

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*

Travel Time Variability: Definition and Valuation with Trip-Scheduling Model*

福田 大輔**・松本 治之***・市村 強****

By Daisuke FUKUDA**・Haruyuki MATSUMOTO***・Tsuyoshi ICHIMURA****

1. 背景と目的

我が国では、道路をはじめとする各種交通インフラ整備の社会経済評価において、新規事業採択時における費用便益分析の実施が義務づけられるなど、事業評価の制度化が進みつつある。交通システム改善の便益として大きなシェアを占めるのは、交通所要時間の短縮便益であり、その基礎となる節約時間価値や便益計測方法に関しては、多くの研究や適用事例が存在する。

しかし、道路交通システムの改善に伴って所要時間の定刻性が向上することによって利用者が享受するメリット、すなわち、所要時間信頼性向上の経済便益についての経済計算の方法はまだ確立していない。そのためか、我が国やアメリカにおける道路所要時間の不確実性の評価には、BTI (Buffer Time Index) のようなパフォーマンス・メジャーがよく用いられている。しかし、これらの指標に対して経済学的な意味を与えることは難しく、「施策実施前後で指標がどう変化したのか」という評価しか行われてこなかったのが実状である。

一方欧州では、英国の SACTRA (Standing Advisory Committee for Trunk Road Assessment) のように、道路混雑緩和施策の費用便益分析において所要時間信頼性向上の便益を評価項目に加えようという動きが見られる。例えば、SACTRA によると、ロンドンの混雑料金制度導入による時間信頼性向上の経済便益は、道路利用者が享受する便益全体の 2 割強になるという試算もなされている¹⁾。「定刻性の向上」という道路サービス改善の効果を費用便益分析の俎上に乗せて評価することで事業効果の説明の客観性が高まると期待される。そのためには、定刻性の向上に対して利用者の支払い意思額 (時間信頼性価値、VTTV: Value of Travel Time Variability) を推計することが可能なミクロ行動モデルの構築が必要である。

以上のような問題意識のもと、本研究では、不確実性下でのドライバーのスケジューリングモデルに基づいて時間信頼性価値を推計する方法の提案とその実適用

可能性を検証する。まず、所要時間が出発時刻に応じてランダムに変動する不確実性下でのドライバーの出発時刻選択行動を記述するモデルを構築する。次に、モデルの実適用可能性を検証するため、高速道路の ETC システムから得られた流入時刻 - 所要時間のデータを用いて、理論モデルの実適用に必要な前提条件が成立しているかどうかを検証する。最後に、節約時間価値に対する時間信頼性価値の相対比率を所要時間分布より推計し、ドライバーの総コストの試算を行う。

2. 既存研究のアウトラインと本研究の位置づけ

道路交通における時間信頼性価値の算出を目的としたモデリングの方法は、「平均 - 分散アプローチ」と「スケジューリング・アプローチ」の 2 つに大別される²⁾。

平均 - 分散アプローチでは、ドライバーが被る不効用を所要時間の平均値と、所要時間の標準偏差の線形和で表現している。すなわち、ドライバーは所要時間の長さバラツキをトレードオフ関係として捉えているという解釈に基づくモデル化である³⁾⁻⁵⁾。しかし、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確に示されておらず、そのため、同アプローチから導かれる時間信頼性価値についても、便益計測の理論と整合したものであるかどうかは確かではない。

一方、スケジューリング・アプローチは、到着時刻制約を持つドライバーが所要時間の変動を考慮した期待不効用を最小にするような出発時刻選択を行う、という解釈の下に定式化されている⁶⁾⁻⁸⁾。アウトカムが効用関数の引数として含まれる点は、ミクロ経済理論とも整合している。また、統計分布に関する極めて限定的な条件のもとで、最大化された期待効用が平均 - 分散モデルに等価になることも明らかになっている。しかし、モデルの実適用に当たっては、各ドライバーの希望到着時刻 (Preferred Arrival Time: PAT) のデータ収集が必要であり、また、想定される統計分布 (指数分布) の現実的妥当性についても疑問視されている。

これに対して、近年 Fosgerau & Karlström⁹⁾ 並びに Fosgerau & Fukuda¹⁰⁾ は、スケジューリング - 平均・分散統合アプローチによる新たな定式化を行った。このモデルは、Norland & Small⁸⁾ のアプローチを発展させたものであり、スケジューリング・アプローチタイプの

* キーワーズ: 時間信頼性価値, 所要時間分布, プロジェクト評価

** 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 修 (工) 日本土地建物株式会社

**** 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

ドライバー不効用関数より出発し、任意の所要時間分布のもとでのドライバーの最適化行動の帰結としての間接(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。

しかし、このモデルの実適用の為に幾つかの前提条件が成立する必要がある。既往研究¹⁰⁾では、デンマークのコペンハーゲンにおける所要時間データを用いて前提条件が成立する事を確認している。この統合モデルを我が国の高速道路所要時間データに適用し、モデル実適用の上で必要な前提条件が地域を成立するかどうかを検討し、併せて、所要時間変動に起因するドライバーのコストの試算を行うのが本研究の目的である。

3. トリップ・スケジューリング・モデル

(1) ドライバーの不効用関数

日々の通勤で単一リンクの道路を利用するドライバー(経路選択は考えず、出発時刻選択のみを行う)を想定する。また、一般性を失うことなく、 $PAT = 0$ と仮定する。道路の所要時間は Day-to-Day で確率的に変動し、ドライバーはその不確実性下で出発時刻の決定を行う(確率分布を既知とする)。

ドライバーが被る不効用は「所要時間が変動する事を見越して早く出発する早発不効用」、「希望到着時刻よりも遅く到着する遅着不効用」、「所要時間の長さによる不効用」の3つで構成されるものとする。実旅行時間を T 、ドライバーの出発時刻を $-D (D > 0)$ とすると、その不効用関数は次式で表わされる：

$$C(D, T) = \eta D + \lambda(T - D)^+ + \omega T$$

$$\text{where } (T - D)^+ := \begin{cases} T - D & \text{if } T - D \geq 0 \\ 0 & \text{if } T - D < 0 \end{cases}$$

ここで、 η, λ, ω はコストを構成する各不効用要因の相対的重要度を規定する非負のパラメータである。

出発時刻選択に関する既往研究^{8),11)}とこの定式化との相違点は、早着不効用の代わりに早発不効用を導入している点にあるが、これらはモデルをリ・パラメータライズすることにより等価になることが分かっている²⁾。

(2) 所要時間分布の設定

所要時間 T は日々変動する確率変数と見なすことができる。本研究では、下記のような Location-Scale 型の表記としてこれを表す：

$$T = \mu + \sigma X,$$

ここで、 μ, σ はそれぞれ所要時間分布の位置及び尺度を規定する滑らかな未知関数である。本研究では、 μ を平均所要時間、また、 σ を所要時間の標準偏差によって与える。このとき、確率変数 X の平均は 0、分散は

1 となり、これを“基準化所要時間”と称する。さらに、 X その確率密度関数を ϕ 、分布関数を Φ で表す

(3) ドライバーの行動モデル

所要時間 T が確率的に変動するため、ドライバーは式(1)で表される期待不効用を最小化するように出発時刻 $-D$ を選択するものとする：

$$EC^* = \min_D EC(D, T) \quad (1)$$

$$= \min_D \left[\eta D + \lambda \int_{\frac{D-\mu}{\sigma}}^{\infty} (\mu + \sigma x - D) \phi(x) dx + \omega \mu \right].$$

この関数は大域的に凹であるので⁹⁾、問題(1)は唯一の解を持つ。その解は下記で与えられる：

$$\Phi \left(\frac{D^* - \mu}{\sigma} \right) = 1 - \frac{\eta}{\lambda} \quad (2)$$

ここで $\frac{\eta}{\lambda}$ は“最適遅着確率”(ドライバーが最適化行動をとった際に遅着する確率)と呼ばれる⁶⁾。さらに、式(2)を書き換えると、最適ヘッドスタート D^* が求まる：

$$D^* = \mu + \sigma \Phi^{-1} \left(1 - \frac{\eta}{\lambda} \right).$$

ドライバーの不効用関数は、既往研究¹¹⁾のように PAT を境に折れ曲がった形状となっているものの、最適ヘッドスタートは、 μ と σ に関して線形となっていることが分かる。さらに、この式より、ドライバーが最適状態において見込んでいる所要時間が、

$$\text{平均所要時間} + \text{所要時間の標準偏差} \times \text{基準化所要時間分布の } \left(1 - \frac{\eta}{\lambda}\right) \text{ タイル値}$$

であることが分かる。

以上の関係を図示すると図-1のようになる。

(4) 時間信頼性価値の導出

ドライバーの最小化期待不効用は下記で与えられる：

$$EC^* = (\eta + \omega)\mu + \lambda H \left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda} \right) \sigma. \quad (3)$$

$$\text{where } H \left(\Phi, \frac{\eta}{\lambda} \right) := \int_{1 - \frac{\eta}{\lambda}}^1 \Phi^{-1}(\nu) d\nu.$$

式(3)の第一項は平均所要時間の絶対的な大きさに起因するコストを表わし、 $(\eta + \omega)$ はその限界費、用すなわち節約時間価値(VTT)に相当する。一方、第二項は所要時間のバラツキによるドライバーの不効用であ

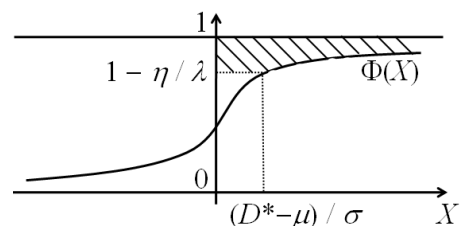


図-1 最適遅着確率と最適ヘッドスタート

り、その限界費用、すなわち時間信頼性価値 ($VTTV$) は $\lambda H(\Phi, \frac{\eta}{\lambda})$ となる。ここで、 H はドライバーの選好 (η, λ) 及び基準化所要時間分布 (Φ) に依存する定数であり、図 - 1 の車線部の面積に相当する。さらに、 EC^* が平均 - 分散モデルの形式をとることも確認できる。

以上の議論に基づき、節約時間価値に対する時間信頼性価値の相対比率 (RR : Reliability Ratio) と節約時間価値 VTT を用いて、ドライバーの総コスト TC を次式で表わすことができる：

$$TC = VTT \times \mu + VTT \times RR \times \sigma, \quad (4)$$

$$\text{where } RR := \frac{VTTV}{VTT} = \frac{\lambda}{\eta + \omega} H(\Phi, \frac{\eta}{\lambda}). \quad (5)$$

4. 所要時間変動に起因するドライバーのコストの試算

(1) データの概要

本研究では、東名高速道路の厚木 IC から流入し、横浜町田 IC から流出する ETC 搭載車両 (普通車) から得られた IC 間の所要時間データを用いる (全長 15.3km)。対象区間中には、大和トンネル及び海老名 SA という有名な 2 つのボトルネックが存在する (図 - 2)。用いるデータは、2007 年 7 月 18 日 ~ 9 月 30 日間の土日祝日 (お盆含む) を除いた平日 6 : 00 ~ 22 : 00 に流入した車両のものである。途中、海老名 SA に立ち寄っていると考えられるデータ等の外れ値を除外し、分析に用いるサンプルは全部で 256,753 件となった。

(2) 平均所要時間及び標準偏差の推計結果

まず、与えられた出発時刻 (流入時刻) に対する平均所要時間並びに所要時間の標準偏差を推計する。具体的には、流入時刻と所要時間のデータセット $\{(t_i, T_i), i = 1, \dots, N\}$ に対してノンパラメトリック・カーネル回帰分析を適用し、平均所要時間の推計値 $\hat{\mu}(t)$ を算出する。次に、各サンプルに対して $(T_i - \hat{\mu}(t_i))^2$ を算出し、これにノンパラメトリック・カーネル回帰分析を適用して得られた推計値の平方根を求めることにより、所要時間の標準偏差 $\hat{\sigma}(t)$ を算出する。なお、バンド幅は



図 - 2 分析対象区間 (厚木 IC 横浜町田 IC)

クロスバリデーション法により求められた 4.77(分) という値を用いている。

適用結果を図 - 3 に示す。また、平均所要時間と標準偏差の相関関係の散布図を図 - 4 に示す。朝の時間帯よりも夕方 18 時前後の時間帯における平均所要時間が大きくなっていることがうかがえる。すなわち、この対象区間においては、朝の通勤ラッシュよりも夕方の帰宅交通やあるいは夕方時に都心方面に向かう交通量が卓越していることが読み取れる。また、正午付近にも小さなピークが存在していることが読み取れる。また、所要時間の標準偏差に関しても、平均とほぼ連動して変動していることが分かる。従来研究¹⁰⁾ 同様、「平均所要時間が大きいときには所要時間の変動 (標準偏差) も大きくなり、逆に、所要時間が小さい時には時間は安定している (i.e. 標準偏差が小さい)」ということがこれらの結果から示唆される。

c

(3) 基準化所要時間の算出と出発時刻独立性の検証

前節で推計した $(\hat{\mu}(t), \hat{\sigma}(t))$ を各サンプルに適用することで、各サンプルの基準化所要時間 X_i を算出することができる。図 - 5 は、与えられた時刻 t に対する基準化所要時間等確率線図 (ノンパラメトリック条件付分布関数) である。バンド幅は Ichimura & Fukuda¹²⁾ が開発した高速アルゴリズムを適用して、出発時刻軸

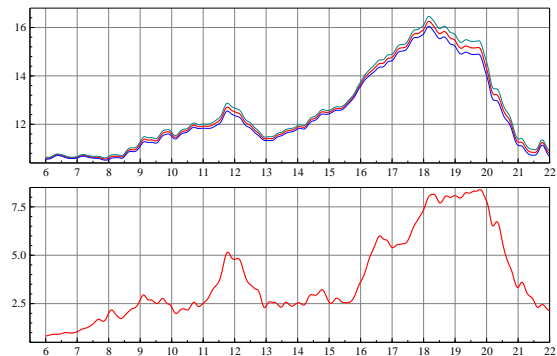


図 - 3 所要時間の平均 (上段) と標準偏差 (下段) のノンパラメトリック回帰分析結果

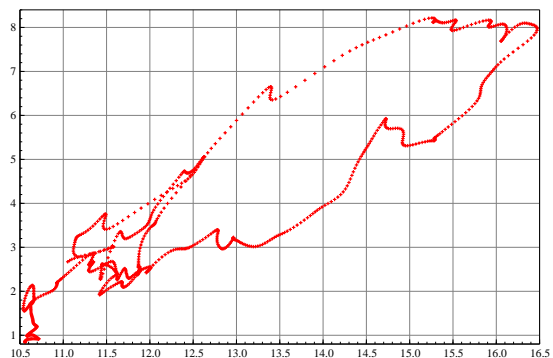


図 - 4 所要時間の平均 (横軸) と標準偏差 (縦軸) の相関関係

方向：0.780(分)，基準化所要時間方向：0.130 という値が適用された．図には 0.1 から 0.9 までの等確率線が併記されている．朝 6 時台や夕方 18-20 時の時間帯など，一部において小さな隆起も見られるが，等確率線は横軸（時刻）に対して概ねならかな並行に近い曲線となっている．したがって，スケジューリング・モデルの導出において大前提となる基準化所要時間分布の時刻独立性の仮定⁹⁾が概ね妥当であることが確認された．

次に基準化所要時間の密度関数をノンパラメトリックに推計した結果を図 - 6 に示す．カーネル関数のバンド幅はクロスバリデーション法によって求められ，0.224 であった．図より，右側の裾が厚い分布形状となっているが，この原因として，生起確率は小さいものの稀に発生する重大インシデント（交通事故や大規模な交通渋滞）の影響が考えられる．これより，実際の基準化所要時間分布は，従来の多くの研究が想定してきた正規分布や指数分布とは形状が大きく異なる分布であることも確認される．

(4) ドライバーのコストの試算

最後に，推計された基準化所要時間分布の情報を用いて RR を試算し，ドライバーのコストを算出する．まず，各スケジューリング・パラメータの値 (η , λ , ω) に関しては，国内における推計事例が存在しないことから，Small¹¹⁾ による推計結果を参照し，(1, 1, 5) という値の組を採用する．次に，この値を式 (5) に代入し，図 - 6 の基準化所要時間の経験分布を用いて数値解析

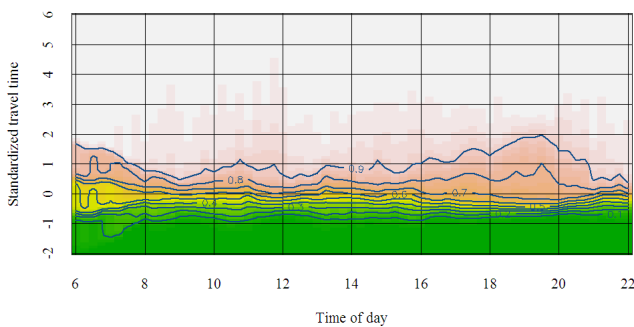


図 - 5 基準化所要時間の条件付き分布（等確率線）

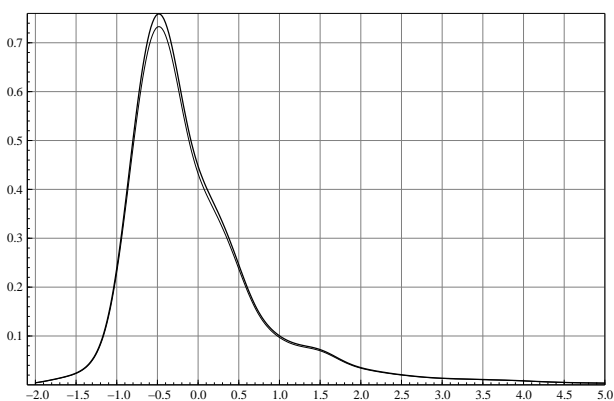


図 - 6 基準化所要時間のノンパラメトリック密度関数

的に RR を算出すると，0.966 という値が求まる．すなわち，所要時間の不確実性が単位時間当たり削減することに対して持つ支払意志額は，今回の適用データに限って言えば，所要時間の絶対的長さが単位時間当たり削減することとほぼ同程度であることが示唆される（無論これは，スケジューリング・パラメータをア priori に与えた上での結論であり，我が国における独自の推計を今後行う必要がある）．

以上の設定値並びに道路の費用便益分析マニュアルにおける VTT の設定値 (=62.86 円/分/台) を式 (4) に適用し，流入時刻別（1 分単位）にドライバーの総コストを試算した結果を図 - 7 に示す．所要時間の不確実性に起因するコスト（赤色）は，所要時間に起因するコスト（青色）に比べ，その絶対的な大きさは小さいことが分かる．しかしながら，そのコストシェアは決して小さくなく，おおよその時間帯において全コスト 1 ~ 2.5 割程度のシェアを占めていることが確認された．

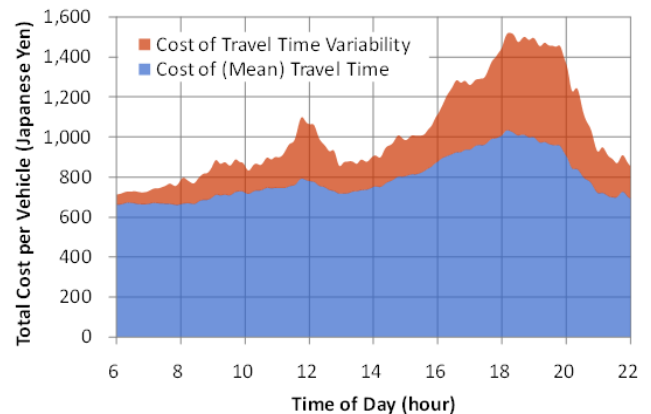


図 - 7 流入時刻別に見た車両一台当たりの総コスト（青：平均所要時間，赤：標準偏差）

参考文献

- 1) SACTRA, Transport and the economy: Full report, Tech. rep., The Standing Advisory Committee for Trunk Road Assessment, Department of Transport, Great Britain (2006).
- 2) M. Fosgerau, K. Hjorth, C. Brems, D. Fukuda, Travel time variability: Definition and valuation, Tech. rep., DTU Transport, Technical University of Denmark (2008).
- 3) K. A. Small, C. Winston, J. Yan, Uncovering the distribution of motorists' preferences for travel time and reliability, *Econometrica* 73 (4) (2005) 1367-1382.
- 4) D. Brownstone, K. Small, Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 39 (4) (2005) 279-293.
- 5) T. C. Lam, K. Small, The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 37 (2-3) (2001) 231-251.
- 6) J. Bates, J. Polak, P. Jones, A. Cook, The valuation of reliability for personal travel, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 37 (2-3) (2001) 191-229.
- 7) R. B. Noland, J. W. Polak, Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues, *Transport Reviews* 22 (1) (2002) 39-54.
- 8) R. B. Noland, K. A. Small, Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes, *Transportation Research Record* 1493 (1995) 150-158.
- 9) M. Fosgerau, A. Karlström, The value of reliability and the distribution of random durations, in: *European Transport Conference*, 2007.
- 10) M. Fosgerau, D. Fukuda, Characteristics of the distribution of travel times on an urban road, in: *European Transport Conference*, Leiden, Netherlands, 2008.
- 11) K. A. Small, The scheduling of consumer activities: work trips, *American Economic Review* 72 (3) (1982) 467-479.
- 12) T. Ichimura, D. Fukuda, Fast algorithm to compute least-squares cross-validation for nonparametric conditional kernel density function, *Computational Statistics and Data Analysis* (under review).