

# 出発時刻選択と旅行時間信頼性\*

## Relationship between travel-time reliability evaluation and departure time choice problem\*

日下部貴彦\*\*・井料隆雅\*\*\*・朝倉康夫\*\*\*

By Takahiko KUSAKABE\*\*・Takamasa IRYO\*\*\*・Yasuo ASAKURA\*\*\*

### 1. はじめに

旅行時間の信頼性は、道路ネットワークのサービスレベルを評価するうえで重要な要素のひとつとなる。近年、ETC(Electric Toll Collection System)や車両検知器のデータから得られる実際の旅行時間観測分布を活用し、Buffer Timeなどの信頼性指標を用いて道路ネットワークの時間信頼性を評価しようという取り組みがみられる<sup>1)</sup>。例えば、北澤ら<sup>2)</sup>は、阪神高速道路の検知器データからタイムスライス法によって旅行時間を算出し、Buffer Time や Buffer Time Indexなどの信頼性評価指標を用いて分析を行っている。山崎ら<sup>3)</sup>は、ETCのゲート通過時刻によって高速道路の区間の旅行時間を算出し、信頼性評価指標を用いて都市間高速道路のサービスレベルを分析している。丸山ら<sup>4)</sup>は、道路管理者の視点から旅行時間信頼性指標をさまざまな施策を統一的に評価可能な指標として位置づけ、首都高速で行われた具体的な施策の評価に用いている。

旅行時間の信頼性指標は、道路サービスの受益者である道路利用者が旅行時間のばらつきによってうける影響を客観的に評価する指標あると考えることができる。したがって、信頼性指標が示している意味を理解するためには、旅行時間の変動に対する道路利用者の交通行動と関連付けて理解することが望まれる。しかし、Buffer time などの既存の信頼性指標について利用者の交通行動と評価指標との関係性は十分に議論されていないのが現状である。

旅行時間の変動性に対する道路利用者の行動は、交通機関選択、経路選択、出発時刻の選択によって成り立っていると考えられる。本研究では、これらのうち、道路利用者の交通行動として出発時刻選択行動に着目する。道路利用者は、到着時刻の制約を満たす出発時刻を

\*キーワード：旅行時間信頼性、出発時刻選択、信頼性指標

\*\*学生員，工修，神戸大学大学院工学研究科

(神戸市灘区六甲台町1-1，

TEL078-803-6360，FAX078-803-6360)

\*\*\*正会員，工博，神戸大学大学院工学研究科

もつ交通機関や経路の中から最適だと考えるものを選択していると考えられるからである。目的地への到着時刻に制約を持っている道路利用者は、出発時刻を適切に選択することで、旅行時間のばらつきによる損失を小さくできる。したがって、このような道路利用者の出発時刻選択行動と、旅行時間の信頼性評価には密接な関係があると考えられる。

本研究の目的は、出発時刻選択行動のモデル解析を通じて、既存の旅行時間信頼性指標が示す意味を明確にし関係性を示すことにある。

本研究の構成は、第2章で、旅行時間選択問題の定式化を行う。第3章で出発時刻選択問題の解析をおこない、旅行時間信頼性指標の関係性を考察する。

### 2. 出発時刻選択行動のモデル分析

本研究では、出発時刻選択行動の定式化に際して道路利用者の行動に対して、以下の3つの仮定を行う。

#### 出発時刻選択行動の仮定

ある時間帯に観測される旅行時間は一定の確率分布で示すことができ、道路利用者が認知している旅行時間分布と一致する。

道路利用者は、道路を利用する時間帯を大きく変更することはない。

道路利用者は、到着時刻に制約をもっており、旅行時間と遅刻や早着に伴う不効用の和を最小化する行動をとる。

本章では、上記の仮定のもと道路利用者の出発時刻選択行動をモデル化し、モデルの分析を行う。

#### (1)旅行時間の分布の定義

本研究では、旅行時間は時間帯ごとに一定の確率分布に従うものとして定義する。ある時間帯 $t$ に観測される旅行時間の分布は、 $T_f < T \leq \infty$ で定義される確率密度関数 $f_i(T)$ に従うとする。ただし、 $T_f$ はフリーフロー時の旅行時間とする。また、 $f_i(T)$ の分布関数を $F_i(T)$

とする。この分布に  $T$  が従う時の平均値を  $\mu_T$ 、標準偏差を  $\sigma_T$  とする。

## (2) 道路利用者の出発時刻選択行動のモデル化

### a) 費用関数の定式化

本研究では、目的地到着時刻に制約のある道路利用者の不効用として、Small<sup>5)</sup>によって定義されたものを用いる。これは、

$$C(T) = \alpha T + \beta \cdot SDE + \gamma \cdot SDL + \theta \cdot D_L \quad \dots \text{式1}$$

$SDE$  : 到着時刻制約に対しての早着時間

$SDL$  : 到着時刻制約に対しての遅刻時間

$D_L$  : 遅刻を示す離散変数

$\alpha$  : 一分あたりの旅行費用 ( $\alpha > 0$ )

$\beta, \gamma$  : 早着・遅刻ともなう一分あたりの費用 ( $\gamma \geq \beta > 0$ )

$\theta$  : 遅刻に伴う離散的な費用 ( $\theta \geq 0$ )

で示す。 $\alpha, \beta, \gamma, \theta$  は、道路利用者の旅行時間と遅刻や早着に対する選好によって決まるパラメータである。

到着時刻制約を  $t_a$ 、選択した出発時刻を  $t_d$  とし、表記を簡単にするために  $T_e = t_a - t_d$  とする。 $SDE$ 、 $SDL$  及び  $D_L$  は、

$$SDE = \begin{cases} T_e - T & T_e \geq T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots \text{式2(a)}$$

$$SDL = \begin{cases} T - T_e & T_e < T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots \text{式2(b)}$$

$$D_L = \begin{cases} 1 & T_e < T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \dots \text{式2(c)}$$

で示すことができる。

式1の二項目は旅行時間に対する不効用を示しており、二項目から四項目までは、到着時刻制約によって生じる不効用を示している。二項目から四項目をまとめて図に示すと、図-1のようになる。図-1は、 $T - T_e \leq 0$  のとき、道路利用者は早着したことを示す。早着した場合、到着時刻から到着時刻制約の間の時間分、出発時刻を遅らせることもできたと考えられることから早く到着するにしたがって、不効用が増えることになる。例えば、通勤の場合を考えれば、早着した道路利用者は到着時刻から始業時刻までの間は、職務に就けず時間を潰す必要があり、その分の時間を家でと過ごしていたほうが効用が高いと考えられる。 $T - T_e > 0$  のときは、遅刻を示している。遅刻した道路利用者は、遅刻によるペナルティ  $\theta$  と、遅刻した時間につれて増加する不効用が生じる。

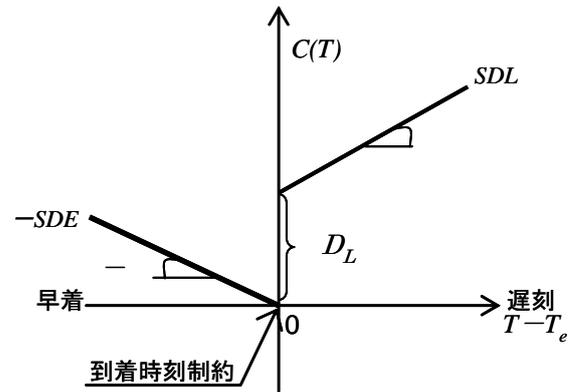


図-1 到着時刻制約による不効用

通勤の場合を考えると、まず始業時刻に遅刻することによって何らかのペナルティが生じ、時間が経つにつれて就業時間が減少して収入の減につながると考えられるためである。

### b) 出発時刻選択行動

ここでは、式1の不効用関数を用いて、初めに示した仮定①②③を満たす出発時刻を求める。

仮定①より時間帯  $t$  の旅行時間は確率分布で示され、仮定②より道路利用者は  $t$  以外の時間帯に出発することはない。すなわち  $t_d \in t$  である。旅行時間は  $f_t(T)$  を確率密度関数として変動する。したがって、 $t_d$  に出発した道路利用者の不効用の期待値は、

$$\begin{aligned} EC &= \int_{T_f}^{\infty} \alpha f(t) dt + \int_{T_f}^{\infty} \beta (T_e - t) f(t) dt \\ &\quad + \int_{T_f}^{\infty} \gamma (t - T_e) f(t) dt + \int_{T_f}^{\infty} \theta f(t) dt \\ &= \alpha \mu_T + \beta \cdot E(SDE) + \gamma \cdot E(SDL) + \theta \cdot P_L \end{aligned} \quad \dots \text{式3}$$

ただし、

$P_L$  : 遅刻する確率であり、 $P_L = 1 - F(T_e)$

$E(SDE)$  :  $SDE$  の期待値

$E(SDL)$  :  $SDL$  の期待値

と示すことができる。仮定③より道路利用者は不効用の期待値を最小化しようとすることから、

$$EC^* = \min_{T_e} EC \quad \dots \text{式4}$$

になるような  $T_e$  を選択する。このときの  $T_e$  を  $T_e^*$  とする。 $EC$  は、 $T$  が  $T_f < T \leq \infty$  で連続で下に凸な関数である場合<sup>1)</sup>には、

$$\frac{dEC}{dT_e} = -\gamma + (\beta + \gamma) \cdot F(T_e^*) - \theta \cdot f(T_e^*) = 0 \quad \dots \text{式5}$$

の解となる。このとき道路利用者は、出発時刻として  $t_d^* = t_a - T_e^*$  を選択する。

1  $T$  が  $T_j < T \leq \infty$  で定義される場合であっても

$$\frac{\beta}{\theta} < f(T_e) \quad \text{for } \forall T_e \text{ となる場合に } EC \text{ は下に凸にはならず,}$$

$$T_e^* = \infty \text{ となる.}$$

### 3. 出発時刻選択行動と旅行時間信頼性

前章で示した  $T_e^*$  が  $T_e^* > \mu_T$  であるとき、道路利用者は、到着時刻制約に遅れるリスクを小さくするために、期待旅行時間  $\mu_T$  より大きな旅行時間を見積もって行動していると考えられる。このとき、 $T_e^* - \mu_T$  は、Hall<sup>6)</sup>が定義しているセーフティマージン(Safety Margin)と一致する。また、 $T_e^*$  は、有効旅行時間(Effective Travel Time)と呼ばれているものとなる。旅行時間にばらつきがない場合、 $T_e^* - \mu_T = 0$  であることは式3より明らかであるから、セーフティマージンは旅行時間のばらつきを反映し、旅行時間の信頼性を示すものの一つである。本章では、有効旅行時間とセーフティマージンに着目し、旅行時間信頼性との関係を示す。

#### (1) 有効旅行時間の性質

Buffer Timeなどの既存の旅行時間評価指標では、旅行時間のパーセンタイル値を用いて信頼性を評価することが多い。そこで、まず有効旅行時間が旅行時間分布の何パーセンタイル値に相当するかを示す。

$p \times 100\%$  タイル値は、 $p = F_i(T)$  となるときの  $T$  である。このことから、式5に着目し  $\theta = 0$  のときを考えると、有効旅行時間は、

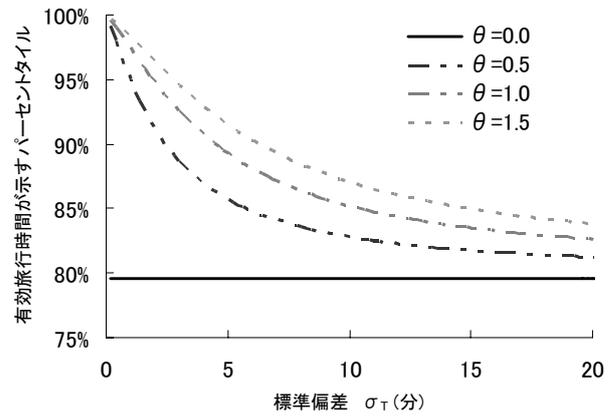
$$p^* = F_i(T_e^*) = \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \quad \dots \text{式7}$$

を満たす  $p^* \times 100$  パーセンタイル値となる。したがって、 $\theta = 0$  のとき、有効旅行時間は、旅行時間の分布形に関係なく  $p^* \times 100$  パーセンタイル値で示されることがわかる。

次に、 $\theta > 0$  の場合を考えると、

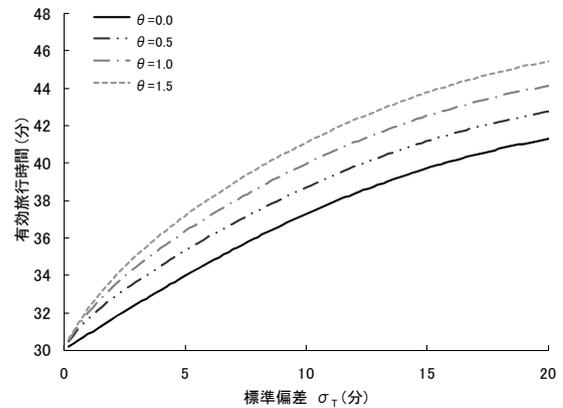
$$p^* = F_i(T_e^*) = \frac{1}{\beta + \gamma} (\gamma + \theta \cdot f(T_e^*)) \quad \dots \text{式8}$$

となることから  $p^*$  は旅行時間の分布系に依存して決まり、 $\beta$  と  $\gamma$  が同じ値をとるのであれば必ず  $\theta = 0$  の場合より大きな値をとる。図-2に旅行時間の分布関数として対数正規分布を仮定した場合の  $\sigma_T$  と  $p^*$  と  $\theta$  の関係を示し、図-3に  $\sigma_T$  と  $T_e^*$  と  $\theta$  を示す。



$\alpha = 0.106$  (1分),  $\beta = 0.065$  (1分),  $\gamma = 0.254$  (1分) で計算している。分布関数は対数正規分布とし、 $\mu_T = 30$  (分),  $T_j = 0$  (分) とした。

図-2 有効旅行時間のパーセンタイル



$\alpha, \beta, \gamma$  及び  $\mu_T, T_j$  の値は図-2と同じ。

図-3 有効旅行時間

図-2からも  $\theta > 0$  のときの  $p^*$  は  $\theta = 0$  のときの値より大きくなることが確認できる。また、対数正規分布を仮定した場合  $p^*$  が  $\sigma_T$  が大きくなるにつれて小さくなる傾向があることもわかる。図-3から  $T_e^*$  も、 $\theta > 0$  のときには、 $\theta = 0$  のときの値より大きくなるのがわかる。一方、 $\sigma_T$  が大きくなるにつれて  $T_e^*$  は大きくなることを確認できる。また、 $\sigma_T$  が1分程度の時、 $\theta > 0$  の  $p^*$  は100%タイル近くになっており  $\theta = 0$  のときの  $p^*$  と比べると差が大きくなっている。ただし、 $T_e^*$  の差は、1~2分程度と微小であり、 $\sigma_T$  が大きくなっても  $T_e^*$  の差は5分程度のまま推移していることがわかる。

#### (2) セーフティマージンとBuffer Time

##### a) $\theta = 0$ の場合

前節の分析より結果を用いると、 $\theta = 0$  のときのセーフティマージンは、旅行時間の分布形に依らず、

$$SM = \left( \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \times 100\% \text{ タイル値} \right) - \mu_T \quad \dots \text{式9}$$

として示すことができる。一方で、旅行時間信頼性指標の一つであるBuffer Timeの定義は、

$$BT = (p \times 100\% \text{ タイル値}) - \mu_T \quad \dots \text{式10}$$

である。このことから、Buffer Timeは、 $\theta = 0$  であつ、 $\beta$  と  $\gamma$  の関係が、

$$\gamma = \frac{p}{1-p} \beta \quad \dots \text{式11}$$

である道路利用者のセーフティマージンを評価していることになる。

Buffer Timeでは、95%タイル値をもって評価することが多いが、これは式11より  $\beta$  と  $\gamma$  の関係が、

$$\gamma = \frac{p}{1-p} \beta = \frac{0.95}{1-0.95} \beta = 19\beta \quad \dots \text{式12}$$

である道路利用者のセーフティマージンを評価していることと同義であることがわかる。

#### b) $\theta > 0$ の場合

$\theta > 0$  の道路利用者を考えると、式8で  $p^*$  が分布形によって異なってくることから、一定のパーセンタイルに固定して算出したBuffer Timeでは、道路利用者のセーフティマージンを正確には評価できないことがわかる。この場合、式11で求められる  $p^*$  を用いてBuffer Timeを算出し、道路利用者はそのBuffer Timeよりも大きなセーフティマージンを必要としていると解釈する方法と、観測された旅行時間分布毎に適切なパーセンタイルを求め、その  $p^*$  とBuffer Timeの双方で評価して解釈する方法が考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、旅行時間の信頼性指標を、旅行時間のばらつきを単純に示す指標ではなく、「道路利用者にとっての旅行時間のばらつきによる影響を道路管理者の側から客観的に評価する指標である」という位置づけのもと、道路利用者の出発時刻選択行動への旅行時間のばらつきによる影響を分析した。この分析を通じて、既存の信頼性指標であるBuffer Timeと道路利用者のセーフティマージンを関連付けることができた。また、Buffer Timeに用いられるパーセンタイル値は、道路利用者の到着時刻制約に対する選好によって決まることが示された。したがって、旅行時間の信頼性をBuffer Timeを用

いて評価する場合には、

どのような利用者を対象として指標を算出するかを決める。

利用者の到着時刻制約に対する選好を調査し、評価に用いるパーセンタイルを決定する。

観測によって得られた旅行時間を評価する。

というプロセスで行うことが望ましいといえる。これによって、想定する道路利用者のセーフティマージンをBuffer Timeを用いて評価できる。

本研究の分析では、旅行時間分布関数に単純な対数正規分布を用い、道路利用者が認知している旅行時間分布もこれに一致していると仮定したが、旅行時間分布がどのような分布をとるのかということや認知分布がどのように形成されるのかについても、出発時刻選択行動を理解の上である。また、本研究では目的地到着時刻に制約のある道路利用者のセーフティマージンと不効用の関係も分析をしていない。今後、この関係についても分析をすることで、旅行時間信頼性指標に対する理解が増すものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) Lomax T., Schrank D., Turner S. & Margiotta R., Selecting Travel Reliability Measures, <http://tti.tamu.edu/documents/474360-1.pdf>, 2003.
- 2) 北澤俊彦・田名部淳・朝倉康夫：阪神高速道路における所要時間の信頼性に関する評価、高速道路と自動車, Vol.50, No.5, pp.37-40, 2007.
- 3) 山崎浩気・嶋本寛・宇野伸宏・倉内文孝・小笹浩司・成田博：ETC データを用いた都市間高速道路の旅行時間信頼性指標についての一考察、土木計画学研究・講演集, Vol.36, 2007.
- 4) 丸山俊明・田畑大・岡田知朗・割田博：所要時間信頼性評価による ITS 等導入効果の検証手法に関する研究、第 6 回 ITS シンポジウム 2007 Proceedings, pp.361-366, 2007.
- 5) Small K.A.: The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips. American Economic Review, Vol. 72, pp.467-479, 1982.
- 6) Hall, R.W.: Travel outcome and performance the effect of uncertainty on accessibility, Transportation Research, Vol.17B, pp.275-290, 1983.