

# 道路利用者行動からの時間信頼性評価のレビュー\*

A review on travel time reliability from the standpoint of road user behavior\*

中山晶一郎\*\*, 高御堂順也\*\*\*

By Shoichiro NAKAYAMA\*\*, Junya TAKAMIDO

## 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、交通システムの障害・維持管理に伴う規制や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。

交通ネットワークの信頼性は、交通行動に大きな影響を与えているため、利用者及び管理者にとって非常に重要で、信頼性を評価することが社会的にも求められていると思われる。

交通ネットワークの計画やその政策の策定等で、信頼性を考えるためには、人々が信頼性をどのようにとらえているのか、逆に、信頼性は人々の行動にどのように影響しているのか、さらに、信頼性にはどれほどの価値があるのかが重要になっていると考えられる。本稿では、交通ネットワークの信頼性を道路交通の評価に用いることを念頭に、時間信頼性が道路利用者の交通行動にどのように影響を与えているのかについて、これまでに行われた研究のレビューを行うことを目的とする。さらに、このレビューを踏まえて、時間信頼性を費用便益分析に導入方法について考察する。

## 2. 信頼性を考慮した行動モデル

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、そのパラメータの推計などを行っている。

各研究で用いられているモデルは、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、トリップの前後の活動やその制約（特にトリップ後の活動）を前提にし、到着制約時刻や到着希望時刻を設定し、実際の到着がその制約時刻や希望時刻からどれほど離れるのかを考慮する。期待効用モデルは、旅行時間そのものに着目し、旅行時間の長短によりその限界効用（単位時間当たりの価値）が異なることを利用している。期待効用モデルは経済学など他分野でも多用されている一方、スケジュールモデルは、交通が主目的の派生需要であるという特性に着目したものである。統計値モデルは標準偏差など旅行時間のばらつきの指標を直接用いて、信頼性を考慮するものである。

### (1) スケジュールモデル

スケジュールモデルは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、間損失が生じることを考慮している。このモデルの効用（一般化費用等の場合もある） $U$ は

$$U = \alpha t + \beta SDE + \gamma SDL + \theta d_L \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$  はパラメータ、 $t$  は旅行時間、 $SDE$  は希望到着時刻から早まって到着した場合のその時間（早着ではない場合は0）、 $SDL$  は希望到着時刻から遅刻した場合のその時間（遅刻でない場合は0）、 $d_L$  は遅刻ダミー（遅刻の場合は1で、その他は0）である。また、遅れた場合、予定のスケジュールを遂行できなくなり、再度スケジュールをプランニングする必要があるなど余分なコストが生じるため、Noland et al. (1998) は上式にプランニングコストの項を付加している。

この研究の流れの中で、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取り、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。旅行時間が正規分布に従う場合、このセーフティマージンは経路旅行時間の標準偏差に比例し、以下のような実効旅行時間  $c_{ij}$  は以下ようになる。

\*キーワード:

\*\*正員, 博(工), 金沢大学環境デザイン学系

(金沢市角間町、TEL076-234-4614, Fax234-4644

E-mail: snakayama@t.kanazawa-u.ac.jp)

\*\*\*学生会員, 金沢大学大学院自然科学研究科

$$c_{ij} = m_{ij} + \eta s_{ij} \quad (2)$$

ここで、 $c_{ij}$  は OD ペア  $i$  の経路  $j$  の実効旅行時間、 $m_{ij}$  は OD ペア  $i$  の経路  $j$  の（経路）旅行時間の平均、 $s_{ij}$  は OD ペア  $i$  の経路  $j$  の（経路）旅行時間の標準偏差、 $\eta$  はセイフティマージン（あるいはリスク態度）に関するパラメータである。

## (2) 期待効用モデル

期待効用モデルは、経済学等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。

$$E[u(T)] = \int_{-\infty}^{\infty} u(\omega) f_T(\omega) d\omega \quad (3)$$

ここで、 $u(\cdot)$  は効用関数、 $f_T(\cdot)$  は旅行時間  $T$  の確率密度関数、 $E[\cdot]$  は期待値をとる演算である。

期待効用モデルは、単位旅行時間の効用が時間の長短にかかわらず一定というのではなく、それが変化することによって、リスク態度を表現する。つまり、信頼性を考慮した行動を記述することができる。

この単位旅行時間の効用（限界効用）の変化は、交通の分野では、混雑の度合いによって、時間価値の変化として捉えることができる。

Calfee & Winston (1998) は、米国で行った SP 調査によって、時間価値の推定を行い、混雑時の時間価値は非混雑時の約 3 倍であったと報告している。Hensher (2001) は、SP 調査による時間価値の研究を行った。その中で最も適合性の高いモデル（尤度が大きいモデル）では、混雑時（速度低下時）の時間価値は通常時の 2.47 倍、超混雑時（進んだり、止まったりを繰り返す状態）は 5.82 倍の時間価値となっている。Wardman (2001) や Small et al (1999) も混雑時は時間価値が上がることを指摘している。また、Steimetz (2008) は、交通密度の価値を推定し、交通密度が減少することに価値があることを報告している。以上のように、混雑により時間価値が増加することが明らかになっている。

これまで、スケジュールモデルにより信頼性を捉えようとする試みが多かった。スケジュールモデルでは、到着制約時刻や到着希望時刻の存在が前提となり、それらがなくもしくは希薄な自由目的では、信頼性への価値はないことになる。しかし、上で述べた混雑による時間価値の変化は到着時刻制約や希望到着時刻がない人々に対しても見られる一般的な特性を考えられるため、全ての人、どのような目的のトリップにおいても信頼性は重要であることを示唆している。また、スケジュールモデルの観点からは、到着制約が厳しいほど、信頼性の価値が大きい

ことになり、通勤行動は他よりも信頼性が重視されると考えられがちであるが、そうでない結果も報告されている。例えば、Senna (1994) の推定では、到着制約のある通勤では、リスク選好との結果となっている。この理由としては、通勤者は毎日同じ経路を使っており、旅行時間の分布を熟知しているためやその 70% の人は遅刻してもペナルティがないことが影響しているのではないかとしている。また、Guttman (1975) の推定によると、毎日移動を行う人のピーク時の時間価値は \$5.17 で、オフピーク時は \$1.91 となり、月 1 回（月 1 回以上週 1 回未満）の利用者のオフピーク時の時間価値は \$2.95 と推定している。ピーク時は時間の信頼性が低く、利用頻度の多い人々は道路事情に精通しているため、信頼性への価値が低い傾向があると考えられるため、信頼性への価値が時間価値に含まれて推定されているため、このような結果になったとしている。道路事情に精通しているのか、どうか、が信頼性の価値に影響していると思われる。

## (3) 統計値モデル

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。

## 3. 時間信頼性指標

時間信頼性の指標として必要な要件は、使いやすさ、分かりやすさ、理論的整合性、交通行動との整合性など様々な要件がある。本稿では、交通ネットワーク整備や交通政策の評価のための時間信頼性指標について考える。交通ネットワーク整備や交通政策の評価は、少なくとも道路整備では、費用便益分析を行うことが必須となっているのが現状であろう。この場合、信頼性の価値を貨幣換算で算出することが必要であり、貨幣換算の容易な信頼性指標が求められる。時間信頼性は旅行時間の信頼性であり、多数回の旅行時間の計測や何らかの方法によって推定される旅行時間分布が重要である。旅行時間もしくは交通量の計測には誤差が含まれるため、観測誤差にある程度ロバストなことも実用的には重要である。

表1 分散と選択比率の反例

	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%

表2 時間信頼性指標

		便益計測可能指標	信頼度	その他	変動指標
旅行時間	時間制約 スケジュール	WTBR, 実効旅行時間, 一般化スケジュールコスト	旅行時間信頼度		
	期待効用	(期待効用)		期待効用	
	統計指標	PT, 各%タイル値, AD			BT, BTI, PTI, $\lambda^{skew}$ , $\lambda^{ver}$ , UI, 各種% タイル値の指標, 分散, 変動係数, (歪
	総旅行時間		総旅行時間信頼度, $\alpha$ 信頼度		

便益自体は利用者の行動と一対であり、この信頼性指標を用いた交通行動モデルが必要となる。交通の旅行時間の信頼性では、旅行時間が通常よりも長くなることの影響が短くなる場合よりも大きい。分散や標準偏差などの長い場合と短い場合の両方のばらつきや変動が考慮される指標は適切でないことが多い。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) は、Benwell 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を選択したものと考えられる。当然、すべての人間の交通行動を統合的に扱うことができる指標はまず存在しないと思われるため、交通行動を考える上で、重要な要件をできる限り満たしていることが望ましい。

これまでに提案されている時間信頼性指標は表2のようにまとめることができる。なお、紙面の都合上、各指標の説明は割愛する。

ファイナンス分野では、リスク指標として、バリュー・アット・リスク (VaR; Value at Risk) が多用されている。VaRは損失分布パーセンタイル値(分位点)となり、おそらく金融機関等で最も広く用いられている指標であると思われる。損失分布のパーセンタイル値という信頼水準で超過することのない最大損失額という非常にわかりやすい指標ではあるものの、統合的なリスク尺度の観点から欠陥があることが指摘されている。

Artzner ら (1999) は、理論的に整合的なリスク尺度が満たすべき公理として、平行移動不変性 (translation invariance), 劣加法性 (subadditivity), 正の同次性 (positive homogeneity), 単調性 (monotonicity) の4つをあげ、VaRは一般には劣加法性を満たさないと指摘している。正の同次性が満たされる場合、劣加法性と凸性とは同値となる。

交通均衡理論においても、特に交通の最適化の観点で、凸性は非常に重要な性質である。しかし、交通需要が確率変動し、それに伴い、旅行時間が確率変動する場合、たとえ平均旅行時間により利用者が経路選択を行ったとしても、経路旅行時間の凸性は一般には満たされないと予想される。つまり、システム最適配分を考える場合、その目的関数は凸にはならないと予想される。

1) 理解しやすい、2) 観測が比較的容易である、3) 費用便益分析等に用いることができる便益指標となりえる、4) 分布の右裾のばらつきや変動のみを考慮することができるという利点がある。一方、劣加法性や凸性を満たさない、設定した水準(信頼水準)より小さな確率で起こるが、長大な旅行時間の影響を考慮することが出来ないことなどが欠点としてあろう。ただし、交通の分野で考える場合、劣加法性や凸性の重要性はファイナンス分野ほど大きくはない、旅行時間の分布の裾を考えるほどデータの精度や量が十分でないことが多い。

本研究では、交通ネットワークの信頼性指標として、旅行時間のパーセンタイル値(分位点)に焦点を当てる。

#### 4. 信頼性比

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

表3 既存研究での信頼性比の推定結果

著者	年	対象	調査	信頼性比	変数	備考
1 BlackとTownriss	1993	英	SP	0.55	SD	SP調査に問題があると指摘されている
2 Abdel-Atyら	1996	米	SP	1.00	SD	最も適合の良いモデルの結果
3 Nolandら	1998	米	SP	1.27	SD	
4 CalfeeとWinston	1998	米	SP	1.20	混雑時間価値	旅行時間が正規分布と仮定し、変換
5 Smallら	1999	米	SP	3.22	SD	時間価値が過小推定。通常の時間価値を用いて計算した1.31が妥当と記述されている
6 LamとSmall	2001	米	RP	1.49	SD	最も適合の良いモデルの結果
7 Hensher	2001	豪	SP	1.12	混雑時間価値	旅行時間が正規分布と仮定し、変換1
				1.25	混雑時間価値	旅行時間が正規分布と仮定し、変換2
8 Copleyら	2002	英	SP	1.30	SD	
9 Smallら	2005	米	RP	1.08	80%値-50%値	旅行時間が正規分布と仮定し、変換
10 Brownstone & Small	2005	米	RP	0.96	遅れ時間	変換
11 de Jongら	2007	蘭	SP	2.40	SD	小サンプルの試行調査
12 阪神高速	2007	日	RP	0.84	余裕時間	認知旅行時間の80%タイル値を正規分布との仮定のもと変換(公表前資料より)
13 AsensioとMatas	2008	ス	SP	0.98	SD	同じデータと思われるAsensio&Matas(2006)では1.08と推定されている。

価値を意味する VoT (Value of Time) の比である信頼性比 (Reliability Ratio) (= VoR/VoT) は一つの重要な指標である。

これまでの行われた信頼性を考慮した交通行動のパラメータ推定や信頼性の価値の研究のうち、信頼性比に換算できたもののまとめたのが表3である。信頼性の価値としては、単位標準偏差 (SD) の価値としている。SD を変数に入れ、パラメータを行っている研究については、その SD に対するパラメータと (平均) 旅行時間のパラメータの比が信頼性の価値である。SD を変数としていない研究のうち、旅行時間を正規分布と仮定すると、単位標準偏差 (SD) の価値へ変換可能なものは変換している。

信頼性の価値は 1 から 1.5 程度と思われるが、1.2 程度の研究が多いようである。つまり、旅行時間の標準偏差を 1.0 分減少させるのは、平均旅行時間を 1.2 分減少させるのと同等の効果がある。

## 5. まとめ

本稿では、時間信頼性を考慮した経路やネットワークの便益指標として、旅行時間のパーセントイル値 (分位点) は妥当な考えの一つである。既存研究より、信頼性比は1.2程度と思われるため、(正規分布を前提とし) それに対応する90%タイル値 (より正確には88.5%タイル値) を用いることが妥当と思われる。

## 参考文献

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.  
 Asensio, J. and Matas, A. (2008) Commuters' valuation of travel time variability, *Transportation Research*, Vol. 44E, pp. 1074-

1085.  
 Artzner, P., Delbean, F., J.-M. Eber and Heath, D. (1999) Coherent measures of risk, *Mathematical Finance*, Vol. 9, pp. 203-228.  
 Brownstone, D. and Small, K.A. (2005) Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations, *Transportation Research*, Vol. 39A, pp. 279-293.  
 Calfee J. and Winston, C. (1998) The value of automobile travel time: implications for congestion policy, *Journal of Public Economics*, Vol. 69, pp. 83-102.  
 Copley, G. and Murphy, P. (2002) Understanding and valuing journey time variability, *Proceedings of European Transport Conference*, CD-ROM.  
 De Jong, G., Tseng, Y., Kouwenhoven, M., Verhoef, E. and Bates, J. (2007) The value of travel time and travel time reliability: Survey design, Final report.  
 Guttman, J. (1975) Avoiding specification errors in estimating the value of time, *Transportation*, Vol. 4, pp. 19-24.  
 Hensher, D.A. (2001) Measurement of the valuation of travel time savings, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 35, pp. 71-98.  
 Lam, T.C. and Small, K.A. (2001) The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment, *Transportation Research*, Vol. 37E, pp. 231-251.  
 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.  
 Senna L.A.D.S. (1994) The influence of travel time variability on the value of time, *Transportation*, Vol. 21, pp. 203-228.  
 Small, K.A., Noland, R., Chu, X. and Lewis, D. (1999) Valuation of travel-time savings and predictability in congested conditions for highway user-cost estimation, *National Cooperative Highway Research Program Report 431*, National Academy Press, Washington, D.C.  
 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.  
 Steimetz, S.S.C. (2008) Defensive driving and the external costs of accidents and travel delays, *Transportation Research*, Vol. 42B, pp. 703-724.  
 Wardman, M. (2001) A review of British evidence on time and service quality valuations, *Transportation Research*, Vol. 37E, pp. 107-128.