり、今後展開が期待される。

5. おわりに

本稿では、交通ネットワーク信頼性研究について研究動向を整理した。交通ネットワーク信頼性は日本発の考え方であり、その後全世界の研究者によって研究が進められてきた。研究成果を俯瞰すると、今まで手法開発に大きな関心が寄せられ、多大な労力が注がれてきたようである。一方で、交通の質を評価するニーズは年々高まっており、なおかつその評価を行えるだけのデータも整備されてきている。近年の良質なデータを用い、信頼性解析を実用展開するには非常によい機会であり、特に、実データが豊富な日本からの情報発信が可能といえる。その際には、検討したい事象とその変動要因、そし

てその評価指標および行動仮定について、評価目的に応じて適切に設定することが重要といえる。

謝辞：本稿は、交通ネットワーク信頼性に関する注目の高まりに対し、現在までの歩みを一度整理すべき、という動機のもと行われたものである。ネットワーク信頼性研究の重要性は、飯田恭敬京都大学名誉教授が長年指摘されてきたところであり、信頼性に関わる著者等のこれまでの研究活動に対しても種々のご支援ならびにご示唆を頂戴してきた。ここに記して深謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Bell, M.G.H. and Cassir, C. (eds.): "Reliability of Transport Networks", Research Studies Press, 2000.
- 2) Bell, M.G.H. and Iida, Y. (eds.): "The Network Reliability of Transport", Pergamon, 2003.
- 3) Bell, M.G.H. and Iida, Y. (eds.): "Transportation Network Analysis", Wiley, 1997.
- 4) 若林, 飯田: "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, 915-922, 1990.
- 5) Ball, M. O.: "Computational Complexity of Network Reliability analysis: An Overview", IEEE Transactions on Reliability, R-35(3), 230-239, 1986.
- 6) Chen, A., Yang, H., Lo, H.K. and Tang, W.H.: "A Capacity Related Reliability for Transportation Networks", Journal of Advanced Transportation, 33, 183-200, 1999.
- 7) Du, Z.P. and Nicholson, A.: "Degradable Transportation Systems: Sensitivity and Reliability Analysis", Transportation Research B, 31(3), 225-237, 1997.
- 8) 朝倉, 柏谷, 為広: "災害時における交通処理能力の低下を考慮した道路網の信頼性評価モデル", 土木計画学研究・論文集, 12, 475-484, 1995.
- 9) 飯田, 若林: "プール代数を用いた道路網ノード間信頼度の上・下限値の効率的算出法", 土木学会論文集, 395, 75-84, 1988.
- 10) 枝村, 森津, 土井, 中川: "交通ネットワークにおける対災害信頼性の最適配分", 土木計画学研究発表会講演集, 3, 391-403, 1981.
- 11) Hwang, C.L., Tillman, F.A. and Lee, M.H.: "System-Reliability Evaluation Techniques for Complex/Large Systems - A Review" IEEE Transactions on Reliability, R-30(5), 416-423, 1981.
- 12) Bell, M.G.H., Cassir, C., Iida, Y. and Lam, W.H.K.: "A Sensitivity-Based Approach to Network Reliability Assessment", In: Proceedings of 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Jerusalem, 283-300, 1999.
- 13) 朝倉: "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, 235-242, 1989.
- 14) Clark S. and Watling D.: "Modelling Network Travel Time Reliability Under Stochastic Demand", Transportation Research B, 39(2), 119-140, 2005.
- 15) 中山, 高山, 長尾, 笠嶋: "旅行時間の不確実性を考慮した交通ネットワーク均衡モデル", 土木学会論文集, 772/IV-65, 67-77, 2004.
- 16) Lo, H.K. and Tung, Y.-K.: "Network with Degradable Links: Capacity Analysis and Design", Transportation Research B, 37, 345-363, 2003.
- 17) Berdica, K.: "An Introduction to Road Vulnerability: What Has Been Done, Is Done and Should Be Done", Transport Policy, 9(2), 117-127, 2002.
- 18) D'Este G.M. and Taylor M.A.P.: "Network Vulnerability: an Approach to Reliability Analysis at the Level of National Strategic Transport Networks", In: Bell MGH, Iida Y (eds.) The Network Reliability of Transport, Pergamon, 2003.
- 19) Bell, M.G.H.: "A Game Theory Approach to Measuring the Performance Reliability of Transport Networks", Transportation Research B, 34(6), 533-546, 2000.
- 20) Lam, T. C. and Small, K. A.: "The Value of Time and Reliability: measurement from value pricing experiment", Transportation Research Part E, Vol.37, 231-251, 2001.
- 21) Bhat, C. R. And Sardesai, R.: "The Impact of Stop-making and Travel Time Reliability on Commute Mode Choice", Transportation Research Part B, Vol. 40, 709-730, 2006.
- 22) Yin, Y., Lam, W. H. K. And Ieda, H.: "New Technology And the Modeling of Risk-taking Behavior in Congested Road Networks", Transportation Research Part C, Vol. 12, 171-192, 2004.
- 23) Senna, L. A. D. S.: "The Influence of Travel Time Variability on the Value of Time", Transportation Vol. 21, 203-228, 1994.
- 24) Ettema, D. and Timmermans, H.: "Cost of Travel Time Uncertainty and Benefits of Travel Time Information: Conceptual Model and Numerical Examples", Transportation Research Part C, Vol. 14, 335-350, 2006.
- 25) Lee S., Moon B. and Asakura Y.: "Reliability Analysis and Calculation on Large Scale Transport Networks", In: Bell MGH, Iida Y (eds.) The Network Reliability of Transport, Pergamon, 2003.
- 26) Shao, H., Lam, W.H.K and Tam, M.L.: "A Reliability-Based Stochastic Traffic Assignment Model for Network with Multiple User Classes under Uncertainty in Demand", Networks and Spatial Economics, 6, 173-204, 2006.
- 27) Maher M. and Zhang X.: "Route Choice to Maximise the Probability of Arrival within a Specified Time", In: Bell MGH, Iida Y (eds.) The Network Reliability of Transport, Pergamon, 2003.
- 28) Yin Y., Lam W.H.K. and Miller M.A.: "A Simulation-Based Reliability Assessment Approach for Congested Transit Network", Journal of Advanced Transportation, 38(1), 27-44, 2003.
- 29) Lam, T.H., Yang, H. and Tan, W.H.: "Generalized Travel Cost Reliability in a Simple Dynamic Network under Advanced Traveler Information System", In: Bell MGH, Iida Y (eds.) The Network Reliability of Transport, Pergamon, 2003.
- 30) Uno, N., Iida, Y. And Kawaratani, S.: "Effects of Dynamic Information System on Travel Time Reliability of Road Network", Traffic and Transportation Studies, ASCE, pp. 911-918, 2002.
- 31) de Feijter, R., Evers, J.J.M. and Lodewijks, G.: "Improving Travel-Time Reliability by the Use of Trip Booking", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 5(4), 288-292, 2004.
- 32) Shimamoto, H., Kurauchi, F., Iida, Y., Bell, M.G.H. and Schmöcker, J.-D.: "Evaluation of Public Transit Congestion Mitigation Measures Using Passenger Assignment Model", Journal of the Eastern Asia Transportation Studies, 6, 2076-2091, 2005.
- 33) Levinson, D. and Zhang, L.: "Travel Time Variability after a Shock: the Case of the Twin Cities Ramp Meter Shut Off", In: Bell MGH, Iida Y (eds.) The Network Reliability of Transport, Pergamon, 2003.
- 34) 宇野, 永廣, 飯田, 田村, 中川: "バスプローブデータを利用した所要時間信頼性評価手法の構築", 土木計画学研究・論文集, Vol.23, 1019-1029, 2006.