ETCデータを用いた都市間高速道路の旅行時間信頼性評価に関する研究*

A Study of Travel Time Reliability Evaluation for Inter-city Expressway Using ETC Data *

山崎 浩気†・宇野 伸宏‡・倉内 文孝§・嶋本 寛**・小笹 浩司††・成田 博††

By Hiroki YAMAZAKI†・Nobuhiro UNO‡・Fumitaka KURAUCHI§

Hiroshi SHIMAMOTO**・Koushi OZASA††・Hiroshi NARITA††

1. はじめに

我が国は成熟社会を迎えつつあり、道路交通に対しても、より高い水準のサービスの提供が求められてきている。したがって、高速道路に対してもただ単に旅行時間が短縮されるだけでなく、常にある時間の範囲内で目的地に確実に到達できるという、安定的な道路サービス提供が求められている。提供される交通サービスの質を、単に旅行時間の平均値・最大値・最小値等によってのみ評価するのでは十分とはいえず、現実性、信頼性の観点からも評価することが必要である。

交通ネットワークの信頼性に関する分析は、災害発生時などの日々の知識が通用しないような状況に関する評価の側面¹⁾²⁾と、日々の需要変動や些細な突発事象の影響など日常的に生じうる事象に関する評価の側面に分類される。前者は、非日常的な状況を指しており、ネットワークにおいて想定外の事象が発生したことを前提とするケースであり、ネットワークの構成要素が機能低下した際にそれが機能するかどうかを評価するのが基本的な概念である。後者は、日々の需要変動や天候などの外的要因などによって引き起こされる、交通サービスレベルの変動に着目している。このような日常的に生じうる旅行時間の変動を評価することも交通ネットワーク信頼性解析の重要な事項である。

このうち旅行時間信頼性 (travel time reliability)¹⁾は、道路上の旅行時間を分布的に取り扱うことでその信頼性を評価するものであり、「ある時間までに目的地に到達できる確率」と定義される。道路網の時間信頼性は平常時における安定した信頼性のある道路サービスの提供が重要であることから、平常時における旅行時間の信頼性を指標化する研究が多くなされている。

朝倉ら³⁾の研究では、道路網を構成する一部のリンクの交通量観測データから観測されていないリンクを含め

たすべてのリンクの交通量を推計する静的モデルを開発し、さらに、リンク交通量の日々の変動が推計されていることを前提に道路網の時間信頼性指標値を求める方法を示している。宇野ら⁴⁾はバスプローブデータを用いた所要時間信頼性評価手法の構築をおこなっている。それにより、今までの車両検知器を用いた地点計測に基づく信頼性評価ではなく、実証的なデータに基づく所要時間信頼性評価が可能となったといえる。旅行時間信頼性指標は経路ごとに定義される⁵⁾ものであり、それをODレベルあるいはネットワーク全体へ拡大するための方法論についてはまだ確立されていないため、さまざまな行動仮定を置く必要がある。また、道路ネットワークの信頼性を評価するための指標としては適切であるものの、旅行時間の分布形を導出するためには長期間にわたるデータ観測が必要であるという問題点を含んでいる。

本研究では上記の問題点に対して、近年飛躍的に増加したETC (Electronic Toll Collection) 搭載車の流入・流出時刻から得られるIC間の旅行時間データを活用することを考える。そして、ここで得られた旅行時間データを活用して旅行時間信頼性評価手法を構築し、2006年度1年間のデータを用いて既存の高速道路ネットワークが提供する交通サービスの質を、旅行時間信頼性の観点から実証的に分析することを試みる。ETCデータを用いる理由として、実質旅行時間を用いて分析が可能である点が挙げられる。車両検知器を用いて算出する旅行時間は、点観測データから区間の旅行時間を推定したものであり、IC間で実際におこなわれた大量の旅行時間が記録されたETCデータを用いた解析の方が、精度が高くなることが期待される。

道路管理者の立場から思案すると、交通サービスに対しても細かなマーケティング戦略をおこない、利用者の動向を把握しておかないと適切なマネジメント手法を提案することができないと考えられる。そのため、実証データを利用して交通サービスの質を評価する機運は確実に高まっており、実証データを活用した旅行時間信頼性からみた適切な高速道路ネットワーク評価へとつながる研究としてその意義は少なくない。また、本研究では、従来定性的に議論されてきた道路ネットワークの定時性や現実性を、旅行時間信頼性評価指標によって定量化することを目指しており、その改善に向けた道路ネットワ

*キーワード: サービス水準, ITS, 交通管理

†: 学生員, 修 (工), 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540, 京都市西京区京都大学桂, TEL:075-383-3237, FAX:075-383-3236, yamazaki@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp)

‡: 正会員, 博 (工), 京都大学大学院経営管理研究部

§: 正会員, 博 (工), 岐阜大学工学部

** : 正会員, 博 (工), 広島大学大学院国際協力研究科

††: 西日本高速道路(株) 関西支社

ーク構築へ有用な知見をもたらし得るものとする。

2. 分析対象データ

(1) 分析対象ネットワーク

分析対象ネットワークは、名神高速道路八日市IC～名神吹田IC間とする(図-1)。ここでは、旅行時間の信頼性の観点から、交通サービスの質を比較分析する。サービスレベルが区間や時間帯によって明確に変動する状況の方が望ましいと考え、本線渋滞の影響が顕著である西向きの交通を対象とする。このとき、隣接ICペア間を一つの分析単位として細分化して解析をおこなうと観測される旅行時間の存在範囲が小さくなり、十分な階級での旅行時間分布を得ることができなくなるため、距離が同程度であり、なおかつETC搭載車のデータを多く確保できる八日市→栗東IC、栗東→京都南ICおよび京都南→名神吹田ICを発着点とするトリップを対象としている。

(2) ETC データに含まれる情報

ETCデータからは、利用車両の車種、入口、出口のIC、日付、流入時刻、流出時刻、そして適用された割引の種類などを知ることができる。個人情報保護の観点から、車両・個人の特定につながる情報はETCのデータベースからは抽出されていない。このうち、特定の入口、出口を利用した車両の流入時刻、流出時刻から旅行時間を算出し集計することで、旅行時間信頼性の評価に利用するための旅行時間の分布に関する情報を得ることとする。したがって、本研究で定義する旅行時間は本線上の走行時間だけでなくIC内走行時間も含んでいることになる。

(3) 分析対象期間とデータ数

分析に用いるデータは、2006年1月1日から同12月31日の間にNEXCO管内の料金所で料金収受をおこなったETC車のデータであり、車両の入口・出口ICの通過時刻を用いて算出したIC間旅行時間である。この条件の下では、八日市→名神吹田(両方向、京滋バイパスを含む)を起終点とするETCデータはおおよそ2300万サンプル存在した。その中で、分析対象IC間におけるETC車の利用台数は表-1に示す通りであり、本研究ではおおよそ8.7%のデータを用いて分析をおこなっている。

3. 旅行時間信頼性分析のためのETCデータ集計方法

本研究では、平常状態で提供される交通サービスの質を、旅行時間の変動に基づき分析評価する。事故等の

図-1 対象ネットワーク

表-1 対象IC間のデータ数および距離

IC ペア	八日市→栗東	栗東→京都南	京都南→吹田
データ数	148,256	424,441	1,460,125
距離	23.7km	29.6km	27.1km

突発事象の影響を含めて議論することも可能ではあるが、車線閉塞をとまなう事象においては、事前に交通情報掲示板等で情報を手に入れて、経路変更や早発などの通常とは異なる行動をとる可能性があるため、「平均的」な利用者行動であるとは言い難い。そこで、交通集中にともなう渋滞事象については分析対象に含めるが、車線閉塞をとまなう比較的重大な事象については除去して分析を進める。旅行時間の変動を的確に捉えるため、ETCデータの集計時間単位を設定し、集計時間単位ごとの代表値を算出し、その分布を旅行時間信頼性の分析に用いることとする。以下では、ETCデータから旅行時間に関わる分布情報を得るための集計方法について述べる。なお、旅行時間算出は流入時刻ベースでおこなうこととする。

(1) 突発事象データの除去

本研究の分析対象外である車線閉塞をとまなう事故・工事事象の影響を受ける範囲を事象データの「渋滞開始時刻」、「渋滞終了時刻」、「最大渋滞長」を用いて設定する。事象データに最大渋滞時刻は記載されていないため、本研究では最大渋滞時刻を渋滞開始時刻と渋滞終了時刻の間であると仮定した(図-2 参照)。図の三角形の中に対象IC位置が含まれている場合に、突発事象影響を受けた範囲として、15分間の全走行データを除去することとした。この基準にもとづく突発事象時データは、ICペアによって異なるが、原データのおおよそ1~2%の旅行時間データが該当した。

図-2 本研究で設定する事故・工事事象の影響範囲

(2) 外れ値データの抽出

a) 全時間帯計での外れ値データの抽出基準

車線閉塞をとまなう事故・渋滞の影響を受けない状況においても、同一時間帯の他の走行車両と比較して旅行時間が明らかに大きいデータが存在した。これらはSA、PAでの休憩時間がETCによる旅行時間に含まれた可能性が高いと考えられる。これらのデータも含めて旅行時間信頼性について分析すれば、旅行時間が過大評価となる可能性がある。現時点で得られたデータでは、軽微な事故までは確認できず、それらを明示的に分析対象データから除去することは不可能であるため、統計的な処理をおこなうこととする。具体的には、全原データでの旅行時間の平均値 μ 、標準偏差 σ を用いて、これらの外れ値を統計的に除去した。また、外れ値の範囲の設定方法による抽出結果の違いについても分析する。なお、ICペアによって旅行時間の平均値、標準偏差や道路区間特性が異なるため、外れ値の判定はICペアごとにおこなう。

ここでは、京都南IC→吹田IC間の2006年3月データを例に外れ値データの抽出方法および結果について説明する。京都南→吹田間の全原データの旅行時間の平均 μ 、標準偏差 σ は以下の通りである。

$$\mu = 24.7 \text{ [分]}, \sigma = 22.8 \text{ [分]}$$

原データの旅行時間分布のうち、 $\mu + \sigma$ であれば48分以上のサンプルが、 $\mu + 2\sigma$ であれば71分以上のサンプルが外れ値として除去されることとなる(図-3)。当該区間においては、下限値による外れ値は存在しない。原データのうち、全時間帯で $\mu + \sigma$ の上限値を設定した場合4.4%、 $\mu + 2\sigma$ の上限値を設定した場合1.5%の旅行時間データを、車線閉塞をとまなわない軽微な事故および休憩の影響があった車両である可能性が高いものとみなし除去する。

b) 時間帯ごと外れ値データの抽出基準

上述の内容は、分析対象期間全体で共通の外れ値の除去基準を設けたものである。以下では1日の内の時間帯によって利用車両の特性が異なることを考慮して、時

図-3 原データの分布と外れ値範囲(京都南→吹田)(メジアン; 20分)

図-4 外れ値除去後の上限旅行時間比較(京都南→吹田)

表-2 IC別外れ値の除去基準と除去割合(2006.3)

		八日市 →栗東	栗東 →京都南	京都南 →吹田
除去基準	全データ	13,045	37,887	132,722
一括 $\mu \pm 2\sigma$	除去データ	241	647	2,010
	除去割合 (%)	1.85	1.71	1.51
一括 $\mu \pm \sigma$	除去データ	502	2,938	5,821
	除去割合 (%)	3.85	7.75	4.39

間帯ごとに除去基準を設けることを考える。1時間ごとの旅行時間の平均 μ_h 、標準偏差 σ_h を算出して $\mu_h + 2\sigma_h$ 以上離れたデータを外れ値として除去する。図-4は京都南→吹田間の2006年3月データを例として、上記の方法により正常と判定されたデータ(外れ値ではないデータ)の旅行時間の上限値を示す。棒グラフは時間帯ごとに算出した上限値であり、横線は全時間帯共通の基準で算出した上限値(70.3分)である。これを見ると、時間帯別に算出した方が、上限値が小さくなる時間帯もあるが、逆に上限値が非常に大きくなっている時間帯もあることがわかる。時間帯ごとに外れ値抽出基準を設定すると、京都南→吹田間の27.1km区間においては、2台台のように2時間以上の旅行時間を要した車両であっても

外れ値として抽出されないという時間帯も存在した。時間帯ごとに除去基準を設けることについては、その時間帯における休憩した車両と通常走行車両の割合が大きく影響を及ぼすと考えられる。現状において、休憩施設を利用した車両の割合はデータとして入手できていないため、ここでは、先に述べた全時間帯共通の基準で外れ値を除去する方法を適用する。

c) 外れ値除去基準 σ の設定

全時間帯のデータから一括に外れ値を判定するとし、判定基準を $\mu \pm 2\sigma$ から $\mu \pm \sigma$ に変更することによる影響を分析した。図-3の京都南→吹田間の外れ値の除去基準とその閾値を見ると、除去基準を $\mu \pm 2\sigma$ と設定した場合、除去基準の閾値は分布のメジアン（中央値）の3.5倍であった。除去基準を $\mu \pm \sigma$ と設定した場合、外れ値の判別閾値はメジアンのおよそ2.5倍となっている。表-2は対象IC別の除去基準と外れ値として除去されるデータの割合を示したものである。 $\mu \pm 2\sigma$ を除去基準とした場合、すべてのICペアで2%弱しか削除されておらず、また $\mu \pm \sigma$ を除去基準とした場合は除去される割合は最大でも7%程度であることがわかる。外れ値データの抽出基準については、今後さらに検討を加える必要があるが、本分析では時間帯ごとの抽出での上限旅行時間のバラツキを考慮し、全時間帯一括のデータから平均 μ と標準偏差 σ を算出し、 $\mu \pm \sigma$ より外側のデータを除去した上で分析をおこなうこととする。この理由として、 $\mu \pm 2\sigma$ では27.1kmの区間距離に対して、旅行時間70分のデータまでを許容することになるが、都市間高速道路の交通集中渋滞で時速30kmを下回することは考えにくいことがあげられる。

上記の外れ値除去方法をおこなっても休憩車両を十分に取りきれていない可能性は否定できない。そこで、集計時間単位ごとの代表値を用いて分析することで、個々車両の影響についてはなるべく小さくする。

(3) 旅行時間分布の作成方法

a) 代表値による分布形状の違い

平常時の交通状態において、旅行時間がばらつく主な要因としては、交通需要の増減にともなう速度変化と個別車両間の車両性能や運転特性の差異の2つをあげることができる。本研究では、旅行時間信頼性の観点から交通サービスの質を分析し、その結果を道路交通のマネジメントに活用することを企図している。そのため、「平均的な」利用者が享受すると考えられるサービスの質を評価することを目的とし、ここでは後者は考慮に入れないこととする。したがって、個々の車両データを直接用いて旅行時間の変動を捉えるのではなく、ある集計時間単位ごとの旅行時間代表値（平均、モード、メジアン）を算出し、その分布形に関する情報に基づき評価をおこなう。対象ICペアにおける旅行時間の代表値ごと

図-5 個別車両データの旅行時間分布と代表値分布
(京都南→吹田, 06年3月)

図-6 5分平均旅行時間の推移(京都南→吹田, 06年3月)

図-7 15分平均旅行時間の推移(京都南→吹田, 06年3月)

の分布形状の違いを図-5に示す。原データから外れ値のみを排除した個別車両データを用いて旅行時間分布を描くと、旅行時間が20分の付近に多くのサンプルが集中しつつ、少数ではあるが旅行時間が非常に大きい範囲にもサンプルが存在する裾野が長い形状となる。集計時間帯15分ごとに旅行時間のモード（最頻値）、メジアン（中央値）を算出して分布を描くと、個別車両データの分布と比較して、より短い旅行時間の範囲に多くのサンプルが集中する尖った形状となることがわかる。一方、旅行時間平均値の存在範囲は個別車両データの旅行時間による分布の右側の裾野の存在範囲を相当程度カバーできている。また、平均旅行時間の分布は、サンプル数が多くなると中心極限定理により統計的扱いが有利となるため、本研究では集計時間帯ごとの平均旅行時間分布に

より、信頼性分析をおこなうこととする。

b) データ集計時間帯の設定

旅行時間の平均値を算出するための集計時間帯の大きさを短く設定すれば、対象時間帯内の該当 ETC データ数が少なくなり、算出される平均値が実際のサービスレベルを反映しない偏った値になる可能性があると考えられる。ここでは、集計時間帯の幅と平均旅行時間のばらつきの関係について検証し、本研究における集計時間単位を決定する。図-6、図-7 は、京都南→吹田間 2006 年 3 月データを例として、それぞれ集計時間帯の幅を 5 分、15 分としたときの平均旅行時間を示したものである。これを見ると、集計時間単位が 5 分のときは平均旅行時間の最小値がおおよそ 20 分に対して、30 分以上となる集計時間帯も多く、集計時間帯内での平均旅行時間のばらつきも非常に大きい。集計時間単位を 15 分とすると多くの時間帯で平均旅行時間が 30 分以下であり、平均旅行時間のばらつきもかなり小さくなるが見てとれる。実際の走行距離を考慮すると、5 分単位の旅行時間の平均値は、実情より過大となるケースがあると考えられる。また、集計時間単位 5 分では IC ペアによっては、各集計時間帯に含まれるサンプル数が極端に小さくなる場合も見受けられた。

一方、集計時間帯の幅を大きくすると旅行時間の平均値のばらつきは小さくなるが、短時間における交通需要の増減による交通サービスレベルの変化を十分に捉えきれない可能性も考えられる。他の IC ペア間でも同様の傾向を示しており、これらを総合的に鑑み、本研究では集計単位時間を 15 分とし、その平均旅行時間でもって旅行時間信頼性を評価するものとする。

4. IC ペア間の旅行時間信頼性評価

(1) 時間帯の分割

前章で述べた ETC データの集計方法を実際に適用して、2006 年 3 月データを例として八日市 IC→栗東 IC 間、栗東 IC→京都南 IC 間、および京都南 IC→吹田 IC 間の 3 区間の交通サービスレベルを旅行時間信頼性の観点から分析する。ここでは、時間帯による交通サービスレベルの差異についても分析するため、以下の 4 時間帯ごとに旅行時間の平均値の分布を構成する。すなわち、朝時間帯は 6:00～9:59、昼時間帯は 10:00～16:59、夕方・夜時間帯は 17:00～20:59、そして深夜・早朝時間帯は 21:00～5:59 とした。

図-8、図-9 および図-10 は、各々八日市→栗東間、栗東→京都南間および京都南→吹田間の旅行時間の 15 分ごとの平均値の累積分布を示したものである。最初に上記 3 区間に共通の特徴についてまとめてみると、全区間ともに朝 (6:00～9:59) と深夜・早朝 (21:00～5:59) の旅行時間の平均値の累積分布の形状は類似しており、

図-8 時間帯毎の旅行時間の平均値分布(八日市→栗東)

図-9 時間帯毎の旅行時間の平均値分布(栗東→京都南)

図-10 時間帯毎の旅行時間の平均値分布(京都南→吹田)

かつ他の時間帯よりも相対的に左側に分布が位置しており、旅行時間が全般的に小さくかつ変動も小さいことが分かる。一方、昼時間帯 (10:00～16:59) の分布は右側に位置しており、かつ累積分布の傾きが緩やかであることから、昼時間帯の旅行時間の変動は大きく、旅行時間信頼性は相対的に低いといえる。以上より、時間帯により提供される交通サービスの質は異なり、とりわけ朝時間帯 (6:00～9:59) ならびに深夜・早朝時間帯 (21:00～5:59) の旅行時間信頼性は高い水準にあるといえる。

(2) 旅行時間信頼性から見た区間特性分析

次に 3 つの分析対象区間のサービス特性について考察する。4 つの時間帯の分布の乖離が最も小さいのは八日市→栗東間と考えられ、時間帯ごとのサービスレベルの差異は小さいといえる。栗東→京都南間は、他の区間

と比べてとりわけ昼時間帯の累積分布の傾きが緩やかである。言い換えれば、他の区間より昼時間帯の旅行時間信頼性は低いと考えられる。京都南→吹田間の分布に着目すると、朝および深夜・早朝時間帯の累積分布の傾きが他の区間と比較して急であり、旅行時間の点で安定した交通サービスが提供されていることがうかがえる。当該区間は3車線もしくは2車線+2車線の4車線の区間であり、利用交通も多い一方で他の区間より大きな交通容量が付与されているため、このような差異が生じたと考えられる。夕方・夜の時間帯では、累積確率が50%までの分布形状は他の区間の同時時間帯の形状と類似している。一方、50%を超えると分布の傾きが急激に緩やかになっており、著しい混雑のため、旅行時間の変動が顕著に生じ、旅行時間の信頼性が大きく低下する区間であるとも考えられる。以上より、区間により提供される交通サービスの特性は異なることがわかった。また、混雑が比較的激しくない時間帯の旅行時間分布を比較すると、

多車線である京都南→吹田間が他の区間と比較して累積頻度分布の傾きが大きく、旅行時間が狭い範囲に集中する分布形状となっており、旅行時間が安定する傾向にあることから、車線数と旅行時間信頼性の間に何らかの関係性があることが推察される。

(3) 旅行時間分布の季節変動

旅行時間の年間を通じての変動を分析するため、主要ICペア間の平均旅行時間累積分布を作成した。ここでは、京都南→吹田間について考察を加える。図-11より、夕方・夜時間帯(17:00~20:59)以外の分布形状は、1年間を通してほぼ同程度であり、旅行時間信頼性は非常に高いといえる。その一方、夕方・夜時間帯においては、1年間のサービスレベルにバラツキが存在し、特に、3月、8月、11月、12月において特異な分布形状を取っていることがわかる。この様な相違が生じた原因としては、経済活動、観光行動にともなう交通需要の変動特性

図-11 旅行時間累積頻度分布 (京都南→吹田間)

が影響を及ぼした可能性が考えられる。夕方・夜時間帯の平均旅行時間のばらつきが小さいと考えられる。1月・2月・4月・5月および6月は、90%タイル値まで昼時間帯の累積分布形状と差異がみられない月である。これは、夕方・夜時間帯の中でも比較的信頼性がよいと判断できる月であり、95%タイル値より上の分布形状に差異があるものの大半の利用者が一定のサービスレベルを享受できているとみなすことができる。中でも、6月は4つの時間帯のサービスレベルに大きな差異がみられない一番旅行時間信頼性の高い月と推察される。

夕方・夜時間帯の平均旅行時間のばらつきが大きな月はその分布形状から、再度2つに分類できる。1つ目は、7月・8月・9月および12月のように50%タイル値までは昼時間帯の累積分布形状と差異がみられない月である。これらの月は、ある特定の日あるいは時間帯において平均旅行時間が大きくなる状況があるといえる。その中でも、8月と12月の平均旅行時間は極端に長いものが多く、盆休みあるいは正月休みの影響がうかがい知れる。2つ目は、3月・10月および11月のように他の時間帯よりも夕方・夜時間帯が極端にバラけた分布をとる月である。これらの月は、日あるいは時刻によって混雑の程度が異なるものの当該時間帯に継続的な渋滞が頻発する状況にあり、比較的高頻度で渋滞が発生しているものと推察される。今後車両検知器データなどで当該月の渋滞が頻発する曜日、時間帯について検証する必要がある。

これらの累積分布形状から考察できる定性的な評価を次章では、旅行時間信頼性指標でもって定量化して分析をおこなうこととする。

5. 旅行時間信頼性指標による評価

(1) 信頼性評価指標の整理

既往の旅行時間信頼性指標の特徴を表-3にまとめておく⁶⁾。本研究では、集計時間単位15分ごとの平均旅行時間を算出しているため、15分間平均旅行時間の平均値を T_{ave} 、15分間平均旅行時間の95%タイル値を T_{95} と表す。本稿では、 T_{ave} を月別・時間帯別のETCデータから算出される平均旅行時間、 T_{min} を1年間の15分間平均旅行時間のうち最短であるものとした。図-12に2006年3月の京都市南→吹田間の平均旅行時間の累積頻度分布を描き、既往の信頼性評価指標算定結果を示す。このように $PTI=1.72$ 、 $BTI=0.30$ と算出される区間であれば、自由流旅行時間の1.72倍、平均旅行時間の1.3倍の旅行時間を要する可能性を考慮しておけば、ほぼ確実に(95パーセントの確率で)到着できるといえる。BTIは区間の平均旅行時間により正規化しているが、多くの場合旅行時間の大きい区間では平均旅行時間も大きくなるため、BTIは相対的に小さな値となってしまう。そこ

で、平均旅行時間 T_{ave} 、Buffer Time(BT)をそれぞれ区間距離によって正規化した以下のような指標を考える。

$$T_{ave}/Dist = T_{ave}/L \text{ [分/km]} \quad (1)$$

$$BT/Dist = (T_{95}-T_{ave})/L \text{ [分/km]} \quad (2)$$

評価指標を区間距離により正規化したことで、異なる分析対象区間同士の比較が直接的に可能となる。

(2) 旅行時間信頼性指標の比較

旅行時間変動特性が時間帯ごとに大きく異なる京都市南→吹田間について、図-11より特に信頼性指標が低い値をとると推察される3月、8月、11月および12月の

表-3 既存の旅行時間信頼性指標の定義と特徴

指標	定義	特徴
Planning Time	小さいほうから数えて95%に位置するデータ $T_{95}(=PT)$	時間単位で表されるため分かりやすいが、他の道路区間と同一指標で比較不可
Buffer Time (余裕時間)	Planning Timeと平均値の差 $BT = T_{95} - T_{ave}$	他の道路区間との単純比較不可
Planning Time Index	自由流旅行時間に対するPlanning Timeの比率 $PTI = PT / T_{min}$	正規化されているため他の道路区間との比較が可能
Buffer Time Index (余裕時間)	Buffer Timeを平均旅行時間で割って正規化したもの $BTI = BT / T_{ave}$	正規化されているため他の道路区間との比較が可能だが、平均旅行時間の大小に影響を受けやすい

図-12 京都市南→吹田累積頻度分布 (2006年3月)

表-4 月別指標値比較 (京都市南→吹田 17:00~20:59)

	3月	6月	8月	11月	12月
T_{ave}	26.2	20.8	26.0	27.9	24.0
$T_{95}(=PT)$	42.0	24.0	47.0	41.0	40.0
BT	15.8	3.2	21.0	13.1	16.0
BTI	0.606	0.156	0.807	0.467	0.667
$BT/Dist$	0.585	0.120	0.774	0.482	0.591
L	27.1				

夕方・夜時間帯に着目して、各旅行時間信頼性評価指標の算出に関する数値を列挙してみた。なお、参考値として夕方・夜時間帯の中で最も信頼性が高いと考えられた6月についても指標値を例示した。表-4は、旅行時間信頼性指標値を計算した結果である。すべての指標について、6月が最も小さい値をとっていることがわかる。T_{ave}に着目すると、11月が27.9分、3月がそれに続き26.2分となっており、平均的なサービスレベルが最も低いのは11月となる。一方で、旅行時間信頼性を評価するためのPT、BT、BTI、BT/Distの各指標から判断すると、8月の値が他の3ヶ月と比較して大きく、旅行時間信頼性の観点から見るとサービスレベルが相対的に低いといえる。図-11を確認すると、8月においては非常に長い旅行時間となる時間帯が比較的多く観測されており、その結果平均サービスレベルおよび信頼性が低いという結果となったといえる。次に、BT値が15.8分と16.0分となりほぼ同じ値となった3月と12月の結果を比較してみよう。BT値ではほぼ同じであっても、BTI値については3月が0.606と、12月が0.667と大きく異なり、これから判断すれば12月の方が旅行時間信頼性が低いと結論づけられる。その一方、BT/Dist値は3月が0.585、12月が0.591とほぼ同一の値をとる。この理由は、BT値が同一であっても、BTI値算定の際にはT_{ave}値によってBTを除するためである。そのため、異なる区間のサービスレベルを旅行時間信頼性の点から評価する際には、BT/Dist値を活用する方が望ましい。図-11の旅行時間累積分布に立ち返って確認すると、3月の方がより旅行時間累積分布がなだらかに変化していることから、若干の混雑が多く発生していることが確認できる。BTIが大きく算出される条件としては、8月の累積分布形状のように短い平均旅行時間と非常に長い平均旅行時間を併せ持っている分散の大きな分布形状となる。この結果は、普段は安定した旅行時間で走行可能であるが、たまにひどい渋滞が発生するというケースに対してBTIは大きく算出される傾向にあることがわかる。

一方、11月のBT値およびBTI値に着目すると信頼性評価値は他と比較して悪くない。しかしながら、旅行時間累積頻度分布をみると、最も旅行時間がなだらかに変化している分布であり、直観的には旅行時間信頼性が低い状況を表すと考えられる。このような結果となる一因は、T₉₅に依存して旅行時間信頼性を評価しているためであり、旅行時間分布に関する尖度あるいは歪度など、高度な旅行時間分布の特性を表す高次の情報を活用することが求められるといえる。

(3) 旅行時間分布の高次情報に基づく信頼性評価
前節においては既往の信頼性指標値を用いた分析を進めたが、BTI等のみでは十分その分布形状を表現できて

いないケースがあることが明らかとなった。そのため、ここでは分布形状の3次、4次モーメントである歪度および尖度を用いて分布形状特性の考察を進める。尖度、歪度の定義について以下に示す。

歪度：3次モーメントであり、正符号が正の歪みで左にかたよった分布、負符号が負の歪みで右にかたよった分布であることを示している。左右対称であれば歪度はゼロとなる。本研究においては左にかたよった分布であるほど、旅行時間が安定して短いと判断できる信頼性評価指標となる。

$$S_k = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3 / n\sigma^{1.5} \quad (3)$$

尖度：4次モーメントであり、イコール0となるとき正規分布。尖度>0の時、急尖的分布で正規分布よりとがっている。尖度<0の時、緩尖的分布で正規分布より扁平。尖度=-1.8となるときが一様分布となる。

本研究においてはより尖った確率分布形状であるほど、最頻値近傍の旅行時間で走れる可能性が高いと判断できる信頼性評価指標となる。

$$K_w = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4 / (n\sigma^2) - 3 \quad (4)$$

尖度、歪度の信頼性指標値としての考察を京都南→吹田間の3月、6月、8月、11月および12月の夕方・夜時間帯に着目しておこなう。確率分布に対して、分布の尖度、歪度を月別に算出したのが表-5である。ここで、15分間平均旅行時間の階級数は、10分から50分の間の41となっている。最も歪度が小さいのは、既往の旅行時間信頼性指標のみではサービスレベルの低下状況を表現しきれなかった11月であり、最も歪みが小さな左右対称に近い確率分布形状であると判断できる。一方、他の月は中央値である30分よりも左側に偏った、右側に裾野が長い形状であると判断できる。また、尖度から11月の夕方・夜時間帯はきわめて扁平に近い確率分布形状であるとわかる。歪度、尖度に最も影響を及ぼしている要因と考えられるのは、集計したときの15分間平均旅行時間の最頻値である。歪度、尖度ともに小さい11月は、当該区間において継続的な観光需要等により交通需要が高まる月と重なっていると推察され、「その月の最も平均的な旅行時間」で走れる可能性が低くなっているものと考えられる。尖度が高い状況とは、平均旅行時間の最頻値の観測確率が前後1〜2階級の観測確率と比較して大きい状況であると考えられる。

表-5 歪度、尖度の比較（京都南→吹田 17:00～20:59）

	3月	6月	8月	11月	12月
歪度	2.50	3.72	3.26	1.42	3.12
尖度	6.51	13.74	10.42	1.40	9.58

ここで、旅行時間信頼性指標値による評価でサービスレベルが最も悪いと判断された8月に着目すると、累積分布形状からサービスレベルがよいと判断できた6月の指標値と大きく変わらず、歪度、尖度のみの評価ではサービスレベルが低下している状況とは判断できない。つまり、歪度、尖度指標のみでは、短い平均旅行時間と極端に長い平均旅行時間を併せもつ分布形状については、そのサービスレベルを適正に評価できていないと考えられる。以上より、高次分布情報を用いることで、11月の夕方・夜時間帯のように、平常時の短い平均旅行時間があまり存在せず、渋滞状態が継続したこと起因したと考えられるなどらかな累積分布形状について、表現可能であることが明らかとなった。ただし、歪度、尖度を用いる信頼性評価手法は、8月の夕方・夜時間帯に対してうまく評価がおこなえていないことから、他の旅行時間信頼性評価指標である平均値 T_{ave} 、BT 値と同時に用いて評価をおこなうべき手法といえるだろう。

(4) 道路区間ごとの旅行時間信頼性指標値の比較

これまでに述べた旅行時間信頼性指標値算定結果を用いて、道路対象区間同士のサービスレベルを比較分析してみる。区間距離によって正規化することにより平均旅行時間 T_{ave} 値の大小に比較的影響を受けない信頼性指標と考えられる BT/Dist 値と、単位距離あたりの平均旅行時間の値の2軸をもって評価する。各指標を各月で算定した結果を1プロットとし、得た散布図を図-13に示す。単位距離あたりの平均旅行時間の値が小さく、かつ信頼性指標の値が小さいほど旅行時間信頼性当該区間のサービスレベルが高いといえるため、図中左下側にプロットされることが望ましい。

まずは時間帯別に比較してみる。3つの分析対象区間に共通の傾向であるが、朝および深夜・早朝時間帯において、相対的にサービスレベルが高く、特に朝の時間帯の方が $T_{ave}/Dist$ 、BT/Dist 値ともに小さい。深夜・早朝の時間帯には渋滞はほとんどなく、旅行時間が比較的安定していると考えられるが、大型車などの低速走行車両の影響を受けた結果朝の時間帯の評価値の方が小さくなったと考えられる。17:00～20:59の時間帯が最もサービスレベルの低い時間帯であり、特に京都南→吹田間については、いずれの指標値も大きく上がっている。

区間ごとに比較すると、八日市→栗東間、栗東→京都南間の2区間と京都南→吹田間でプロットの散布特性が異なる。京都南→吹田間は朝、昼および深夜・早朝時間帯においては BT/Dist が非常に小さくなっており、旅行時間信頼性の高い交通サービスが提供できている。これは、京都南→吹田間の片方向の車線数が、3もしくは4車線あるためと推察される。一方、夕方・夜時間帯においては、旅行時間信頼性が大きく低下しているが、この区間は夕方に交通集中が原因の渋滞が頻発する区間で

図-13 平均旅行時間/Dist-BT 値/Dist (全区間)

ありその影響と推察される。

本節の分析内容が示す通りに、平均的なサービスレベルを表す軸と旅行時間の信頼性を代表する軸からなる平面上でサービスレベルを表すことで、時間帯別や各区間のサービスレベルを容易に比較分析可能といえる。

6. まとめ

本稿では、旅行時間信頼性の考え方にに基づき、ETC データを活用して既存の都市間高速道路の交通サービス

の質の評価を試みた。交通需要が変化しうような重大な突発事象発生時を除去すること、時間帯ごとの旅行時間代表値として各車両の走行時間の15分間平均値を適用すること、PA、SAにおける休憩車両の影響を除去するため外れ値除去の処理を行うことなど、ETCデータを用いた旅行時間分布を作成する際の考え方を整理した。ETCデータを用いることにより、IC間の実質旅行時間を用いた旅行時間信頼性評価が可能となった。今後、データに含まれる利用車種の情報を活用することで、車種別の旅行時間信頼性なども評価可能であろう。上記のような考え方にに基づき、名神高速道路西向き3区間（八日市IC→栗東IC間、栗東IC→京都南IC間、京都南IC→名神吹田IC間）を対象とし、旅行時間信頼性評価を試みた。その結果、既往の信頼性指標のみでは変動特性を説明し切れていないことが明らかとなり、その対案として、BT/Distや分布形状の高次情報を用いることを検討した。BT/Distは、区間距離で正規化するため異なる区間間で比較可能となっており、渋滞が頻発することで平均旅行時間が大きく算出される事象において有効性が示された。これら旅行時間信頼性評価指標を用いて、平均的なサービスレベルを表す $T_{ave}/Dist$ と併せて名神高速道路八日市～吹田間についてサービスレベルを評価した結果、道路区間、月および時間帯によってサービスレベルが異なることが確認でき、車線数という構造的特徴による可能性が高いといえる。京都南→吹田間は、非渋滞時は旅行時間信頼性が高い一方で、著しい渋滞が生じた夕方・夜時間帯においてサービスレベルの低下が顕著であることが明らかとなった。このとき、そのサービスレベルの低下の程度は月によって大きく異なることが旅行時間信頼性指標を用いることで定量化された。5月のGW、8月の盆休みなどの特異日の旅行時間信頼性については、1年分のデータで特異日のみの状況を用いて分布を記述することが困難であったため、特異日を含む月の信頼性として記述した。今後複数年のデータを入手できれば、特異日のもつ信頼性についても、より詳細な分析が可能となると考えられる。

今後の研究課題としては、より多くの区間を対象として分析を進め、サービスレベルに影響を及ぼす要因の把握があげられる。また、本研究で実施した手法におい

ては、特定のIC間を利用した車両のデータのみを活用したためデータ利用率が低い点、区間・時間帯によるデータグルーピングを試行的におこなっている点の2点が問題点として挙げられる。今回分析対象としていないデータには、十分な階級での分布形が得られないために対象としなかった短距離のトリップが多く含まれる。また、八日市IC→名神吹田IC間など主要なICを利用した長距離のトリップはある程度のサンプル数が確保できるため、今後の分析において活用方法を考える必要があるだろう。また、ETC車割引時間帯を考慮したグルーピング手法についても検討を加える必要があるといえる。

謝辞；本研究を遂行するにあたり、NEXCO西日本・高速道路整備効果評価研究会（会長：飯田恭敬京都大学名誉教授）メンバーの皆様より貴重なご意見・ご示唆を多数頂戴した。また、データ処理において（社）システム科学研究所に多大なるご支援をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Bell, M.G.H. and Iida, Y. (eds.) : Transportation Network Analysis. Wiley, Chichester, 1997
- 2) Chen, A., Yang, H., Lo, H.K. and Tang, W.H. : A Capacity Related Reliability for Transportation Networks, Journal of Advanced Transportation, 33, pp183-200, 1999.
- 3) 朝倉康夫, 柏谷増男, 藤原健一郎 : 道路網の機能的階層性と災害時の時間信頼性との関連, 土木学会論文集, No.583/IV-38, pp51-60, 1998
- 4) 宇野伸宏, 永廣悠介, 飯田恭敬, 田村博司, 中川真治 : バスプローブデータを利用した所要時間信頼性評価手法の構築, 土木計画学論文集, 2006
- 5) Asakura, Y., Kashiwadani, M. and Kumamoto, N. : Reliability measures of regional road network due to daily variance in traffic flows. Infrastructure Planning Review, 7, pp.235-242, 1989.
- 6) FHWA Report : Selecting travel reliability measures, 2003.

ETCデータを用いた都市間高速道路の旅行時間信頼性評価に関する研究*

山崎 浩気†・宇野 伸宏†・倉内 文孝‡・嶋本 寛**・小笹 浩司†・成田 博††

本研究では、ETCデータを活用した旅行時間信頼性評価手法を構築し、2006年度1年間のデータを用いて既存の高速道路ネットワークが提供するサービスの質を旅行時間信頼性の観点から分析した。個人の走行特性が含まれたETCデータを用いてサービスの質を評価するために、時間帯ごとの15分間平均値を適用し、休憩車両、事故・工事事象等の外れ値は処理する必要があることを示した。分析対象区間の時間信頼性について信頼性評価指標でもって定量化することで、区間・月・時間帯によってサービスレベル特性の差異が存在

することを確認した。一連の分析結果から信頼性評価指標を平均的なサービスレベルと併せて評価する必要性があることを述べた。

A Study of Travel Time Reliability Evaluation for Inter-city Expressway Using ETC Data*

By Hiroki YAMAZAKI† • Nobuhiro UNO‡ • Fumitaka KURAUCHI§
Hiroshi SHIMAMOTO** • Koushi OZASA†† • Hiroshi NARITA‡‡

In this study, an evaluation method of travel time reliability is established using annual ETC data in 2006, and level of service in Inter-city expressway network is analysed with the evaluation method.

Average travel time calculated by ETC data which can exclude the effect of individual driving characteristic and adjusted outskirt value because of stopping at SA/PA, accident and/or construction loss time. As the results, the level of service fluctuates according to area, month and time, and it was confirmed with indexes of travel time reliability. Moreover travel time reliability was evaluated with some indexes combined.