

旅行時間変動の価値付けに関する研究展望とプロジェクト評価への適用に向けた課題の整理*

Valuation of Travel Time Variability: Research Perspectives of Behavioral Modeling Approaches and Issues for Applying to Cost-Benefit Analysis*

福田 大輔**

By Daisuke FUKUDA**

1. はじめに

交通システムの混雑、及び、事故等の突発的な事象の発生は、平均的な旅行時間 (Travel Time: TT) が増加するという帰結のみならず、旅行時間変動 (Travel Time Variability: TTV) が増大するという帰結をもたらす。交通プロジェクトの評価を行う際には、これらの両側面を考慮することが必要である。このうち平均的な旅行時間については、計測や将来予測が比較的容易であり、その経済評価は、旅行時間短縮便益の計測として理論的にも概ね完成し、実務でも広く適用されている。

一方、旅行時間変動に関しては、平均旅行時間の評価と同等と言える程の経済評価手法は未だ確立していない。旅行時間変動が大きくなると移動に要する時間を旅行者が予測することが困難になるが、この不確実性は旅行者及び社会全体にとってコストとなる。交通プロジェクトの整備は、旅行時間変動に起因するコストの減少をもたらすと期待され、経済評価においてもその効果を考慮することが重要となる。旅行時間変動を把握するための観測技術の進展と共に、近年、その経済評価に関する研究も進展しており、我が国でも幾つかのレビューが行われている¹⁾⁻³⁾。

さて、日本や米国における旅行時間変動の評価では、Buffer Time Index のような統計値に基づくパフォーマンス指標が多く用いられてきた。このような指標はあくまでもサービス供給側の性能水準を示すものであり、それに基づく評価も「施策実施前後で当該指標がどのように変化したのか」という観点に留まりがちとなる。これに対し欧州では、道路混雑緩和施策の費用便益分析において旅行時間信頼性向上の経済便益を評価項目に加えるための取り組みが近年活発になっている。例えば、ロンドンやストックホルムの混雑料金制度導入による旅行時間信頼性向上便益は、利用者便益全体の2割程度になると言う計算結果も報告されており^{4),5)}、「旅行時間信頼性向上の経済便益は時間短縮便益と比べても無視し得ない大きさである」という基本認識が確立している。

旅行時間信頼性向上の便益、言い換えれば、旅行時間変動の削減便益を費用便益分析の俎上に乗せるためには、旅行者の視点、すなわちミクロ経済学的基礎を有した分析に基づき、旅行時間変動に対する旅行者の限界的支払い意思額 (旅行時間変動価値) を推計することが必要である。従来、平均-分散アプローチに基づいた行動モデルによる検討が中心的になされてきたが^{6),7)}、その理論的基礎は必ずしも明確ではなかった。旅行時間変動の経済的価値付け (Valuation) 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) 標準的もしくはやや発展的な交通需要予測モデルへの適用が可能であること、等の要件が必要と考えられる⁸⁾。

本稿では、以上のような問題意識に基づいて、旅行時間変動の経済的価値付けに関する研究動向について、特に行動モデルを中心としたアプローチのレビューを行う。さらに、モデリング方法に留まらず、選好意識調査等を通じた実際の推計方法や、旅行時間変動の将来予測方法等も含めて、今後解決すべき課題を包括的に整理する。

2. 旅行時間変動の尺度

(1) 用語の整理

旅行時間のバラつきを扱う場面では、変動 (Variability)、信頼性 (Reliability)、規則性 (Regularity)、定刻性 (Punctuality) という各用語が混在して用いられることが多い。特に平均-分散モデルに基づく価値付けにおいては、その原単位が“信頼性価値 (Value of Reliability)”と称されることが多いことから、“旅行時間信頼性”と言う表現がよく用いられている。また、鉄道やバスなどでは、時刻表との関連から“定刻性”と言う表現が多用されている (例えば Kroes et al.⁹⁾)。

本稿では、交通手段の種別によらず、“旅行時間変動”という表現を統一的に用いることとする。これは、“信頼性”という表現が、サービスの故障のような不測で望ましくない (つまり不運な) 現象を直接表わしているのに対し、本稿では「旅行時間は本質的に変動するものであり、結果的に旅行時間が短くなったとしても、その変動は旅行者にとってコストである」という認識に立っているからである⁸⁾。(平均)旅行時間とその限

* キーワーズ：旅行時間変動価値、プロジェクト評価、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)

界的価値（旅行時間価値）も併せて、次のように表現して区別することとする。

- ・ 旅行時間 (Travel Time) : TT
- ・ 旅行時間価値 (Value of Travel Time) : VTT
- ・ 旅行時間変動 (Travel Time Variability) : TTV
- ・ 旅行時間変動価値 (Value of Travel Time Variability) : $VTTV$

(2) 利用者から見た旅行時間変動

旅行時間は、“自由流旅行時間（混雑の無い最少旅行時間: Free-flow travel time）”と、それからの“遅れ (Delay)”とに分解して取り扱われることが多い。しかし、この定義による遅れには、週末と平日の違いや一日の中でのピーク時・オフピーク時の旅行時間の系統的な違いのように、予測可能で不確実性を引き起こさないものも含まれている。したがって、旅行者の観点から旅行時間変動を考える場合には、上述の“遅れ”を、観測されたトリップ特性から説明できる“システムティックな遅れ（周期的遅れ）”と、“説明・予測が不可能な遅れ（非周期的遅れ）”とに分離して考えるのが適切である^{10),11)}。後者の非周期的遅れは、旅行者が知覚できなかった全ての遅れ時間を含んでおり、事故や告知無しの路上工事に起因する交通需要の増減、道路容量の低下等に起因するものである。

無論、以上の議論は、旅行者が当該トリップについてどれだけ知識を有しているかに依存する。例えば、当該トリップを日常的に繰り返す旅行者は、需要変動の大部分をよりの確に予測できると共に、事故による遅れの発生の可能性についても他者より詳しい知識を有している。また、この知識は、日々の交通行動を通じて、旅行者が旅行時間の確率分布に関する客観的知識を形成する“学習”という側面も併せ持つ。しかし、旅行者の知識の相違や適応的側面を考慮した上での旅行時間変動の価値付けはこれまで行われていない。

旅行時間変動を考慮した利用者行動のモデル分析では、通常、ある確率分布に非周期的遅れが従うと考える。以降本稿では、旅行時間変動価値の推計を念頭に置いて、“旅行時間変動 = 旅行時間の確率変動”と定義する。すなわち、旅行時間変動は“予測不可能遅れの変動”を意味すると考える。一方、自由流旅行時間とシステムティック遅れの偏差については、“システムティック変動”と称して区別することとする。

(3) 旅行時間変動尺度の要件

旅行時間価値 (VTT) は、旅行時間 (TT) という、明確な定義の数量に対する利用者の限界的価値である。一方、旅行時間変動価値 ($VTTV$) は、旅行時間分布に関連する“何らか”の尺度の限界的価値であり、その定義は旅行時間価値に比べて遥かに曖昧である。旅行時

間分布は様々な尺度で代表させることができるが、その尺度として一般的に用いられるのは、標準偏差、分散、タイル値等である。また、四分位範囲、歪度、尖度等の適用も考えられる¹²⁾。厳密に考えると、旅行時間分布の全てのモーメント統計量が関連することになる。したがって、何らかの仮定を置かない限りこれ以上の具体的議論はできない。どのような仮定が許容され、どの尺度が実際に採用されるかは、主に下記の視点に基づくと考えられる。

1. 旅行時間分布の実際の形状
2. 旅行時間分布のどのような変化に対して政策的関心があるのか
3. 旅行時間変動に対する旅行者の選好

まず 1. は、尺度の頑健性に関するものである。例えば四分位範囲は、標準偏差や分散に比べ、外れ値や分布の裾厚の影響を受けにくい特徴を持つ。旅行時間分布は一般に、左裾には下限がある一方で右裾が長くなるという特徴を持っており、この性質は重要である¹²⁾⁻¹⁴⁾。次に 2. は、旅行時間変動の尺度の中で、どれが将来予測により適しているかという視点である。例えば標準偏差は、他の尺度に比べて操作性が高く、理論的・経験的な観点からモデル化の試みが多く行われている^{15),16)}。最後に 3. は、便益評価に直接関連するもので、どのような尺度を用いればミクロ的基礎を持つドライバーの行動モデルとの対応付けが可能になるかという観点である。3. については、次節で詳述される。

3. 旅行時間変動の価値付けに関するモデリングの方法

旅行時間変動を交通行動モデルに組み込む際の代表的なアプローチは、平均-分散アプローチとスケジューリングアプローチに大別される^{8),10)}。これら二つのアプローチは、旅行時間変動が旅行者に認識されている状況をどうモデル化するかという点で異なっている。平均-分散アプローチでは、早着遅着にかかわらず、不確実性そのものによって生じる旅行時間変動による旅行者の不便さが直接的にモデル化される。一方、スケジューリングアプローチでは、旅行時間変動は、旅行者自身のスケジュール決定を介して効用に影響を与えると仮定される。すなわち、どれぐらいの頻度で遅れるのか、また、平均的にどのぐらいの長さの時間で遅れる（あるいは、早く着く）のかと言う点に着目している。

行動モデルを統計学的に同定するためには、平均-分散アプローチの場合には経路選択や交通手段選択の行動データが、一方スケジューリングアプローチの場合には出発時刻選択に関する行動データが必要となる。なお、実際の旅行時間変動と関連付けられた行動データ (RP データ) の取得は一般的に難しく¹⁷⁾、旅行時間

変動価値推計のために必要な行動データは、選好意識調査（SP 調査）から得られることが多い。

(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、旅行時間の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^{10),11),18),19)}。このアプローチでは、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 σ_T に依存すると仮定される。ここで σ_T には多くの場合標準偏差が用いられるが、場合によってはタイル値レンジ等^{17),20),21)} も適用される。効用関数は式 (1) で表わされる。

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

ここで δ, ζ, 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。通常これらは経路選択行動あるいは交通手段選択行動に関する非集計データを用いて推定される。式 (1) に基づけば、計量経済学的に求められた旅行費用と旅行時間変動の限界不効用の比を単純に取ることによって、 $VTTV$ を式 (2) のように推計することができる。

$$VTTV = \frac{\rho}{\delta} \quad (2)$$

式 (2) の $VTTV$ は、説明変数に社会経済属性を共変量として導入したり、あるいは、ランダム係数モデルによる非観測異質性を導入することにより、その分布を推計することも可能である（例えば Small et al.²¹⁾）。

大規模な実務の事例では、その明快さや分析の容易さから、平均-分散アプローチが頻繁に用いられてきた。とりわけ国レベルでの旅行時間変動価値の推計では、オランダ²²⁾、ノルウェー²³⁾、スウェーデン²⁴⁾ のように、平均-分散アプローチが用いられている。特にオランダでは、2009 年に全国規模の SP 調査が実施されており、その分析結果に基づいて、費用便益分析のガイドラインに旅行時間変動の経済便益を導入する予定である²²⁾。

モデルの単純さ故に多くの適用事例がある平均-分散アプローチだが、効用関数の引数として平均や標準偏差のような統計尺度が含まれることのミクロ経済学的根拠は明らかではない。すなわちこのアプローチの行動論的基礎は必ずしも明確ではなく、“交通システムの供給モデルから得られる旅行時間変動を考慮した行動モデル”と言う以上の説明を与えることは難しい。交通経済学では移動を必要悪と仮定し、移動そのものによって効用は生じず、仕事、買い物、訪問などの派生需要と考えることが通常である^{25),26)}。この枠組みの元では、不確実性は活動の時間配分を複雑化することを通じて旅行者に不効用をもたらす。すなわち旅行時間変

動は、旅行時間が予想していたものよりも時には短くなったり、またあるときには長くなることによって、旅行者の活動計画に影響を与える。これに関連して Bates et al.¹⁰⁾ は、「旅行時間の不確実性は、何が起こるか分からないことによる不安やストレス、苛立ちにつながり、それが旅行者の不効用になる」と述べている。平均-分散アプローチは、旅行時間の不確実性の尺度として標準偏差を仮定したモデルだと解釈できるが、そのミクロ的基礎の厳密な検討は十分には行われていない。

(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 Small²⁷⁾ により提案された。その基礎は Small²⁸⁾ が提案した旅行時間が確定的に与えられる状況における旅行者の出発時刻選択モデルである。Noland and Small²⁷⁾ は、旅行時間変動が旅行者のスケジュール決定に及ぼす影響を分析するために Small²⁸⁾ のモデルを拡張した。

以下では Bates et al.¹⁰⁾ の表記に倣って本アプローチを概説する。旅行者の効用は、旅行費用 C 、旅行時間 T 、旅行者の希望到着時刻 (PAT : Preferred Arrival Time) からどれ位遅着したか (SDL : Schedule Delay Late)、あるいは逆にどれ位早着したか (SDE : Schedule Delay Early) に基づいて決定され、出発時刻 t_h の選択を規定する。このとき直接効用関数は式 (3) で表される。

$$U(t_h) = \delta C + \alpha T + \beta SDE + \gamma SDL + \theta D_L \quad (3)$$

ここで D_L は遅着の場合に 1 となるダミー変数である。 α, β, γ はそれぞれ旅行時間、早着、遅着の限界効用であり、また θ は遅着そのもののペナルティである。なお本モデルにおいても、共変量を含めることで旅行者の異質性を考慮することが可能である^{28),29)}。また、スケジューリングに関連する限界効用の大小関係は、多くの実証研究^{10),11),19),28)-30)} において $\gamma < \beta < 0$ という共通した結果が得られており、遅着の方が早着よりも影響が大きいことが示唆されている。このような早着と遅着に関する不効用の非対称性は、遅着のペナルティ項 θ を導入することで更に拡大する。

旅行時間がランダムで確率変数と見なせる場合、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。期待効用は式 (4) のように表される。

$$EU = \delta C + \alpha ET + \beta E(SDE) + \gamma E(SDL) + \theta P_L \quad (4)$$

ここで $E(\cdot)$ は旅行時間分布に関する期待値演算子である。また、 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、式 (4) に基づく旅行者の期待効用最大化問題を解析的に解くことはできない。例えば、交通工学における類似の研究である Hall³¹⁾ は、旅行時間が正規分布に従うことを仮定した上で解析的な展開を行っている。Noland and Small²⁷⁾ は、旅行時間変動が出発時刻に依存せずに独

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に解析解が得られることを示した。指数分布を仮定した場合、最大化された期待効用は式(5)のように表される¹⁰⁾。

$$EU^* = \delta C + \alpha ET + \theta P_L^* + H(\alpha, \beta, \gamma, \theta, b, \Delta) b \quad (5)$$

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 $H(\cdot)$ 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。また、 P_L^* は最適遅着確率(Optimal Probability of Being Late)と呼ばれ¹⁰⁾、ドライバーが最適出発時刻を選択した際に旅行時間変動の下で遅着が生じる確率を表わす。 P_L^* は、旅行時間が指数分布に従う場合には式(6)で与えられる。

$$P_L^* = \frac{b(\beta - \alpha\Delta)}{\theta + b(\beta + \gamma)} \quad (6)$$

スケジューリングアプローチに基づいた場合の $VTTV$ は、遅着、早着それぞれに対する限界効用と費用の限界効用の比をとることにより、式(7)に示すように二つの異なる値が求められる。

$$VTTV_{SDE} = \frac{\beta}{\delta}, \quad VTTV_{SDL} = \frac{\gamma}{\delta} \quad (7)$$

(3) $VTTV$ の推計値の例

既往研究によって得られた $VTTV$ の推計値を表-1に要約して示す。各貨幣価値は調査実施年の各通貨の為替レートを用いて日本円に換算している。先述のとおり、国レベルでの旅行時間変動の価値付けについて

は、現在のところスウェーデン、ノルウェー、オランダで検討されているが、確定的な結果はいずれも得られていない。表-1に示す実証的知見は、ある特定道路や交通機関、地域等における小規模な調査を通じて推定されたものである。

推定結果の多くは欧米のものであり、先述の二つのアプローチを個別に用いたり、あるいは統合した推計を行うことによって旅行時間変動価値($VTTV$)を推計している。研究のほとんどがSPデータを用いており、 $VTTV$ や信頼性比(VTT に対する $VTTV$ の比)の推計値が研究間で大きくばらついていることが分かる。 $VTTV$ の推計の困難さを示唆する結果である。

幾つかの実証研究では、スケジューリングアプローチと平均-分散アプローチの比較を行っており、興味深い考察がなされている。例えば Small et al.²⁹⁾ では、カリフォルニア州道 91 号線で得られた自動車利用者の SP データに計量経済学的手法を適用し、 $E(SDE)$ や $E(SDL)$ などのスケジューリング変数と旅行時間の標準偏差との間に共変関係があることを見出している。これは、スケジューリング変数が旅行時間の不確実性に対するドライバーの回避傾向(標準偏差など)によって近似的に説明できることを示唆する結果である。同様の知見は、Hollander¹⁹⁾ によるヨークでのバス利用者に対する SP 調査の分析結果や、Noland et al.³⁰⁾ によるロサンゼルスで収集された SP データの分析結果においても得られている。Hollander¹⁹⁾ は、モデルにおける旅行時間の標準偏差の項は、スケジューリング変数が含まれないときは統計的に有意であったが、スケ

表-1 既往の $VTTV$ 推計研究の要約

出典	国, モード, データ	行動モデル	旅行時間変動価値	信頼性比
Asensio and Matas (2008) ³²⁾	スペイン, 自動車, SP	スケジューリング	早着: 16.4 円/分, 遅着: 80.2 円/分	
Bates (2001) ³³⁾	英, 鉄道, SP	スケジューリング	早着: 134 円/分, 遅着: 272 円/分	
Batley et al. (2007) ³⁴⁾	英, 鉄道, SP	平均-分散, スケジューリング同時考慮		業務/通勤: 1.35-2.71 私的: 2.48-3.28
Bhat and Sardesai (2006) ³⁵⁾	米, 多モード, SP/RP	平均-分散	フレックス勤務: 5.4 円/分 固定勤務時間: 9.8 円/分	0.27-0.50
Black and Towriss (1993) ³⁶⁾	英, 全機関, SP	平均-分散		自動車通勤者: 0.70, 全通勤者: 0.55
Hensher (2001) ³⁷⁾	ニュージーランド, 車, SP	平均-分散	7.3 円/分	0.57
Hollander (2005) ³⁸⁾ , (2006) ¹⁹⁾	英, バス, SP	スケジューリング	早着: 11 円/分, 遅着: 31 円/分 男性: 26-33 円/分, 女性: 60-76 円/分	
Lam and Small (2001) ¹⁷⁾	米, 車, SP	平均-分散		
Noland et al. (1998) ³⁰⁾	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) ³⁹⁾	オランダ, 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	確率 50%: 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, 遅着: 26-40.3 円/分	
Small et al. (1999) ²⁹⁾	米, 車, SP	平均-分散, スケジューリング分離推定 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 (中央値), 61-66 円/分 (四分位範囲) SP: 12-13 円/分 (中央値), 15-18 円/分 (四分位範囲)	
Small et al. (2005) ²¹⁾	米, 車, SP/RP			
Transek (2002) ⁴⁰⁾	スウェーデン, 車, SP	平均-分散		0.96
高橋・福田 (2010) ⁴¹⁾	日本, 車, SP	平均-分散		1.68-3.08

ジューリング変数が加えられると多重共線性により統計的有意性が低下すると結論付けている。また Noland et al.³⁰⁾ は、不確実性の効果は、プランニングコスト変数としてモデルに導入するよりもスケジューリング変数として導入した方が説明力が向上すると述べている。但しこれらの研究では、平均-分散アプローチの方が旅行時間価値を過大評価し、旅行時間変動価値を過小評価する傾向があることも示唆されている。また、日本においても、山下・黒田⁴²⁾ が遅刻回避型効用関数と平均-分散型効用関数との近似の可能性について類似した考察を行っている。

(4) 両アプローチの関連性

Bates et al.¹⁰⁾ 並びに Noland and Polak¹¹⁾ は、(a) 旅行時間変動がパラメータ b を持つ指数分布で表される、(b) 旅行時間分布が出発時刻から独立である、(c) $\theta = 0$ 、という三つの条件が満足されれば、式 (5) が式 (8) のように単純化できることを示した。

$$EU^* = \delta C + \alpha ET + \beta \ln\left(\frac{\beta + \gamma}{\beta}\right) b \quad (8)$$

b は旅行時間が指数分布に従う場合の標準偏差であることから、最大期待効用が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確認される。すなわち、限定的な条件のもとで、スケジューリングアプローチは平均-分散アプローチに帰着する。

しかし、式 (8) を導出するために設けた仮定の中でも、旅行時間分布に指数分布を用いること、あるいは、旅行時間分布の出発時刻独立性については、多くの実証研究がその現実的妥当性を疑問視している。また先述の通り、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研究より、平均-分散アプローチは旅行時間価値を過大評価し、旅行時間変動価値を過小評価することも示唆されている^{19),29),30)}。

以上より、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好ましい特性を多く有していることが示唆される。しかし、スケジューリングアプローチの実適用に当たっては、各ドライバーの希望到着時刻 (PAT) に関する情報の収集が必要であり、一般的にこの作業は容易ではない。また、統計分布に必要な仮定についても、先述の通り現実の旅行時間分布と大きく乖離している。さらに、スケジューリングアプローチでは、VTTV として $E(SDE)$ 、 $E(SDL)$ それぞれの限界価値が求まる (式 (7))。すなわち、VTTV に相当する複数の限界価値を併用しなければならない。以上の理由から、VTTV 推計の実務におけるスケジューリングアプローチの適用例は少なく、多少の厳密さを損ねても、分析の容易さや意味解釈の明快さを優先して、平均-分散アプローチが多く用いられている状況にある。

4. 価値付けのための新たなアプローチ

(1) 統合アプローチの概要

平均-分散アプローチは、標準偏差等の旅行時間変動尺度を効用関数の引数として直接的に含めている。そのため、実適用は容易であるが厳密な理論的基礎を持たない。一方スケジューリングアプローチは、早着するか遅着するかで効用を規定しており、利用者行動に立脚したより厳密なモデル化と言える。しかし、データ収集の困難さや旅行時間分布の仮定の妥当性に対する疑問から、実適用が困難となっている。すなわち、旅行時間変動の経済評価に向けては、両アプローチの相互補完が必要となる。

この問題意識に基づき、Fosgerau and Karlström⁴³⁾ 並びに Fosgerau and Fukuda⁴⁴⁾ は、近年、統合アプローチによる新たなモデルの提案を行った。これは Noland and Small²⁷⁾ のアプローチを発展させたもので、スケジューリングアプローチ型の効用関数から定式化を開始し、任意の旅行時間分布のもとでの旅行者の最大期待効用が平均-分散モデルの形式に帰着することを示したものである。旅行者の希望到着時刻は明示的には現れず、さらに、シンプルな平均-分散型の定式化であることから、実適用も比較的容易となっている。

(2) モデルの概要

以下、統合アプローチの概要を示す。詳細については元文献^{43),44)} を参照されたい。

旅行者の希望到着時刻をあらかじめ 0 に基準化する。その効用は、実旅行時間 T と出発時刻 $-D$ によって規定されるものとし ($D > 0$)、早着並びに遅着の程度と実際の旅行時間に基づいて式 (9) のように特定化する。

$$U(D, T) = \eta D + \omega T + \lambda (T - D)^+ \quad (9)$$

式 (9) の各項は、第一項：旅行時間が変動することを見越して早く出発する早発不効用、第二項：所要時間の長さによる不効用、第三項：希望到着時刻よりも遅く到着する遅着不効用と解釈することができる。ここで $(T - D)^+$ は遅着時間に相当し、正ならその値を返し、負であれば 0 の値を返す。また η 、 λ 、 ω は、各要因の限界不効用を表わすパラメータである。

なお、この効用関数は式 (3) のモデルを再定式化したものであり、 $\eta = \beta$ 、 $\omega = \alpha - \beta$ 、 $\lambda = \beta + \gamma$ という関係が成り立つことが分かっている^{8),43)}。

次に、旅行時間不確実性については、式 (10) のように位置-尺度型の形式で表す。

$$T = \mu + \sigma X \quad (10)$$

ここで X は、平均 0、分散 1 の密度関数 $\phi(\cdot)$ 並びに分布関数 $\Phi(\cdot)$ に従う確率変数であり、“基準化旅行時間 (Standardized Travel Time)” と称される⁴⁴⁾。

平均旅行時間 μ 並びに標準偏差 σ については、出発時刻 $-D$ に依存して変化させ、それらの時間帯別の系統的差異を前述の“システマティック変動”として明示的に考慮することも可能である⁴³⁾。但しその場合でも X の密度関数 ϕ が D, μ, σ には依存しないと言う仮定は必要である。以下の単純ケースでは、 μ と σ は一定で、それぞれ μ_0, σ_0 の値をとるものとする。以上の設定のもとで、期待効用最大化問題を解いて得られる最大期待効用は式 (11) のように表される^{43),44)}。

$$EU(D^*) = (\eta + \omega)\mu_0 + \lambda H(\Phi, \eta/\lambda)\sigma_0 \quad (11)$$

$$H\left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda}\right) \equiv \int_{1-\eta/\lambda}^1 \Phi(x) dx \quad (12)$$

式 (12) で定義される $H(\cdot)$ は、与えられた基準化旅行時間分布並びに旅行者の限界効用に対して定数となり、本稿では“ H 定数”と称する。また、その引数である $\frac{\eta}{\lambda}$ は、先述の最適遅着確率に相当する。

式 (11) より、最大期待効用が平均旅行時間 μ_0 と標準偏差 σ_0 の線形和で表されることが分かる。これより、旅行時間変動の尺度として標準偏差を適用することのミクロ的基礎が示されたと考えられる。式 (11) は、旅行時間標準偏差の限界効用は λH で与えられ、それが基準化旅行時間分布の形状と旅行者の選好（あるいは最適遅着確率）に依存して決まることを示している。

(3) 統合アプローチに基づく VTTV 推計の手順

式 (11) に基づくと、旅行時間変動を考慮した場合の旅行者の期待一般化費用 EC は式 (13) のように表現することができる。

$$EC = VTT \times \mu_0 + VTTV \times \sigma_0 \quad (13)$$

さらに信頼性比 ($RR = VTTV/VTT$) を用いて、これを式 (14) のように書き改める。

$$EC = VTT \times \mu_0 + VTT \times RR \times \sigma_0 \quad (14)$$

式 (14) より、旅行者の期待一般費用を算出するためには、平均旅行時間と標準偏差の他に、旅行時間価値 (VTT) と信頼性比 (RR) を求めれば良いことが分かる。このうち 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と良い。一方、信頼性比に関しては、式 (12) より以下のように表わすことができる。

$$RR = \frac{VTTV}{VTT} = \frac{\lambda}{\eta + \omega} H\left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda}\right) \quad (15)$$

これより、信頼性比を算出するためには、(i) 旅行時間価値に対する遅着限界効用の比率 $\lambda/(\eta + \omega)$ 、(ii) 最適遅着確率 η/λ 、(iii) 基準化所要時間分布 Φ という三種類の情報が必要であることが分かる。

表 - 2 は、既往研究のパラメータ推定結果に基づく (i)、(ii) 各々の算出値である。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 倍の価値を持つ結果が得られていることが分かる。また、表の第二列より、 η/λ の値をおおよそ 0.33 前後と見積もることができる。これは、「期待効用最大化原理に基づく合理的な旅行者は、3 回のトリップのうち 1 回は希望到着時刻から遅れても良いと考えている」ということを意味している。一方 (iii) の基準化所要時間分布に関しては、福田ら⁴⁵⁾ によるコペンハーゲンの都市内道路の旅行時間データの統計解析結果より、右裾の厚い分布になる傾向があることが確認されている。同様の結果は、ストックホルムでの分析事例⁴⁶⁾、並びに、東名高速道路での分析事例¹⁴⁾ 等においても確認されている。

(4) H 定数の計算と比較

式 (12) で定義される H 定数は、“基準化旅行時間で測った場合の平均的な遅れ時間”と解釈することができる^{43),46)}。仮に、複数の事例分析を通じてこの定数に類似した傾向が確認されたとすれば、それはモデルの移転可能性を示唆しており、実適用上都合が良い。

図 - 1 は、デンマークで長期間に渡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）の旅行時間データを用いてそれぞれの基準化旅行時間分布 Φ を推計し、異なる最適遅着確率 η/λ の設定値に対して H 定数がどのように異なるのかを示したものである⁸⁾。交通サービス間での相違はあるものの、値の大小の傾向は概ね似通っている。Fosgerau et al.⁸⁾ では、都市内道路や都市間高速道路で異なるリンクセクション毎に H 指数を算出し、それぞれの交通手段別に見た時に、概ね同一の値を算出している。

表 - 2 スケジューリングパラメータ比の算出例

研究	$\lambda/(\eta + \omega)$	η/λ
Bates et al. (2001) ¹⁰⁾		0.33
Hollander (2005) ³⁸⁾ , (2006) ¹⁹⁾	3.75	0.27
Noland et al. (1998) ³⁰⁾	2.78	0.42
Small (1982) ²⁸⁾	3.01	0.20

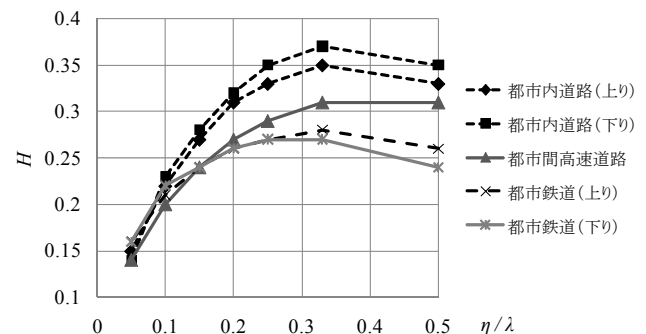


図 - 1 異なる最適遅着確率に対する H 定数の値 (Fosgerau et al.⁸⁾ の分析結果に基づいて作成)

5. プロジェクト評価への適用に向けた課題の整理

前節までのレビューでは、*VTTV* の推計方法として従来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の特徴を整理し、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概説した。統合アプローチは、平均-分散アプローチとスケジューリングアプローチ双方の利点を持ち、実適用が比較的容易である。旅行時間変動の社会経済評価における適用可能性は高いと思われる。

しかし、いずれのアプローチを用いるとしても、プロジェクト評価への実適用に向けて解決すべき課題は多く残されている。本節ではそれらを整理し、今後の展望をまとめる。

(1) モデリングの拡張

本稿でレビューした研究はいずれも、経路選択、交通手段選択、出発時刻選択等、旅行者の比較的単純な意思決定状況を想定している。実際の行動に照らし合わせると、時刻と経路の同時選択等、多次元選択の場面を扱う方がより現実的である（例えば飯田ら⁴⁷⁾）。また、混雑下における出発時刻に関するボトルネック均衡⁴⁸⁾を考慮したモデルの開発等も必要となる。例えば Fosgerau⁴⁹⁾ は、道路容量のランダム性を仮定した Arnott et al.⁵⁰⁾ のボトルネック均衡モデルを拡張し、道路容量変動並びに需要変動の限界費用を算出している。さらに、日々の行動という動学的側面を考慮すると、旅行時間が変動する状況における学習プロセス^{51),52)} が旅行時間変動の価値付けに及ぼす影響についても検討する必要がある。

(2) 一般ネットワークにおける旅行時間分布特性

本稿で紹介したアプローチは、いずれも単一リンク区間での旅行時間分布を念頭としたものである。感知器やプローブ観測技術等の進展とデータの蓄積により、旅行時間分布の推計が容易に行えるようになったものの、通常、旅行時間分布はリンク単位で推計される。分析範囲をネットワークレベルに拡大した場合には、旅行時間分布の取り扱いが困難になる。具体的には、リンク毎の旅行時間の標準偏差を足し合わせて経路全体の旅行時間の標準偏差と見なすことは一般には認められない。加法性を有する正規分布等の統計分布族の適用⁵³⁾も考えられるが、旅行時間分布の実特性（e.g., 左右非対称、右裾が長い）を十分表現できるものではない。リンクレベル 経路レベル OD レベルでの旅行時間変動の分析へと拡張するにつれて、“変動尺度の非加法性”が実適用上の大きな障害となる。

旅行時間分布を何らかのパラメトリックな統計分布によって表現することを考える場合、その経験的特性を

再現し、かつ、集計化を許容する好ましい統計学的性質を有していることが望ましい。Fosgerau and Fukuda⁴⁴⁾では、加法性を有した“安定分布 (Stable Distribution)”という統計分布族の適用可能性を示唆しているが、さらなる事例分析を通じて、これが“Stylized Fact”として確立されれば、トリップ単位での *VTTV* 推計の作業が容易になると期待される。

(3) 旅行時間変動の予測手法の開発

交通政策による旅行時間変動の将来変化を予測するためには、旅行時間の日変動や時刻別変動を予測するモデルの構築が必要である⁵⁴⁾。しかし現状では多くの研究が、道路性能、環境条件、平均旅行時間等を説明変数とした経験式の適用にとどまっている。例えば Eliasson¹⁶⁾ は、ストックホルムの都市内道路のデータを用いて、非線形の予測モデルを構築している。またイギリスの Department for Transport では、指数関数型の特定化を行っている⁵⁶⁾。これらは“旅行時間変動の供給関数”に現状では最も近いものの、そのミクロ的基礎は確立しておらず、安定性や移転可能性なども検証されていない。今後より多くの検討がなされるべき研究項目の一つである。

なお、このトピックに関連して、単一道路リンクにおける旅行時間の標準偏差と平均に関しては、多くの実証研究^{8),33),43)-46)}において図-2のようなループ関係（出発時刻順にプロットすると、逆時計回りのループになる）が概ね共通に観察されることが明らかになっている。同様の現象は、道路交通に限らず、都市鉄道の遅延においても確認されている（図-3）。すなわち、時間軸上で見た時に、平均旅行時間のピークがまず現れ、その後平均旅行時間は低下していく一方で標準偏差のピークが現れるという現象が多く観察されている。Fosgerau⁵⁷⁾は、待ち行列理論とイェンセンの不等式を用いて、この現象が生じるメカニズムを理論的に説明した。平均旅行時間は標準偏差に比べて計測や予測が容易であり、これらの間に明確な関係を規定できれば、平均旅行時間から標準偏差を高い精度で予測できるようになることが期待される。

(4) 適切な選好意識調査方法の確立

旅行時間変動価値の推計のためには旅行者の選択行動データが必要となる。RP データでは変数間の相関が強く、また、旅行時間変動と関連付けた形で実行データを取得することが困難であることから、SP 調査の適用が基本となると考えられる。

SP 調査では、旅行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ことが従来から指摘されている^{10),58),59)}。同じ旅行時間分布の情報を数字の羅列として示すのか、それとも棒グラフなどの

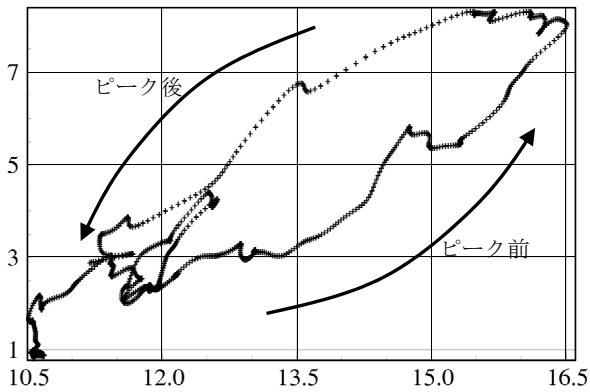


図 - 2 平均旅行時間 (横軸) と標準偏差 (縦軸) の散布図 [単位: 分, 延長約 15km の高速道路]⁴⁵⁾

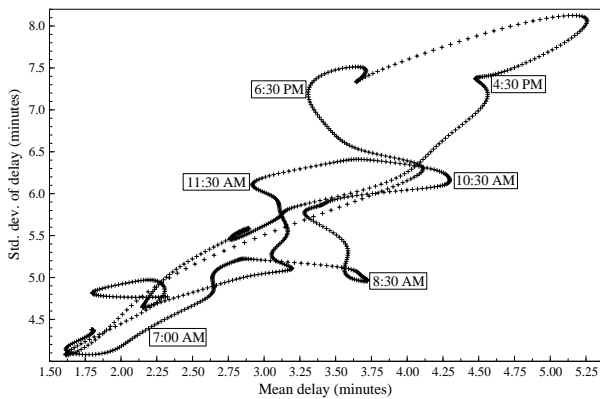


図 - 3 平均遅延時間 (横軸) と遅延の標準偏差 (縦軸) の散布図 [単位: 分, 都市鉄道]⁸⁾

視覚化を行ってから示すのかによって、回答が有意に異なることが指摘されている⁶⁰⁾。実適用の例として、オランダでは、念入りのプレ調査を行って何種類ものフォーマットをテストし、最終的に図 - 4 に示すようなシンプルな形式を全国調査で採用した。SP 調査の適用についての最新のレビューは Li et al.⁶¹⁾ が詳しい。

なお、旅行時間変動に対する旅行者の選好を平均-分散アプローチの枠組みで推計する場合には、必然的に不確実性下での意思決定を取り扱うことになる。そのため、プロスペクト理論等で示されている利得と損失

の間での非対称性等も推計結果に影響を及ぼすと考えられる⁶²⁾。その場合、被験者は異なる旅行時間分布の間での選択を指示されることになり、情報過多によって SP 調査の信頼性の低下をもたらす可能性もある⁸⁾。行動経済学的な観点に立脚した調査設計方法、並びにモデル推計方法の確立が必要である。

(5) 公共交通における旅行時間変動と利用者行動

鉄道、バス、航空等の公共交通においても、遅延という形で旅行時間変動やサービスの信頼性が問題となる。通常、公共交通機関は時刻表に従ってサービスが提供されるため、サービスの利用間隔 (運行頻度) も、旅行者の行動を規定する。すなわち、公共交通では、移動に要する時間の変動に加えて、駅やバス停における待ち時間の影響^{10),63)} も考慮する必要がある。このためには“サービス間隔の離散性”を考慮した新たなスケジューリングモデルの構築が必要となる。

また、時刻表に従って提供される公共交通サービスの旅行時間分布は、一般に自動車交通のそれとは異なる特性を持っていると考えられる。例えば、バスが予定よりも早くバス停に到着したら、そのバスは時刻表で定められた出発時間まで待たねばならず、時刻表に従うサービスでは早着の時間を蓄積することができない。その反面、単一の公共交通路線における旅行時間分布は、さほど複雑ではないという結果も得られている。例えば Rietveld et al.³⁹⁾ は、鉄道の旅行時間変動が対数正規分布に類似していることを確認している。また Bates et al.¹⁰⁾ は、鉄道の遅延時間分布が一般化ワソソ分布に近い形をしていると述べている。

連続する複数の公共交通区間における各旅行時間分布を、全区間の旅行時間分布に集計する作業はより複雑になる。公共交通どうしのトリップチェーンでは、わずかな遅れで乗換ができなくなり、大きな遅れにつながる。このように、バスや鉄道の乗り継ぎに失敗する確率や、乗り遅れによる追加的遅延の影響をモデル化することが必要である³⁹⁾。

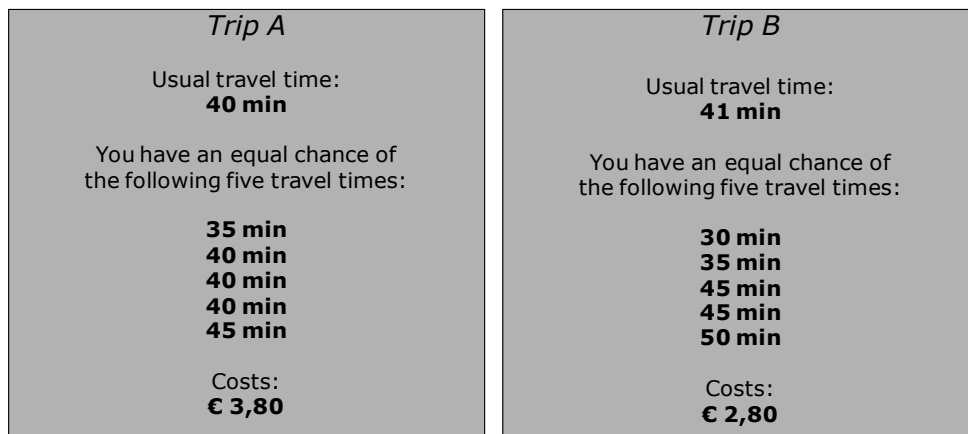


図 - 4 オランダで採用された SP フォーマット (回答の容易さを優先してスケジューリングの属性は除外された)²²⁾

6. おわりに

本稿では、旅行時間変動の経済的価値付けに関して、特に行動モデルに関連する研究を対象として研究動向のレビューを行うと共に、プロジェクト評価への実適用に向けた関連課題の包括的な整理を行った。

レビューにおいては、価値付けのアプローチを平均-分散アプローチとスケジューリングアプローチとに大別し、それぞれのメリット・デメリットを整理した。実務においては考え方が単純で操作性の高い平均-アプローチが多用されているものの、そのモデルはミクロ経済学的基礎が十分でないことを指摘した。また、実際の価値推計においても、SP調査において行動経済学的な観点から解決すべき課題が多く残されていることを指摘した。SP調査の難しさは、表-1に示した推計結果の値が大きくバラついていることから明らかであろう。一方スケジューリングアプローチは、行動論的基礎が確立しており、限定的な条件では平均-分散モデルに等価になるという特徴を有している。その一方、実適用においては旅行者の希望到着時刻の正確な情報収集に多大な労力を伴うという短所も併せ持っている。これら両アプローチの相互補完を目指すのが統合アプローチである。その一般化費用はシンプルな平均-分散型の形状となって希望到着時刻も明示的に現れない。モデルパラメータの推計方法等はまだ確立していないものの、経済学的な厳密さが要求されるプロジェクト評価への適応性が高いと考えられる。

日本の現行の道路事業評価では、利用者便益は三種類（時間短縮、費用節減、交通事故削減）に限定されている。これら以外に数ある経済便益の中でも、旅行時間変動の便益は、研究の蓄積や推計に必要な交通データの整備が進んでおり、比較的導入が行い易いと考えられる。無論、経済便益として厳密に組み込むためには、標準偏差等の変動尺度の将来予測のみならず、旅行時間分布そのものの予測、利用者均衡の考慮、行動経済学的観点を考慮した不確実性下でのスケジューリング選好の計測、及び、それらに対応した選好意識調査方法の確立等が不可欠である。しかし、それら全ての課題が完全に解決されずとも、十分に筋道の通った理論、データ、分析に基づいて実施した便益計測に対して幅広くコンセンサスが得られれば、導入は十分可能であると考えられる。例えば旅行時間短縮便益は、その全ての課題が解決された訳ではないが、十分な検討を踏まえてコンセンサスを形成し、現行の費用対効果分析マニュアルに導入されている。多くの交通プロジェクトにおいて旅行時間変動削減の経済便益は無視できないシェアを占めることは確かであり、費用便益分析への導入に向けたコンセンサスの形成や、導入時の限界点の整理を行うことが今後必要になると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) SACTRA: Transport and the economy: Full report, Technical report, The Standing Advisory Committee for Trunk Road Assessment, Department of Transport, Great Britain 2006.
- 5) Eliasson, J.: A cost-benefit analysis of the stockholm congestion charging system, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 43, pp. 468-480, 2009.
- 6) Jackson, W. and Jucker, J.: An empirical study of travel time variability and travel choice behavior, *Transportation Science*, Vol. 16, No. 4, pp. 460-475, 1981.
- 7) Taylor, M. A. P.: Travel time variability - the case of two public modes, *Transportation Science*, Vol. 16, No. 4, pp. 507-521, 1982.
- 8) Fosgerau, M., Hjorth, K., Brems, C., and Fukuda, D.: Travel time variability: definition and valuation, Technical report, Technical University of Denmark 2008.
- 9) Kroes, E., Kouwenhoven, M., Duchateau, H., Debrincat, D., and Goldberg, J.: Value of punctuality on suburban trains to and from Paris, *Transportation Research Record*, Vol. 2006, pp. 67-75, 2007.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Van Lint, J. W. C., Van Zuylen, H. J., and Tu, H.: Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 42, No. 1, pp. 258-277, 2008.
- 13) Van Lint, J. W. C. and Van Zuylen, H. J.: Monitoring and predicting freeway travel time reliabil-

- ity: using width and skew of day-to-day travel time distribution, *Transportation Research Record*, Vol. 1917, pp. 54–62, 2005.
- 14) 福田大輔・フォスグロウモーンズ: 道路交通における所要時間分布特性の統計解析: 時間信頼性の評価に向けて, *土木計画学研究・講演集*, Vol. 37, 2008 .
 - 15) Warffemius, P.: Using the standard deviation of the travel time distribution as an indicator for valuing the reliability of travel time, In *ECTRI Young Researchers Seminar*, 2005.
 - 16) Eliasson, J.: Forecasting travel time variability, In *European Transport Conference*, 2006.
 - 17) 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.
 - 18) Senna, L.: The influence of travel time variability on the value of time, *Transportation*, Vol. 21, No. 2, pp. 203–228, 1994.
 - 19) Hollander, Y.: Direct versus indirect models for the effects of unreliability, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 40, No. 9, pp. 699–711, 2006.
 - 20) 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.
 - 21) 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 .
 - 22) Warffemius, P.: Preliminary results of the Dutch valuation study, In *International Meeting on Value of Travel Time Reliability and Cost-Benefit Analysis*, 2009.
 - 23) Samstad, H.: Norwegian valuation studies 2008–2010, In *International Meeting on Value of Travel Time Reliability and Cost-Benefit Analysis*, 2009.
 - 24) Transek: Restidsosäkerhet och förseningar i vägtrafik – effektsamband för samhällsekonomiska beräkningar, Transek AB for Vägverket, 2006.
 - 25) Becker, G.: A theory of the allocation of time, *Economic Journal*, Vol. 75, No. 299, pp. 493–517, 1965.
 - 26) DeSerpa, A.: A theory of the economics of time, *Economic Journal*, Vol. 81, No. 324, pp. 828–846, 1971.
 - 27) 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.
 - 28) Small, K. A.: The scheduling of consumer activities: work trips, *American Economic Review*, Vol. 72, No. 3, pp. 467–479, 1982.
 - 29) 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, Technical Report 431, National Cooperative Research Highway Program, 1999.
 - 30) 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.
 - 31) Hall, R.: Travel outcome and performance: The effect of uncertainty on accessibility, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 17, No. 4, pp. 275–290, 1983.
 - 32) Asensio, J. and Matas, A.: Commuters' valuation of travel time variability, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 44, No. 6, pp. 1074–1085, 2008.
 - 33) Bates, J.: Reliability: the missing model variable, In Hensher, D. ed. *Travel Behaviour Research: The Leading Edge*, Oxford, UK, Elsevier Science, 2001.
 - 34) Batley, R.: Marginal valuations of travel time and scheduling, and the reliability premium, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 43, No. 4, pp. 387–408, 2007.
 - 35) Bhat, C. R. and Sardesai, R.: The impact of stop-making and travel time reliability on commute mode choice, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 40, No. 9, pp. 709–730, 2006.
 - 36) Black, I. and Towriss, J.: Demand effects of travel time reliability, Technical report, Centre for Logistics and Transportation, Cranfield Institute of Technology, London 1993.
 - 37) Hensher, D. A.: Measurement of the valuation of travel time savings, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 35, No. 1, pp. 71–98, 2001.
 - 38) Hollander, Y.: The attitudes of bus users to travel time variability, In *European Transport Conference*, 2005.
 - 39) Rietveld, P., Bruinsma, F., and van Vuuren, D.:

- Coping with unreliability in public transport chains: a case study for netherlands, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 35, No. 6, pp. 539–559, 2001.
- 40) Transek: Förseningar, restidsosäkerhet och trängsel i samhällsekonomiska kalkyler, Transek AB for SIKA, 2002.
- 41) 高橋茜・福田大輔: 選好意識調査と統合モデルに基づく旅行時間変動価値の推計の試み, 土木計画学研究・講演集, Vol. 41, CD-ROM, 2010 .
- 42) 山下智志・黒田勝彦: 交通機関の定時性と遅刻回避型効用関数, 土木学会論文集 No. 536/IV–31, pp.59–68, 1996 .
- 43) Fosgerau, M. and Karlström, A.: The value of reliability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 44, No. 1, pp. 38–49, 2010.
- 44) Fosgerau, M. and Fukuda, D.: Characteristics of the distribution of travel times on an urban road, In *European Transport Conference*, Leiden, Netherlands, 2008.
- 45) 福田大輔・松本治之・市村強: トリップスケジューリングモデルに基づく所要時間信頼性の経済評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, 2009 .
- 46) Franklin, J. and Karlström, A.: Travel time reliability for stockholm roadways: Modeling the mean lateness factor, *Transportation Research Record*, Vol. 2134, pp. 106–113, 2009.
- 47) 飯田恭敬・柳沢吉保・内田敬: 通勤交通の経路選択と出発時刻分布の同時推定法, 土木計画学研究・論文集 , No. 9, pp.93–100, 1991 .
- 48) Vickrey, W.: Congestion theory and transport investment, *American Economic Review*, Vol. 59, pp. 251–261, 1969.
- 49) Fosgerau, M.: Congestion costs in bottleneck equilibrium with stochastic capacity and demand, In *European Transport Conference*, 2008.
- 50) Arnott, R. A., de Palma, A., and Lindsey, R.: Information and time-of-usage decisions in the bottleneck model with stochastic capacity and demand, *European Economic Review*, Vol. 43, pp. 525–548, 1999.
- 51) Ettema, D. and Timmermans, H.: Costs of travel time uncertainty and benefits of travel time information: Conceptual model and numerical examples, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 14, No. 5, pp. 335–350, 2006.
- 52) Avineri, E. and Prashker, J.: Sensitivity to travel time variability: travelers’ learning perspective, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 13, No. 2, pp. 157–183, 2005.
- 53) 飯田恭敬: 交通計画のための新パラダイム–交通ネットワーク信頼性と OD 交通量逆推定 , 技術書院, 2008 .
- 54) Chang, J.: Assessing travel time reliability in transport appraisal, *Journal of Transport Geography*, Vol. 18, No. 3, pp. 419–425, 2010.
- 55) Department for Transport: The reliability subjective. tag unit 3.5.7. web tag guidance note, Technical report, Department for Transport, London 2009.
- 56) 牧浩太郎・土谷和之・伊藤智彦・由利昌平: 英国の道路事業評価における所要時間信頼性に関する便益計測手法, 交通工学, Vol. 45, No. 2, pp.49–52, 2010 .
- 57) Fosgerau, M.: On the relation between the mean and variance of delay in dynamic queues with random capacity and demand, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 34, No. 4, pp. 598–603, 2010.
- 58) 村上岳司・原田昇・太田勝敏: SP 調査における所要時間信頼性の表現形式が選択に与える影響, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, pp.539–546, 2003 .
- 59) Tilahun, N. and Levinson, D.: A moment of time: Reliability in route choice using stated preference, *Transportation Research Board 87th Annual Meeting*, 2008.
- 60) Tseng, Y., Verhoef, E., de Jong, G., Kouwenhoven, M., and van der Hoorn, T.: A pilot study into the perception of unreliability of travel times using in-depth interviews, *Journal of Choice Modelling*, Vol. 2, No. 1, pp. 8–28, 2009.
- 61) Li, Z., Hensher, D. A., and Rose, J. M.: Willingness to pay for travel time reliability in passenger transport: A review and some new empirical evidence, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 46, No. 3, pp. 384–403, 2010.
- 62) 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.
- 63) Fosgerau, M.: The marginal social cost of headway for a scheduled service, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 43, No. 8–9, pp. 813–820, 2009.

本稿では、旅行時間変動の経済的価値付けに関して、特に行動モデル関連の研究を対象として研究動向のレビューを行うと共に、プロジェクト評価への実適用に向けた関連課題の包括的な整理を行った。レビューにおいては、代表的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の特徴と実適用上の課題を整理し、旅行時間変動価値の推計事例を整理した。さらに両者を統合した新たなアプローチの実適用可能性についても概説した。次に、旅行時間変動の将来予測や SP 調査における行動経済学的観点の必要性など、価値付けに関連する諸課題についても包括的な整理を行った。

Valuation of Travel Time Variability: Research Perspectives of Behavioral Modeling Approaches and Issues for Applying to Cost-Benefit Analysis

By Daisuke FUKUDA

This paper reviews modeling frameworks and empirical evidences on the valuation of travel time variability and summarizes the issues which are needed to work on the economic appraisal of transport infrastructure. In the literature review, we introduce the two classes of the modeling approaches: the mean-variance approach and the scheduling approach and continue with a discussion of their relative advantages and disadvantages. We further introduce a new integrated approach, which has some nice properties for economic appraisals. The summary of future issues are mainly dedicated to forecasting travel time variability, extension of the behavioral model and the aspects of behavioral economics in the stated preference survey.
