

交通ネットワークの連結効果と信頼性：

統一的な信頼性指標としての最小旅行時間のパーセンタイル値*

Connectivity Effect of Transportation Network and its Reliability:
A percentile value of minimum travel time as a unified reliability index *

中山晶一朗**

By Shoichiro NAKAYAMA**

1. はじめに

経済・社会活動の高度化とともに、道路交通サービスの質的な向上が求められている。自然災害、事故などによる通行止めや大幅な遅延だけでなく、需要の変動を原因とする旅行時間の不確実性を適切なデータに基づいて分析・評価し、道路利用者に情報を提供することや交通政策や交通管理、そして交通計画に生かすことは、道路交通サービスを供給する側にとってとりわけ重要な課題である。

首都高速の中央環状新宿線が開通するなど環状道路の整備が進められつつある。このようなネットワークをより密にすることによる便益を考える上でも、信頼性の観点は重要である。均衡配分（ワードロップ均衡）の場合、あるノードペア間が新たに連結される効果は計測できない場合がある。そのノードペア間が他の経路により連結されており、その経路の方が所要時間が短い場合、新たに連結された経路は所要時間が長い場合、用いられないからである。しかし、ノードペア間が新たに連結されることにより、何らかの便益が発生するはずである。その一つが（連結）信頼性の向上である。もしある経路が何らかの理由（事故・工事・災害等による通行止め）で通行できなくともそのノードペア間の往来が可能となる。このような便益があるであろう。また、時間信頼性の観点からは、事故やその他の要因により、通常用いられる経路の旅行時間が大幅に長くなる場合、もし代替経路があるならば、そちらを使えば、早く到着することが可能となる。このように、信頼性の観点から見ると、ノード間が密に連結していればいるほど信頼性は高くなる。

本稿では、OD間の最小旅行時間のパーセンタイル値によって、ネットワークの評価を行うことを提案する。OD

間は複数の経路で結ばれており、各経路の旅行時間は変動すると考える。道路利用者は合理的で十分な旅行時間情報を持っていると仮定すると、その道路利用者は最小旅行時間経路を選択する。各経路の旅行時間は確率変動しているため、この最小旅行時間となる経路の旅行時間も確率変動する。この確率変動する最小旅行時間の95%タイル値を用いて、そのOD間を移動する道路利用者のコストとする。これらを全てのODの全ての道路利用者について足し合わせることで、ネットワーク全体の総コストを算出する。

2. 信頼性の分類

(1) 信頼性の分類

交通ネットワークの信頼性については、これを考える観点により、様々な概念があり得る。交通工学の分野では、ノードペア間を移動可能かどうかということの問題とした連結信頼性について研究がなされ、その後、移動可能かどうかよりも、むしろ、その移動を行う際のサービスレベルに焦点を当てた旅行時間信頼性や容量信頼性（capacity reliability）などの研究が行われている。

地震等の災害時など非常時では、連結信頼性が重要になる。先の阪神淡路大震災では、この連結信頼性の重要性が改めて認識された。日常時では、道路利用者の最も大きな関心はどれほどの旅行時間が必要であるのかであることと考えられるため、旅行時間の変動が重要になる。また、路面状況等の走行にしやすさや安全に走行できるのか、なども交通ネットワークの信頼性に含まれよう。航空機などでは、日常時でも連結信頼性が重要となる場合もあり得る。

本稿では、まず、交通ネットワークの利用者の観点から見た信頼性を連結信頼性、時間信頼性、走行信頼性の3つに分類することとする。連結信頼性は、広義の意味での連結信頼性で、ノードペア間が連結されており、その間の移動が可能かや移動可能となる確率などを意味することとする。時間信頼性は、旅行時間に関する信頼性

*キーワード：ネットワーク連結効果、統一的な信頼指標

**正員、博（工）、金沢大学環境デザイン学系

（金沢市角間町、

TEL076-234-46145555）

であり、ある一定の旅行時間以内である確率などである。交通ネットワークのサービスは旅行時間が最も重要なものであることが多いが、走行しやすさや安全性など走行自体に関する信頼性を走行信頼性と呼ぶこととする。この走行信頼性は快適・安心できる走行の意味合いが大きく、走行快適・安心性ともいうべきものである。信頼性という言葉自体に安全・安心が含まれているため、統一性をもたせるため、本稿では、走行信頼性と呼ぶことにする。連結信頼性について、連結していないノードペア間の旅行時間は無限大として取り扱うことも可能で、時間信頼性の特殊形とみなすことも出来るが、本稿では、時間信頼性と連結信頼性はこれまでに研究の経緯を考え、分けて考えることにする。

いずれの信頼性を取り扱うべきかはネットワーク利用者がどの点に関心があるのかによって異なってくると思われる。そして、それは利用者の行動基準に大きく関わっているはずである。多くの交通工学の研究では、道路利用者は旅行時間に基づいて交通行動を行っているとは仮定しており、その場合、旅行時間に関する信頼性、つまり、時間信頼性を取り扱うことが自然であると考えられる。ここで、料金等は時間価値により時間換算できるため、料金等の金銭も含むものとする。なお、この旅行時間をどのように用いて、信頼性指標とすべきなのかは様々な考えがあろう。走行信頼性は、利用者の観点が時間ではなく、安全性や快適性にある場合のものと言えよう。

先に触れた容量信頼性はあるサービスレベルを満たすために必要な交通需要の閾値であり、サービスレベルに関する信頼性指標である。ここでは、利用者均衡が仮定されており、利用者は旅行時間に基づいて行動を決定しており、利用者の観点からの信頼性としては、旅行時間に関する信頼性指標を用いる方がより直接的と言えよう。よって、これは利用者と言うより、利用者のことも考えたネットワーク管理者の観点からの信頼性と考えられる。この容量信頼性自体を利用者が評価することは難しいためである。

これまでの研究は、連結信頼性、時間信頼性、走行信頼性のいずれか一つに着目した研究が多い。しかし、ネットワークの整備やネットワークを評価する際には連結信頼性と時間信頼性と共に考慮する必要があると思われる。これは前章で述べた環状道路の整備を考えると、両方の効果があることは明らかであり、その両方を統一的・総合的に考慮して、便益を評価する必要がある。本稿では、この連結信頼性と時間信頼性の両方を考慮できるものとして、最小旅行時間の95%タイル値という時間単位の指標を提案する。

(2) 時間信頼性指標の分類

人々が時間信頼性をどのように考慮して交通行動を行っているのかについてこれまでに多くの研究がなされている。それぞれの研究では、それぞれの視点でモデルを仮定し、そのパラメータを推定している。

各研究を用いているモデルは、スケジュールモデル、期待効用モデル、統計値モデルの3つに分類することが可能である。

スケジュールモデルは、もともとGaver (1968) や Vickrey (1969) から始まる出発時刻選択の理論研究の流れを受け継いだものである。到着制約時刻や到着希望時刻がある利用者がそれに遅れることや逆に早まり、時間損失が生じることを考慮している。これらの研究の流れを受け、Hall (1983) は実効旅行時間 (efficient travel time) を提案している。旅行時間の不確実性が高い場合、遅刻を避けるため、利用者はセーフティマージンをとり、出発時刻を早めると考えられる。このようなセーフティマージンを含んだ旅行時間が実効旅行時間である。

期待効用モデルは、経済学で標準的に用いられているモデルであり、旅行時間の非線形効用関数を仮定し、変動する旅行時間の期待効用を用いるモデルである。交通の分野でもSenna (1994) などがパラメータ推定を行っている。

統計値モデルは、効用関数に旅行時間の項だけでなく、旅行時間の分散や標準偏差などそのバラつきに関する統計値の項を含んだモデルである。95%タイル値はこの平均やばらつきを同時に考えた統計値であり、このようなものを用いるモデルも統計値モデルに含まれることとする。平均と分散を用いるものはファイナンスの分野で古くより用いられてきている。旅行時間の効用関数が二次関数を仮定する場合、その旅行時間が変動する場合の期待効用は一次モーメントと二次モーメント、平均と分散で表現できるため、先に述べた期待効用モデルと平均分散モデルとは関連性がある。

旅行時間のばらつきとして、分散を用いるのか、標準偏差を用いるのか、また、平均が良いのか、モード (最頻値) やメジアン (中央値) を用いるのか、など考慮する必要がある。つまり、どのような統計指標を用いるのか良いのかを検討する必要がある。これを考えるには、いくつかの視点がある。人々が考えているものに最も近い指標を用いるべきであり、指標を使う際に使いやすい指標であることも重要である。確率・統計を学んだものには、ばらつきの指標としては分散や標準偏差が最も馴染みやすい。しかし、人々が旅行時間の変動として認知する尺度と分散が同じであるのか、もしくは近いのかについては反例的な事例の報告がある。Senna (1994) と Batesら (2001) は、(入手困難な) BenwaellとBlack (1984) の研究として、表1のように平均が同じである10回の旅行時間の計測がある3つの選択肢のうちいずれを選ぶ

表1 分散と選択比率の反例

A	旅行時間の履歴										平均	分散	選択比率
	0	0	5	6	8	7	6	4	5	9			
A	0	0	5	6	8	7	6	4	5	9	5	8.2	38%
B	0	0	0	0	0	0	25	5	10	10	5	60.0	6%
C	0	0	0	0	0	0	0	0	20	30	5	105.0	56%

のかの調査を行ったところ、分散が最も大きい選択肢の選択者が過半数で最も多かったことを紹介している。このように分散は必ずしもばらつきの指標として適しているとは限らない。この例は、旅行時間の定時性が最も確保されたCを選択したのと考えられる。

道路利用者は、道路の特性上、ある程度の旅行時間の変動は受容し、著しく大きな旅行時間の超過に反応すると思われる。その部分に注目することが適切であるとも考えられる。米国では、95%タイル値と平均との差であるバッファ時間 (buffer time) やそれをさらに平均で割ったバッファインデックス (buffer index) を変動の指標として実用的に用いている。また、英国の交通省 (Department for Transport) では、90%タイル値以上を遅延と考え、90%タイル値以上の旅行時間の平均を指標として用いている。このように実用的に用いられている指標としては、時間の単位をもつ旅行時間の90%タイル値や95%タイル値もしくはそれを用いた指標が使われている。これは、分散・標準偏差は直感的には分かりにくいこと、確率などではなく、時間の指標であると、便益計算も将来的には可能であることなどが理由と考えられる。

時間信頼性を考える上で、信頼性の価値を意味するVoR (Value of Reliability) と (平均) 旅行時間の価値を意味するVoT (Value of Time) の比である信頼性比 (Reliability Ratio) ($= \text{VoR}/\text{VoT}$) は一つの重要な指標である。

Batesら (2001) の論文には、RohrとPolak (1998) はバスの旅行時間と待ち時間のVoRはそれぞれ1.6と1.3であったことを紹介している。また、Smallらはその報告書 (1995) でロサンジェルス自動車通勤者に対する調査で1.3より若干小さい値、同様に、Smallらは別の報告書 (2000) で1.31であったことを紹介している。NolandとPolak (2002) では、BlackとTowrissによる報告書 (1993) では信頼性比は0.70で、自動車のみのデータの場合、それは0.55と報告されていることを紹介している。なお、Batesら (2001) はBlackとTowriss (1995) の信頼性比が小さい原因は設問の設定が悪かったためではないかとしている。

Abdel-Atyら (1996) は、自動車の経路選択に関するSP調査の分析を行っている。3つのモデルにより分析を行っているが、最も適合度の良いモデルの結果では、信頼性比は1.0となっている。他の2つのモデルの信頼性比

はそれぞれ1.08と2.10であった。

Noland et al.(1998)は通勤者に対するSP調査の分析を行ったが、そこでは、信頼性比は1.27となっている。

Smallら (2005) は、ロサンジェルス州道91号の有料車線と無料車線の選択のRPデータ及びSPデータの分析を行っている。そのRPデータの分析結果について、旅行時間は正規分布に従うと仮定すると、信頼性比は1.08と計算できる。

これまでの文献をまとめると、通常の乗用車に対する信頼性比は0.55から1.31であるが、1.1前後の結果が最も多く、1.1もしくは利便性を考え、1.0と信頼性比を設定するのが妥当ではないだろうか。既に述べたように、パーセントタイル値は理解が容易であり、時間価値により容易に金銭単位に変更することが出来るが、分布形のみが与えられた場合、計算の困難な場合もある。このような場合は信頼性比を用いることも利便性が高いと考えられる。

3. 最小旅行時間による信頼性評価

(1) 仮定と基本的な考え方

本研究では、信頼性を考える上で、OD間の (複数ある) 経路旅行時間の最小値を用いる。この最小値は一つの経路だけでなく、全ての経路の旅行時間を集約したものとも言える。これにより、連結の密度を考慮することが可能となる。また、95%タイル値を用いることによって、時間信頼性も考慮する。このように連結信頼性と時間信頼性の二つを考慮した指標が最小旅行時間の95%タイル値である。

仮定

1. 道路利用者は合理的
2. 所要時間に関する情報を十分に持っている
3. リンク旅行時間は確率変動 (所与)
4. 遅刻許容確率は5%

仮定4により、道路利用者は変動する旅行時間の95%タイル値の時間をそのトリップのために使うことになる。つまり、遅刻しないために、早めに出発しなければならない、その分の時間もコストとして換算する。

仮定の1と2により、道路利用者は最小旅行時間となる経路を毎日選択する。そして、仮定3により経路の旅行時間は確率変動するため、最小旅行時間となる経路の旅行時間も変動する。いくつかの確率変数の最小値 (もし

くは最大値)の分布は極値分布と呼ばれる。経路旅行時間の極値分布の95%タイル値がそのOD間を移動するために要した時間コストとなる。

(2) 最小旅行時間によるネットワーク指標の算出

a) 豊富な旅行時間データがある場合

都市高速道路やプローブデータなどにより、リンクの旅行時間の蓄積がある場合、その蓄積された旅行時間データを操作することにより、最小旅行時間分布(最小旅行時間の累積分布曲線)を生成することが出来る。それぞれのODについて、各経路の旅行時間を出し、そのうちで最も小さいものを取り出す。そして、その取り出したものの分布を調べればよい。

b) データがリッチでない場合

データが十分でない場合、累積分布曲線を描くことが出来ない。何らかの方法により、リンク旅行時間の多変量分布を推定し、それをもとに、最小旅行時間分布を導くことになる。配分モデル等により交通量や旅行時間の確率分布が推定できる場合はその推定された交通量や旅行時間分布を用いて提案指標を考えることが出来る。

ODペア i の最小旅行時間 Z_i の確率分布関数と確率密度関数は以下のように与えられる。

$$F_{Z_i}(z) = \Pr[C_{i1} < z, C_{i2} < z, \dots, C_{ij} < z]$$

$$= \int_0^z \dots \int_0^z f_{C_i}(\mathbf{c}_i) dc_{i1} dc_{i2} \dots dc_{ij}$$

$$f_{Z_i}(z) = \frac{d}{dz} F_{Z_i}(z)$$

ここで、

X_a : リンク a の交通量の確率変数

\bar{x}_a : リンク a の交通量の平均

C_{ij} : ODペア i の経路 j の旅行時間の確率変数

c_{ij} : ODペア i の経路 j の旅行時間 (の実現値)

Z_i : ODペア i の最小旅行時間の確率変数

$$= \min[C_{ij} | j \in J_i]$$

F : (添え字の変数についての) 確率分布関数

f : (添え字の変数についての) 確率密度関数

したがって、ODペア i の最小旅行時間の95%タイル値 γ_i は最小旅行時間の確率分布関数の逆関数を用いて、 $\gamma_i = F_{Z_i}^{-1}(0.95)$ となる。この最小旅行時間の95%タイル値 γ_i は交通量によって変化するものであるため、交通量の関数であり、それを明示し、 $\gamma_i(\bar{\mathbf{x}})$ とも表記することとする。ただし、 $\bar{\mathbf{x}}$ は (全ての) リンク交通量の平均値のベクトルである。

このような最小旅行時間の95%タイル値を全てのネットワーク利用者について足し合わせたものがネットワー

クの評価値 L となる。

$$L = \sum_i \bar{q}_i \gamma_i(\bar{\mathbf{x}})$$

このネットワークの評価値は通常の総走行時間を拡張したものであり、連結信頼性及び時間信頼性をも考慮した統一的な時間を単位とする指標である。これに時間価値を乗ずることにより金銭単位へ変換することが出来、費用便益分析等で利用可能である。

4. おわりに

本稿では、連結信頼性及び時間信頼性の両方を考慮するために、OD間の最小旅行時間のパーセントタイル値によって、ネットワークの評価を行うことを提案した。確率変動すると考える旅行時間について、OD間の最小旅行時間の95%タイル値を用いて、そのOD間を移動する道路利用者のコストとし、これらを全てのODの全ての道路利用者について足し合わせることににより、ネットワーク全体の総コストを算出する。これに時間価値を乗ずることにより、費用便益分析等にも容易に用いることが可能である。これを用いた最適ネットワークデザインやクリティカルリンクの特性などもMPECや感度分析等により可能となることが期待でき、これらは今後の課題である。

参考文献

- 1) Gaver, D.P. (1968) Headstart strategies for combating congestion, *Transportation Science*, Vol. 2, pp. 172-181.
- 2) Vickrey, W.S. (1969) Congestion theory and transport investment, *American Economic Review*, Vol. 59, pp. 251-260.
- 3) Hall, R.W. (1983) Travel Outcome and Performance: The Effect of Uncertainty on Accessibility, *Transportation Research*, Vol. 17B(4), pp. 275-290.
- 4) Senna L.A.D.S. (1994) The influence of travel time variability on the value of time, *Transportation*, Vol. 21, pp. 203-228.
- 5) Bates, J., Polak, J., Jones, P. & Cook, A. (2001) The valuation of reliability for personal travel, *Transportation Research*, Vol. 37E, pp. 191-229.
- 6) Noland, R.B. & Polak, J.W. (2002) Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues, *Transport Review*, Vol. 22, pp. 39-54.
- 7) Abdel-Aty, M.A., Kitamura, R. & Jovanis, P.P. (1996) Investigating effect of travel time variability on route choice using repeated-measurement stated preference data, *Transportation Research Record*, No. 1493, pp. 39-45.
- 8) Noland, R.B., Small, K.A., Koskenoja, P.M. and Chu, X. (1998) Simulating travel reliability, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 28, pp. 535-564.
- 9) Small, K.A., Winston, C. and Yan, J. (2005) Uncovering the distribution of motorists' preferences for travel time and reliability, *Econometrica*, Vol. 73(4), pp. 1367-1382.