

旅行時間信頼性の評価：モデリングアプローチのレビューと今後の課題*

Valuation of Travel Time Variability with Behavioral Models and Future Recommendations*

福田 大輔**・高橋 茜***

By Daisuke FUKUDA**・Akane TAKAHASHI***

1. はじめに

(1) 背景と目的

交通量の増加により混雑が空間的、時間的に広がると、平均旅行時間が長くなるばかりでなく、旅行時間のばらつきが大きくなる。交通政策の経済評価においても、これら二つの側面を考慮する必要がある。前者に関しては時間短縮便益に関する多くの研究が以前から行われている。一方、後者についても所要時間信頼性の観点から研究が近年進展しており、我が国でも幾つかの関連レビューが行われている^{1)~3)}。

定刻性向上という交通サービス改善の効果を費用便益分析の俎上に乗せるためには、所要時間信頼性に対する利用者の限界的支払い意思額（時間信頼性価値、VTTV：Value of Travel Time Variability）を推計することが必要である。そのためには、(i) ミクロ経済理論と整合的であること、(ii) 個人の選好調査から推計が可能であること、(iii) 標準的/やや発展的な需要予測モデルへの適用が可能であること、等の要件が必要となるであろう。本稿では、以上のような観点に立脚し、旅行時間信頼性の定義ならびにその価値（VTTV）計測に関するモデリングアプローチの動向レビューを行い、今後解決すべき課題を整理する。

なお本稿の内容は、第一著者が関わったデンマークの旅行時間信頼性に関する調査・研究⁴⁾の内容の一部に、幾つかの新たな見解を加えたもので構成されている。

(2) 旅行時間変動の定義

旅行時間変動を扱った多くの研究では、旅行時間は自由流旅行時間（混雑なしの最少旅行時間）と遅れに分けられている。しかし、遅れに関しては、週末と平日の違いや一日の中でのピーク時・オフピーク時の違いのように、予測可能で不確実性を引き起こさないものも含んでいる。そのため遅れは、観測された旅行の特性から説明できるシステムティックな遅れ（または周期的遅れ）と、説明・予測が不可能な遅れ（非周期的遅れ）に分けられる^{5),6)}。

本稿では、VTTV の推計を念頭に置いて、“旅行時間変動（Travel Time Variability）= 旅行時間の確率変動”と定義する。これは、“予測不可能遅れの変動”を意味している。一方、自由流旅行時間とシステムティック遅れの変動は、システムティック変動と称する。

2. モデリング方法の整理

本節では、旅行時間変動を交通需要モデルに組み込む際の代表的なアプローチである、平均分散アプローチ並びにスケジューリングアプローチについて概説し、それぞれの特徴や互いの関連性、VTTV 推計に際しての留意点などについて整理する。

両アプローチとも、旅行者は費用や旅行時間と時間変動のトレードオフを考慮して意思決定を行うと仮定し、行動モデルを同定するために、旅行者のルート選択、交通手段選択、または出発時刻の選択に関する実データが必要となる。また、実際の選択結果と関連付けられた旅行時間変動の計測は一般的に難しく⁷⁾、VTTV 推計のために必要な行動データは SP 調査から得られる場合が多い。

(1) 平均分散アプローチ

平均分散アプローチは、旅行者が希望到着時刻に対して早着したか遅着したかを区別することなく、不確実性そのものによって生じる旅行者の不都合さを直接的に記述したモデルである^{5),6),8)}。通常、旅行者の効用が、旅行費用 C 、平均旅行時間 ET 、旅行時間変動（多くの場合標準偏差、時にタイル値レンジ等^{7),9),10)} σ_t に依存するものとして表される：

$$U = \delta C + \alpha ET + \rho \sigma_T \quad (1)$$

ここで δ 、 α 、 ρ はそれぞれ、料金、旅行時間、旅行時間変動の限界効用である。

このモデルはその単純さゆえに多くの適用事例があるが、直接効用関数の引数として平均や分散などの統計尺度が含まれることのミクロ経済学的根拠は明かでないという問題点を有している。すなわち、個人の交通需要に関する理論的な説明がなされているモデルというよりも、むしろ、交通システムの供給モデルから直接得られる旅行時間変動の利用を前提としているモデルである。

* キーワーズ：時間信頼性価値，所要時間分布，行動モデル

** 正会員 博 (工) 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-11
TEL 03-5734-2577, FAX 03-5734-3578)

*** 非会員 学 (工) 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻

(2) スケジューリングアプローチ

スケジューリングアプローチは、Noland and Small¹¹⁾により提案されたが、元々は Small¹²⁾が提案した不確実性の存在しない状況での出発時刻選択モデルに基づいている。Noland and Small¹¹⁾は、旅行時間変動がドライバーが自身のスケジュール決定を行う際に及ぼす影響の分析に、モデルを拡張した。

以下では Bates et al.⁵⁾の表記を参考に本モデルを説明する(但し、費用項を除外する)。旅行者の効用は、旅行費用 C 、旅行時間 T 、また、 PAT (旅行者の希望到着時間)から遅れたか(SDL)、早く着いたか(SDE)、そしてそれはどの程度かに基づいて決定され、これらが出発時刻 t_h の選択に影響を及ぼす。効用関数は、以下で表される：

$$U(t_h) = \alpha T + \beta SDE + \gamma SDL + \theta D_L \quad (2)$$

ここで D_L は遅着の場合に 1 となるダミー変数である。また、 α 、 β 、 γ はそれぞれ旅行時間、早着、遅着の限界効用であり、 θ は遅着そのもののペナルティである。さらに、旅行者間の異質性に関しても、スケジューリングモデルに共変量を含めることで考慮することが可能である^{12),13)}。各限界効用の大小関係は、多くの実証研究^{5),6),8),12)-14)}において $\gamma < \beta < 0$ となっている。早着と遅着に関する不効用の非対称性は、遅着のペナルティ θ を含めることでさらに大きくなる。

旅行時間がランダムの場合、スケジューリングアプローチは期待効用最大化問題として表される。期待効用は以下のように表される：

$$EU = \delta C + \alpha ET + \beta E(SDE) + \gamma E(SDL) + \theta P_L \quad (3)$$

ここで P_L は遅着が生じる確率である。

旅行時間変動が一般的な統計分布に従う場合、旅行者の効用最大化問題を解析的に解くことはできない。Noland and Small¹¹⁾は、旅行時間変動が出発時刻に依存せず独立で、かつ、旅行時間変動が一様分布または指数分布に従う場合の解析解を見出した。指数分布を仮定した場合、最大期待効用は以下のように表される：

$$EU^* = \delta C + \alpha ET + \theta P_L^* + H(\alpha, \beta, \gamma, \theta, b, \Delta) b \quad (4)$$

ここで b は旅行時間が従う指数分布の平均(かつ標準偏差)である。また、 H は出発が単位時間遅れた場合の道路混雑増加率 Δ 並びに他のパラメータによって規定される定数である。 P_L^* は遅着最適確率を表す。

(3) VTTV の推計値

各既往研究によって得られた VTTV の推計値を表 1 に示す。研究の多くはアメリカやイギリスのものであり、紹介した二つのアプローチを個別に、あるいは統合して推計して VTTV を推計している。また、研究のほとんどが SP データを用いている。研究によって推計

結果はかなり異なっており、推計手法やデータ等の確立にまだ多くの課題が残されていることが示唆される。

(4) 両アプローチの関連性

Bates et al.⁵⁾並びに Noland and Polak⁶⁾では、旅行時間変動がパラメータ b を持つ指数分布で表され、旅行時間分布は出発時刻から独立であり、 $\theta = 0$ であれば、式(4)が以下のように単純化できることを見出した：

$$EU^* = \delta C + \alpha ET + b\beta \ln\left(\frac{\beta + \gamma}{\beta}\right) \quad (5)$$

b は旅行時間の標準偏差であるため、最大期待効用は平均旅行時間と標準偏差に関して線形となっていることが分かる。これは平均分散アプローチと同じである。

しかし、式(5)を導出するために設けた諸仮定の中でも、想定される指数分布の現実妥当性については多くの実証研究がその可能性を悲観視している。また、スケジューリングアプローチと平均分散アプローチの適合度の比較を行っている幾つかの研究^{8),13),14)}では、平均分散アプローチは旅行時間価値を過大評価し、信頼性価値を過小評価することが示唆されている。

このように、スケジューリングアプローチは平均分散アプローチよりも多くの優れた点を有している。しかし、スケジューリングモデル適用のためには、旅行者の希望到着時刻のデータが必要となる。平均分散アプローチが単一の VTTV 値を推計するのに対し、スケジューリングアプローチは早着と遅着のそれぞれの価値を推計するため、簡便な適用が困難である。さらに、それぞれの旅行者の $E(SDE)$ 、 $E(SDL)$ さらには、旅行時間分布が施策によって変化した後の P_L を知る必要がある。そのためには、旅行者の PAT に関する情報が必要である。

3. 統合アプローチの実適用可能性

本節では、Fosgerau and Karlstrom²¹⁾並びに Foserau and Fukuda²²⁾による統合アプローチについて説明する。このモデルは、前節で述べた仮定を一般化して両者の一致を試みたものである。スケジューリング・アプローチタイプの直接不効用関数をまず定式化し、任意の所要時間分布のもとでの旅行者の最適化行動の帰結としての最小期待不効用関数が平均・分散モデルとなることを示したものである。また、 PAT 情報を必ずしも必要としないため、実適用も比較的容易となっている。また、このアプローチでは、旅行時間価値と並列で旅行時間信頼性価値が算出される。VTTV は、元のスケジューリングモデルの選好パラメータならびに旅行時間分布の右裾の形状によって規定される。また、旅行時間の変動は標準偏差によって表される。

表 - 1 既往の VTTV 推計研究の要約

出典	国, モード, 調査	行動モデル	時間信頼性価値	信頼性比
Bates et al. (2001) ¹⁵⁾	英, 鉄道, SP	スケジューリング	早着: 134 円/分, 遅着: 272 円/分	業務/通勤: 1.35-2.71 私的: 2.48-3.28
Batley et al. ¹⁶⁾ (2007)	英, 鉄道, SP	平均 - 分散, スケジューリング同時考慮		自動車通勤者: Car:0.70 全サンプル: 0.55
Black & Towiss (1993) ¹⁷⁾	英, 全機関, SP	平均 - 分散	早着: 11 円/分, 遅着: 31 円/分	
Hollander (2005 ¹⁸⁾ , 2006 ⁸⁾)	英, バス, SP	スケジューリング	男性:26-33 円/分, 女性: 60-76 円/分	
Lam & Small (2001) ⁷⁾	米, 車, SP	平均 - 分散		
Noland et al. (1998) ¹⁴⁾	米, 車, SP	平均 - 分散, スケジューリング分離推定		1.27
Rietveld et al.(2001) ¹⁹⁾	蘭, 全機関, SP	15 分の遅延が生じる確率 を説明変数として利用	50 % delay:21 円/分 18-27 円/分, 5 分の早着:3-3.6 円/分, 10 分の早着:8.6-9 円/分, 15 分の早着:14.3 円/分,	
Small et al. (1999) ¹³⁾	米, 車, SP	平均 - 分散, スケジューリング分離推定	遅着:26-40.3 円/分	
		平均 - 分散, (RP データでは信頼性を 50 番目と 90 番目の値の 差で示し, SP データ では信頼性を少なくとも 10 分遅れる確率とする)	RP : 45-57 円/分 (中間値), 61-66 円/分 (四分位範囲) SP : 12-13 円/分 (中間値), 15-18 円/分 (四分位範囲)	
Small et al. (2005) ¹⁰⁾	米, 車, SP/RP			
Transek (2002) ²⁰⁾	スウェーデン, 車, SP	平均 - 分散		0.96

(1) モデルの概要

希望到着時刻はあらかじめ 0 に基準化する。旅行者の不効用関数は実旅行時間 T と先行出発時刻 $-D$ によって定まるものとし、早着/遅着の程度と実際の旅行時間により特定化された下記の効用関数が用いられる：

$$U(D, T) = \eta D + \omega T + \lambda(T - D)^+ \quad (6)$$

ここで $(T - D)^+$ は遅着不効用であり、正なら値を持ち、負であればゼロの値をとる。なお、この効用関数は式 (2) のモデルを再定式化したものであり、 $\eta = \beta$, $\omega = \alpha - \beta$, $\lambda = \beta + \gamma$ という関係が存在している⁴⁾。

旅行時間不確実性については、以下のように表す：

$$T = \mu + \sigma X \quad (7)$$

ここで X は平均 0, 分散 1 の密度関数 ϕ 並びに分布関数 Φ に従う確率変数で、「正規化旅行時間」と呼ばれる。旅行時間平均 μ 並びに標準偏差 σ については、出発時刻 $-D$ に依存して変化することも許容されるが、その場合には X の密度関数 ϕ が D から独立であることが条件となる。

以下の単純ケースでは、 μ と σ は定数で、それぞれ μ_0 , σ_0 の値をとるものとする。既往研究^{21),22)} より、期待効用最大化問題を解いて得られる最大期待効用は下記のように表される：

$$EU(D^*) = (\eta + \omega)\mu_0 + \lambda\sigma_0 H(\Phi, \eta/\lambda) \quad (8)$$

$$H\left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda}\right) = \int_{1-\eta/\lambda}^1 \Phi(x) dx \quad (9)$$

式 (8) より、最大期待効用が平均旅行時間と標準偏差の線形和で表されることが分かる。また、旅行時間標準偏差の限界効用 λH が、正規化旅行時間分布形状に依存して決まることも分かる。

(2) 実適用に向けた VTTV の定義

式 (8) の最大期待効用にに基づき、旅行者の期待旅行費用は次のように表現することができる：

$$VTT \times \mu + VTTV \times \sigma \quad (10)$$

ここで VTT は旅行時間価値を表す。さらに、この式を以下のように書き直す：

$$VTT \times \mu + VTT \times \frac{VTTV}{VTT} * \sigma \quad (11)$$

このように書き改めることで、旅行者の総費用を算出するために、平均旅行時間と標準偏差の他、旅行時間価値 (VTT), 信頼性比 ($RR = VTTV/VTT$) を求めれば良いことになる。VTT は現在の費用便益分析のガイドライン等により与える。

一方信頼性比は、式 (9) を用いて以下で与えられる：

$$\frac{VTTV}{VTT} = \frac{\lambda}{\eta + \omega} H\left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda}\right) \quad (12)$$

すなわち、信頼性比の構成要素は、旅行時間価値 ($\eta + \omega$) に対する遅着限界費用 (λ) の比率 $\lambda/(\eta + \omega)$, 最適時において遅着するトリップの割合 (η/λ) 並びに、 H 指数の三つであることが分かる。

a) スケジューリングパラメータ比について

表 - 2 は既往研究における各々の値である。表の第一列より、いずれの研究でも、1 分の遅着は旅行時間 1 分の約 3 倍の価値をもつことがわかる。また、第二列より、 η/λ の値をおおよそ 0.33 と見積もることができる。すなわち旅行者は、3 回の旅行で 1 回は希望到着時刻から遅れても良いと考えていることが示唆される。

b) H 指数の計算と比較

式 (10) で定義される H 指数は、正規化旅行時間分布でみた場合の平均的遅れと解釈することができる。も

表 - 2 スケジューリングパラメータ比

研究	$\lambda/(\eta + \omega)$	η/λ
Bates et al.(2001) ⁵⁾		0.33
Hollander (2005 ¹⁸⁾ , 2006 ⁸⁾)	3.75	0.27
Noland et al.(1998) ¹⁴⁾	2.78	0.42
Small (1982) ¹²⁾	3.01	0.20

しも、この指数の値について幾つかの事例で類似した傾向が見られるならば、実務上都合がよい。

図 - 1 は、デンマークで長期にわたって観測された各交通サービス（都市内道路上下方向，都市間高速道路，都市鉄道上下方向）の所要時間データを用いてそれぞれの正規化所要時間分布 Φ を算出し、与えた各 η/λ の値に対して得られる H 指数がどのように異なるのかを示したものである⁴⁾。交通の種別に関わらず、 H 指数の値が似通っていることが分かる。

4. 今後解決すべき課題の整理

本稿では、VTTV の推計方法として従来から用いられてきた平均分散アプローチ並びにスケジューリングアプローチに関する既往研究のレビューを行った。さらに、両者を統合した新たなアプローチによる VTTV 推計の可能性について考察を行った。前節で示されたように、各種所要時間データの解析結果は統合アプローチの実適用を支持するものであったが、それでも解決すべき課題は多く残されている。以下にそれをまとめる。

(a) モデルの一般化

これまでの研究で想定していた単一リンク部での分析を拡張し、一般的なネットワークにおける旅行者の出発時刻行動の定式化と VTTV の導出可能性について考察する必要がある。具体的には、経路選択行動の考慮、混雑下における時間的均衡等を考慮したモデルの構築、コスト関数に異質性がある場合への拡張等が必要である。また、自動車交通のように出発時刻が旅行者の自由意思で制約なしに決められるような場合のみならず、鉄道や航空のように離散時間間隔で提供される交通サービスの分析方法も検討する必要がある⁵⁾。

(b) 旅行時間分布の取り扱い

構築した理論モデルをネットワークレベルに拡大す

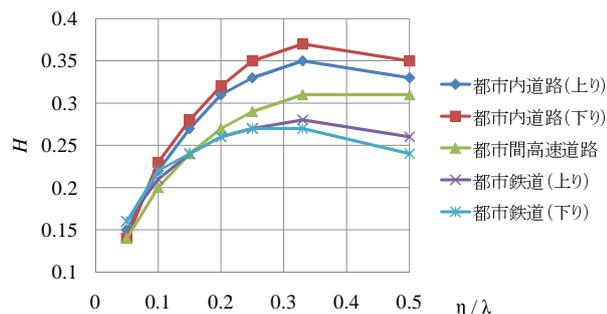


図 - 1 η/λ に対する H の値 (デンマークでの試算例)

るためには、所要時間分布の経験的特性 (e.g. 左右非対称，右裾が長い等) を再現し、かつ、集計化のために好ましい統計学的性質を有していることが望ましい。これまでの分析²²⁾ で、安定分布という統計分布族の適用可能性が示唆されているが、さらなる事例分析を通じて Stylized Fact として確立できれば、VTTV を実データから推計する作業が極めて容易になる。

(c) 選好パラメータの推定方法

パラメータ推定に当たっては SP 調査の適用が基本となるが、所要時間変動をどのような形式で提示するかによって回答が大きく異なる可能性が指摘されている⁵⁾。また、不確実性下での意思決定を取り扱うことから、プロスペクト理論に代表される Gain と Loss との間での評価の非対称性等の影響も示唆されており²³⁾、それらを考慮した調査設計方法の確立が必要である。

参考文献

- 倉内文孝・宇野伸宏・嶋本寛・山崎浩気: 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, 土木計画学研究・講演集, Vol. 35, 2006.
- 中山晶一郎・高御堂順也: 道路利用者行動からの時間信頼性評価のレビュー, 土木計画学研究・講演集, Vol. 38, 2008.
- 牧浩太郎・土谷和之・伊藤智彦・由利昌平: 諸外国における道路の所要時間信頼性向上に関する評価手法のレビュー, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, 2009.
- Fosgerau, M., Hjorth, K., Brems, C., and Fukuda, D.: Travel time variability: definition and valuation, Technical report, Technical University of Denmark 2008.
- Bates, J., Polak, J., Jones, P., and Cook, A.: The valuation of reliability for personal travel, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 37, No. 2-3, pp. 191-229, 2001.
- Noland, R. B. and Polak, J. W.: Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues, *Transport Reviews*, Vol. 22, No. 1, pp. 39-54, 2002.
- Lam, T. C. and Small, K.: The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 37, No. 2-3, pp. 231-251, 2001.
- Hollander, Y.: Direct versus indirect models for the effects of unreliability, *Transportation Research Part A*, Vol. 40, No. 9, pp. 699-711, 2006.
- Brownstone, D. and Small, K.: Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 39, No. 4, pp. 279-293, 2005.
- Small, K. A., Winston, C., and Yan, J.: Uncovering the distribution of motorists' preferences for travel time and reliability, *Econometrica*, Vol. 73, No. 4, pp.1367-1382, 2005.
- Noland, R. B. and Small, K. A.: Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes, *Transportation Research Record*, Vol. 1493, pp. 150-158, 1995.
- Small, K. A.: The scheduling of consumer activities: work trips, *American Economic Review*, Vol. 72, No. 3, pp. 467-479, 1982.
- Small, K. A., Noland, R., Chu, X., and Lewis, D.: Valuation of travel-time savings and predictability in congested conditions for highway user-cost estimation, *Transportation Research Board*, Vol. 431, 1999.
- Noland, R. B., Small, K. A., Koskenoja, P. M., and Chu, X.: Simulating travel reliability, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 28, No. 5, pp. 535-564, 1998.
- Bates, J.: Reliability: the missing model variable, In Hensher, D. ed. *Travel Behaviour Research: The Leading Edge*, Oxford, UK, Elsevier Science, 2001.
- Batley, R.: Marginal valuations of travel time and scheduling, and the reliability premium, *Transportation Research Part E*, Vol. 43, No. 4, pp. 387-408, 2007.
- Black, I. and Towriss, J.: Demand effects of travel time reliability, Technical report, Centre for Logistics and Transportation, Cranfield Institute of Technology, London, 1993.
- Hollander, Y.: The attitudes of bus users to travel time variability, In *European Transport Conference*, 2005.
- Rietveld, P., Bruinsma, F., and van Vuuren, D.: Coping with unreliability in public transport chains: a case study for netherlands, *Transportation Research Part A*, Vol. 35, No. 6, pp. 539-559, 2001.
- Transek: Förseningar, restidsosäkerhet och trängsel i samhällsekonomiska kalkyler, Transek AB for SIKÅ, 2002.
- Fosgerau, M. and Karlström, A.: The value of reliability, *Transportation Research Part B* forthcoming, Working paper.
- Fosgerau, M. and Fukuda, D.: Characteristics of the distribution of travel times on an urban road, In *European Transport Conference*, Leiden, Netherlands, 2008.
- Borger, B. D. and Fosgerau, M.: The trade-off between money and travel time: A test of the theory of reference-dependent preferences, *Journal of Urban Economics*, Vol. 64, pp. 101-115, 2008.