

# 道路の時間信頼性に関する研究レビュー

中山 晶一朗<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 金沢大学准教授 環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

E-mail: snakayama@t.kanazawa-u.ac.jp

近年、信頼性の高い道路交通サービスの提供が求められている。本研究では、道路交通の信頼性として求められる機能によって3つに分類できる連結信頼性・時間信頼性・走行信頼性のうち、日常の道路の旅行時間の変動を扱う時間信頼性を対象とする。まず、これまでの研究によって明らかにされてきた交通量や旅行時間の変動特性について整理するとともに、これまでに提案された時間信頼性指標の特徴をまとめる。そして、時間信頼性を考慮した交通行動モデルの分類を行い、それらの既往研究の推定結果を整理し、人々の旅行時間の信頼性の価値について考察する。これらを通じて、時間信頼性の便益算定アプローチを提案し、道路交通サービスに対する時間信頼性を考慮した費用便益分析やその向上のための道路交通管理に資することが本研究の目的である。

**Key Words :** *transportation reliability, value of reliability, variation of flows*

## 1. はじめに

近年、経済・社会活動の高度化とともに、単なるサービス向上だけではなく、安定的に道路交通サービスを提供することも求められるようになってきている。自然災害、事故などによる通行止めや大幅な遅延だけでなく、交通システムの障害・維持管理等に伴う規制や需要の変動を原因とする旅行時間の不確実な変動も道路交通サービスの安定的な提供上の大きな課題となっている。それらに対処するために、道路整備や道路交通管理による信頼性の向上はどれほどになるのか、逆に、ある程度の信頼性を確保するためにはどれほどの道路整備が必要となるのかなどの評価を実施することなどが必要となる。しかし、このような道路交通サービスの信頼性の評価は未だ発展途上の分野であり、これまでの研究蓄積を整理し、実務的な視点を踏まえ、効率的に研究を推進させるとともに、現時点で実用的に利用可能な手法を確立すること、さらに、将来、より精緻なモデルや手法の確立に寄与する先進的な研究成果をまとめることなどが重要である。

道路交通サービスの信頼性とは何かについては本章で詳述するが、道路交通の信頼性とはそのサービスを安定的に提供する能力ということになる。日々の道路交通サービスについては、旅行時間の変動が問題になることが多い。当然、利用者としては、日々の旅行時間があまり変化しないことが望ましい。

旅行時間が不確実であると、到着制約や希望到着時刻がある場合、早めに出発することが必要となる。つまり、旅行時間が「読めない」ために時間損失が生じる。このような余分に必要な時間は、遅刻しないための余裕時間やセイフティー・マージンと呼ばれている。以上のように、信頼性が低いと、様々な経済的・社会的な損失が発生する、もしくは発生し得ることとなる。

信頼性を考える上では、まず、信頼性を考えなければならない原因を明らかにする必要がある。時間信頼性については、道路の旅行時間や交通量変動がその直接的な原因となる。道路の交通量や旅行時間は常に変動するため、その変動をシステムティックに計測することは半世紀以上前から取り組まれている課題である。日本では、車両感知器の設置が始まった昭和40年代から研究が急速に進展している。近年では、プローブカーやETCデータを用いた研究も行われている。これらの研究では、交通量や旅行時間がどのように変動・変化しているのかを明らかにしようとするものが大半を占め、もともとは旅行時間の把握・推定・予測のために行われていることも多い。

個々の道路や個々のリンクの交通量や旅行時間等の変動諸量のみでは、道路全体の信頼性を捉えることは難しく、それらのデータをもとにどのように信頼性を定量化するのかというのが信頼性指標の研究と言えよう。信頼性指標については、その用途に合わせて、こ

れまでに様々なものが提案されている。そして、信頼性の評価の際には、人々が信頼性をどのように捉えているのか、逆に、信頼性や変動がどのように人々の行動に影響を与えているのか、信頼性にどれほどの価値を見出しているのか、という利用者側からの視点も極めて重要である。このような信頼性を考慮した交通行動や信頼性の価値に着目した研究も多数行われている。

本研究の目的は、1) 交通量や旅行時間等の変動分析、2) 信頼性指標、3) 信頼性が交通行動に与える影響や信頼性の価値、についてこれまでに行われた研究を整理し、時間信頼性の便益算定の一つのアプローチを提案し、道路交通サービスに対する時間信頼性を考慮した費用便益分析、信頼性向上の道路交通管理に資することである。本稿の第2章では、信頼性の分類を行い、どのような道路交通の信頼性を対象とするのかを明らかにする。第3章では、交通量・旅行時間の変動の要因や変動特性についての既存研究のまとめを行う。第4章では、これまでに提案されている時間信頼性指標を整理し、各指標の特徴などをまとめるとともに、道路ネットワークの信頼性評価に適切な指標を提案する。第5章では、信頼性が交通行動の与える影響について、既存研究を整理し、信頼性の価値はどれほどであるのかを考察する。そして、第6章に考察結果や結論をまとめる。

## 2. 道路ネットワークの信頼性

道路交通ネットワークの信頼性については、これを考える観点により、様々な概念があり得る。JIS 工業用語大辞典第4版<sup>1)</sup>によると、信頼性とは「定められた期間及び定められた条件のもとで装置が求められた機能を果たす能力」(B0155)とされている。この定義には陽には記載されていないが、機能を果たす能力とは常時その機能を果たせるのか、安定的にその機能を果たせるのかという観点が含まれている。よって、求められた機能を安定的に(もしくは常時)果たす能力という方が直感的には理解しやすいかもしれない。これによると、信頼性を考える上では、期間、条件、要求機能の3つの要素が必要となる。

これまでに行われてきた道路交通の信頼性の研究では、「期間」が問題となることはほとんどなかったと言えよう。期間の長短やピークのみ考えるなどは本質的な問題とはならないことが大半であると考えられる。「条件」については、様々な設定が考えられる。設定条件は大きく非日常時と日常時の2つに分けることができよう。非日常とは、災害等で道

路が通行できなくなることなど生起する確率が小さく、日常的には発生しないような場合であり、このような非日常的事象を考慮する条件設定がある。このような非日常時の信頼性を考える場合は脆弱性(vulnerability)という用語が使われることもある。一方、日常時については、通常頻繁に生起する事象に焦点を当てる。非日常・日常ともに、例えば日常時では工事・事故等によるリンク閉塞を考えるのか、どうか、などさらに設定すべき条件が課せられることになる。

次に、「要求機能」であるが、道路ネットワークに求める機能については様々なものがあり、それに基づき、道路ネットワークの信頼性は幾種類も存在する。設定条件により、要求機能も異なるため、この要求機能は設定条件と密接に関係している。道路ネットワークに求められる機能には様々なものがあるが、本稿では、速達性、随意性(可達性)、安心・快適性の3つを考えたい。速達性は目的地に早く到達できること、つまり、高速で移動ができ、旅行時間が短いことである。随意性(可達性)は必要な時に必要な場所へ行くことが可能であることを意味する。安心・快適性は安全・安心・快適に移動できることである。

交通工学の分野では、歴史的には、まず、道路ネットワークのノードペア間が移動可能かどうかということの問題とした連結信頼性について研究がなされ、その後、移動可能かどうかよりも、むしろ、その移動を行う際のサービスレベルに焦点を当てた旅行時間信頼性や容量信頼性(capacity reliability)などの研究が行われている。地震等の災害時などの非常時には、連結信頼性が重要になる。先の阪神淡路大震災では、この連結信頼性の重要性が改めて認識された。日常時には、道路利用者の最も大きな関心はどれほどの旅行時間が必要であるのかであることと考えられるため、旅行時間の変動が重要になる。また、路面状況等の走行しやすさや安全に走行できるのか、なども道路ネットワークの信頼性に含まれよう。航空機などでは、日常時でも連結信頼性が必要となる場合もあり得る。

本研究では、利用者が道路ネットワークに求める機能の観点から信頼性を連結信頼性、時間信頼性、走行信頼性の3つに分類することとする(図-1参照)。連結信頼性は、ノードペア間が連結されており、その間の移動が可能かを扱うものであるとする。この連結信頼性は、道路に求める機能のうちの随意性(可達性)に対応している。時間信頼性は、旅行時間に関する信頼性であり、速達性の機能を安定的に果たす能力と言えよう。道路ネットワークのサービスは

旅行時間変動要因や特性は重要である。

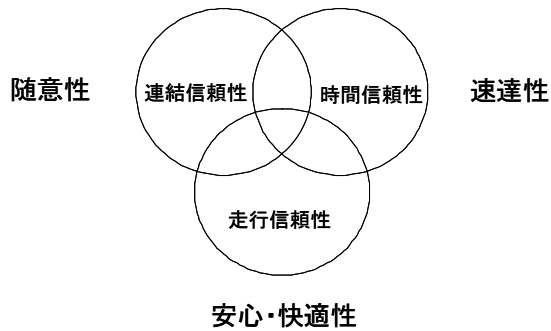


図-1 道路交通の信頼性の分類

旅行時間が最も重要なものであることが多いが、走行しやすさや安全性など走行自体に関する信頼性を走行信頼性と呼ぶこととする。安全性や快適性も道路ネットワークに求められる重要な機能である。この走行信頼性は快適・安心できる走行の意味合いが大きく、走行快適・安心性ともいうべきものであるが、信頼性という言葉自体に安全・安心が含まれているため、統一性をもたせるため、本研究では、走行信頼性と呼ぶこととする。なお、連結信頼性については、連結していないノードペア間の旅行時間は無限大として取り扱うことも可能で、時間信頼性の特殊形とみなすことも出来る。連結されていない状態は走行すらできない状態であり、走行信頼性がない状態とも言える。このように3つに信頼性を分類したものの、それぞれは必ずしも排反でなく、道路ネットワークに求める主な機能が何かによって分類したものである。なお、いずれの信頼性を取り扱うべきかは、ネットワークに何を求めているのか、どの点に関心があるのかによって異なってくると思われる。

### 3. 交通量・旅行時間の変動分析

本章では、道路ネットワークを流れる交通量及び旅行時間の変動について考える。変動という言葉は非常に幅広く用いられており、北村<sup>2)</sup>は変動を差異、変化、変動の3つの概念に分けている。本章では、主に狭義の「変動」であり、以下、変動とはこの狭義の変動のことを示すものとする。

交通量は旅行時間よりも計測が容易であり、変動分析としては、交通量を対象としたものが旅行時間よりも圧倒的に多い。本章では、交通量の変動に関するこれまでの研究を整理し、交通量の変動する要因や変動特性などをまとめる。旅行時間の変動要因等の研究は少ないものの、時間信頼性を考える上で、

#### (1) 交通量の変動要因

##### a) 変動の主要因

本研究では、通常の時系列分析と同様に、交通量の変動を周期変動と不規則変動に分けることにする。周期変動とは、月や曜日、時間(時刻)による交通量の変化の傾向である。交通は人間の活動により派生的に発生するものであり、その人間の活動が月や曜日、時刻によってある程度の傾向性を持って行われるため、当然、交通量もそのような傾向性を持つ。この交通量の周期変動については次項で詳述する。このような周期を適切に取り除くと、残りは不規則変動と見なされることになる。

ある程度周期的な変動を引き起こしていると考えられるのは、年、月、週、曜日、時間(時刻)であろう。それ以外に、連休や年末・年始、お盆、年度末や決算日(五十日)などのカレンダー情報の交通への影響も考えられる。その他の要因としては、天候、工事、事故などがあげられる。これらは不規則に、確率的に生じるものであり、不規則変動として取り扱われることになることが多いと考えられる。

変動を引き起こす要因を特定することは非常に重要である。上では、周期変動とそれ以外の変動としての不規則変動の2分類にしたが、変動要因が特定でき、ある程度予測可能な変動と予測不可能で、確率的に取り扱わざるを得ない変動に分類するという視点も重要である。渋滞予測・旅行時間予測では、予測可能な変動をできるだけ多く捕捉することになる。

##### b) 変動パターンの分類

月や曜日、時間(時刻)による交通量の周期変動については、半世紀以上も前より指摘されている。池之上<sup>3)</sup>は、交通量の変動に関して詳細にまとめている。特に、周期変動としては月変動(季節変動)、曜日変動、時間変動(24時間)の3つに着目している。本質的な部分は現在もほとんど変わっていないと思われるため、以下に池之上の詳細な分析結果についてまとめる。

曜日変動に関しては、U字型、逆U字型、一様型の3分類に分けている。U字型は休日交通量が多い場合、逆U字型は平日の交通量が多い場合、一様型は曜日変動があまりない場合である。ここで、U字と言っているのは、日曜日から土曜日までの折れ線グラフの形から来ている。本研究では、それぞれを休日集中型、平日集中型、一様型と呼ぶこととする。

月変動に関しては、月変動がある場合とない場合に分け、月変動がある場合に関しては、一般道と観光道

に大別し、それぞれを細かく分類している。一般道では、i) 12月ピーク（トラック主体の道路）、ii) 6月に多い、iii) 8～12月に多い（トンネルや橋梁などの交通の要所）、iv) 8月と12月の2ピーク（乗用車とトラックが別時点でピーク）、v) 9～11月ピーク（山岳・丘陵地の地方幹線）などのパターンが指摘されている。また、観光道では、1) 春秋に多く、梅雨・冬季に少ない（山岳部）、2) 春夏に多く、梅雨・冬季に少ない（一般観光道）、3) 夏にピーク（臨海・海岸部）、4) 夏著しく多く、冬著しく少ない（夏季観光ルート）、5) 多ピーク（伊豆の観光道）、6) 7・12月に多く、9・10月に少ない、などの分類が示されている。

24時間変動に関しては、常時観測データを分析した結果、全般的に、午前と午後と2つのピークがあり、12～13時に谷がある。そして、都市部及び幹線道路ではピークの山が平らであり、通過交通が多い場合、昼夜の境の増減が緩やかとされている。

常時観測地点を都市部、平均日交通量が一万台以上の郊外部、平均日交通量が五千台以下の郊外部、通過交通の性格の強い地方部の旧一級国道、通過交通の性格が強くない地方部の旧一級国道、地方部の旧二級国道に分類したところ、同じ分類内では類似したパターンを形成するとされている。なお、朝倉ら<sup>4)</sup>も四国の国道データの分析により、距離的な近接性よりも、道路種別により変動の傾向が似ていることを指摘している。

以上のように、道路の特性や種別により、交通量の周期変動パターンの分類がある程度可能であると考えられる。交通工学ハンドブック<sup>5)</sup>では、道路を都市内街路、主要幹線、地域幹線、観光道の4つに分類し、交通量の変動をまとめている。また、改訂道路交通データブック<sup>6)</sup>では、都市内、都市周辺I、都市周辺II、山地部主要幹線、平野部主要幹線、地域幹線、観光道、幹線・観光道の8種類に分けている。

### c) 天候・カレンダー情報の影響

天候の影響に関しては、雪の影響は大きく、飯田ら<sup>7)</sup>は金沢市内の交差点の交通量及び渋滞長を調査し、日交通量は、前日の降雪量よりも当日の降雪量との影響が大きく、日交通量と当日降雪量との相関は0.74と報告している。一方、渋滞度は前日降雪量の方が影響が大きく、その相関は0.58であった。渋滞は除雪できなかった道路の積雪が大きく影響するためと考えられる。岡田・川野<sup>8)</sup>は、首都高速の渋滞量（渋滞長と渋滞時間の積）について、雪の日の渋滞量は通常の半分程度としている。一般に降雪により交通量が減少するものの、渋滞に関しては、降雪量や積雪量、除雪体制や路面状況などで、その影響が反対になることがある。大量の降雪・積雪によ

り、容量が著しく低下すると、渋滞度は大きくなるが、容量の低下が小さいと、逆に渋滞が減ることもある。

降雨の影響は、降雪ほど顕著ではなく、中村ら<sup>9)</sup>は、東京都心の数箇所の国土交通省（当時建設省）の常時観測データ5年分について、時間交通量の変動分析を行い、降雨の影響は統計的には見られず、曜日の影響は小さいと報告している。一方、岡田・川野は降雨により首都高速道路の渋滞量は1割程度増加したとしている。なお、岡田・川野はカレンダー情報により渋滞量が大きく異なることを図示している。井上ら<sup>10)</sup>は本四連絡橋の日交通量を分析し、当日降雨があると交通量は減少し、逆に降雨の翌日は交通量が増加することを示している。そして、それは開通1年目では明石大橋・瀬戸大橋・多々羅大橋の上下共に全て統計的に有意であった。しかし、2、3年目では統計的には有意でない場合もあった。開通直後は観光交通の割合がより多いため、降雨の影響が大きかったと思われる。

以上の研究が示すように、観光道か通常の都市道路かにより、降雨の影響は大きく異なると考えられ、日常道路では降雨により交通量が増加すると共に、交通容量の減少もあり、渋滞が激しくなる傾向もあると考えられる。一方、観光道は降雨により交通量が減少する。そして、予定を次の日に延期する交通も多く、降雨の翌日は交通量が増加することもあると言える。

また、前出の井上らは、本四架橋の交通量（数年分の日断面交通量）の時系列分析を行い、連休や休日、降雨、料金が交通量に影響を及ぼしていることを示している。休日・連休を変数に取り込んだ自己回帰分析により、平日より休日の方が交通量が多いこと、通常の休日よりも連休の方が交通量が多いこと、さらに、連休前後の休日の交通量は通常の休日よりも交通量は小さく、連休前後の休日では出控えが行われていることなどを示している。なお、井上ら<sup>11)</sup>は、本四架橋の交通量に対するクラスター分析を行い、交通量変動のパターンの分類も行っている。

日野ら<sup>12)</sup>は大阪府の主要な189の交差点の交通量（連続していない2か月分の方向別・時間帯別交通量）を分析し、決済日（五十日）には、日交通量は2～3%増加、業務時間帯（10～11、14～17時）では8%ほど交通量が増加していることを明らかにした。実際にはそれほど大きくない交通量の増加ではあるが、決済日は実際以上の混雑が想起されているとしている。

## (2) 交通量の周期変動と不規則変動

飯田・高山<sup>13)</sup>は、北陸自動車道と中国自動車道の各インターチェンジの流入合計日交通量(1年分)に対して、月・週・曜日の3元配置の分散分析を行った。その結果、月間変動、曜日変動、月間・週間の交互作用が有意であったと報告している。そして、これらの3つと不規則変動の全変動に対する寄与率を計算し、不規則変動の割合はほぼ35~45%であったとしている。また、北陸自動車道及び山間地区での中国自動車道では、月間変動が卓越し、阪神地区付近での中国自動車道では曜日変動が大きくなっている。

前出の朝倉らも建設省四国地方建設局管内の国道の日交通量データ(1年分)の分散分析を行い、観光道路以外では曜日変動が卓越し、月及び月・週の交互作用も変動にある程度寄与しているとしている。月と週の交互作用は月末や月初めの交通量の増減が影響している指摘している。

曹ら<sup>14)</sup>は東京都内の幹線道路の22地点の平日の日交通量の周期変動について分析を行い、さらに、同じ研究グループの小坂ら<sup>15)</sup>は首都高速道路の17年分の平日の日交通量について同様の分析を行っている。これらの研究では、首都高速と都内幹線道路の月間変動・週変動・曜日変動には大きな違いはなく、曜日変動に関しては金曜日の交通量が他の曜日(月・火・水・木)よりも多いこと、首都高速での不規則変動の割合は7割程度、都内幹線道路では6割程度と不規則変動の全変動に対する割合は過半数を超えることなどを報告している。

飯田・高山の研究では、不規則変動の割合は4割前後である一方、曹らや小坂らの研究では6~7割と値は大きく異なっている。しかし、飯田・高山の研究では、休日を含めた日交通量であり、平日と休日の交通量は大きく異なると考えられるため、平日のみを考えた場合、不規則変動の割合は大きくなることも考えられる。よって、平日の交通量変動のうち不規則変動の割合は過半数を超えると考えるとそれほど大きな矛盾はないと推測できる。また、前出の中村らの報告では、東京など大都市の都市内道路の曜日(の周期的)変動は小さい傾向があるとしており、このことも影響していると思われる。

以上の研究結果は、交通量の変動を考える上で、不規則変動の占める割合は相当程度あり、交通量を何らかの確率分布を仮定して取り扱わざるを得ないことを示唆していると考えられる。交通量や旅行時間の予測は難しいものがあり、交通量・旅行時間は不確実であり、その不確実性や信頼性を考えることは重要であることを意味しているとも考えられる。

交通量の変動係数については、前出の中村らは、8時から19時の変動係数は0.10から0.15、5時から7時の変動係数はこれらよりはるかに大きいとしている。5時から19時まで合わせた交通量の変動は時間交通量より小さかった。また、中村らは、3週間みのデータであるが、15分交通量についても分析しており、変動係数は0.10から0.25と変動が大きい、ピーク到達時点では0.10以下と安定していると述べている。

以上のように、交通量においても大数の法則が成り立つ傾向が読み取れる。すなわち、15分交通量、1時間交通量、日交通量では、時間の長さが大きくなるほど、変動が小さくなる傾向が見られる。これは交通需要の変動は時間ごとに独立に近いことに起因していると思われる。次章で詳述するが、旅行時間にはこの法則は成り立たない傾向がある。また、道路には容量があり、ピーク時などでは容量に近い交通量が流れるため、変動は小さくなる傾向も見られる。

## (3) 交通量の定常性

安野ら<sup>16)</sup>は、名神・中国・山陽・舞鶴の高速自動車道の交通量の変動が定常であるのかの統計的検定を行った。定常性の定義として、平均と分散、異時点間の共分散が時間に依らず一定であるという定義を採用している。年間のトレンドや月・曜日の周期要因を除去すると、平均が一定となるため、分散と異時点間の共分散が一定であることを検討すればよく、これは除去後の交通量変動がランダムウォークであるか否かを検証することになる。もしランダムウォークであれば、非定常であり、それが統計的に棄却されれば、定常であると判断できる。年間のトレンドや月・曜日の周期要因を除去した後の交通量変動は、有意水準1%で不規則な非定常要因(ランダムウォーク成分)が含まれるという帰無仮説が棄却され、除去後の交通量は定常であることを示唆した。

また、堤・樗木<sup>17)</sup>は、定常過程に対する時系列モデル(AROPモデル)の適合性が高い場合はデータは定常であり、そうでない場合は非定常であると仮定し、判別分析により、交通量・交通需要量の定常性に関して検討を行っている。32例の有料高速道路の日交通量について、観光道路的な色彩の強い7例が非定常となったと報告している。

## (4) OD交通量変動

本節では、リンク交通量・断面交通量ではなく、OD交通量の変動特性を考察した研究についてまとめる。

村上ら<sup>18)</sup>は首都高速道路の3ヶ月間のランプ流出交通量と起終点調査から算出したODパターンを用いてOD表を作成し、OD交通量の日変動について研究を行っている。ランプ交通量の日変動(変動係数)は数%である一方、OD交通量の変動係数は2割前後と大きな数値であることを示している。これはOD交通量よりもランプ交通量の方が交通量自体が大きく、大数の法則がある程度成り立っているためと思われる。その他の知見として、月・金の方が火・水・木よりも変動が大きいこと、首都高速の外からのODの変動が大きいこと等を報告している。

上の村上らの研究では、起終点調査から得られたODパターンは一定という仮定の下での推定OD交通量を検討していたが、田中ら<sup>19)</sup>は首都高速のいくつかのオン・オフランプでのナンバーマッチング調査を平日5日間行い、OD交通量の変動係数等の変動分析を行っている。平均値の大きいOD交通量ほどその変動係数は小さい傾向があり、曲線回帰分析により、その関係は $\sigma^2 = 16\mu$ であるとしている。ここで、 $\mu$ は平均値、 $\sigma$ は標準偏差、 $\sigma^2$ が分散、 $\sigma/\mu$ が変動係数である。すなわち、 $\sigma^2 = 16\mu$ の関係(OD交通量の分散はその平均の16倍)である。また、OD交通量の和であるランプ流入交通量もこの関係が良く当てはまっていることも示している。曜日変動としては、金曜日と月曜日のOD交通量が他の曜日よりも大きいことを指摘している。

松葉ら<sup>20)</sup>は名古屋高速道路でのAVI(自動車両認識装置)設置区間でのOD交通量の時間変動及び交通情報がOD交通量の与える影響について報告している。楠料金所を通過する車両のうち大高出口で高速を降りる比率(OD比率)は一日の間で20%~70%の間を変動していることが分かった。楠料金所から大高出口へ向かう車両は通過交通であり、早朝の比率は70%近くあるが、通勤時間帯では20~30%まで急激に落ち込み、通勤時間帯後は40%近くまで増加する。通過交通は渋滞の激しい時間帯を避けるもしくは別経路を選択するため、その比率が低下すると考えられる。この報告はOD比率を一日の間で一定とすることには問題が大きいことを示唆している。一方、平日5日間の日変動はさほど大きくはないと報告している。

## (5) 旅行時間の変動

### a) 旅行時間分布

HermanとLam<sup>21)</sup>はデトロイトのGM研究所への通勤のための自動車旅行時間(26経路の経路旅行時間)の変動分析を行い、旅行時間の分布に関しては、60%タイル値以下では、正規分布と似ているとしている

ものの、それ以上では正規分布よりも裾が長い(long-tailed)傾向があると報告している。つまり、旅行時間が非常に長くなる頻度は正規分布が仮定するものよりも大きい。したがって、正規分布のような左右対称な分布よりも、右の裾が厚く、左に偏った分布を用いる必要があると考えられる。

RichardsonとTaylor<sup>22)</sup>はオーストラリアのメルボルンでのある一つの経路の旅行時間変動について分析を行った。経路を19のセクションに分け、その旅行時間を検討したところ、各セクション旅行時間はほぼ独立であった。旅行時間の分布に関しては、正規分布と対数正規分布への適合に対する検定( $\chi^2$ 検定、Kolmogorov-Smirnov検定、歪度に対する検定)を行い、明らかに正規分布ではないと結論付け、対数正規分布への適合が比較的良好であったとしている。これまでも指摘されているように旅行時間分布が非対称であることが確認された。また、混雑が激しくなるほど変動係数が大きくなることも報告している。

MontgomeryとMay<sup>23)</sup>は英国のリーズ市の5つの放射道路の旅行時間をナンバープレートマッチング及びプローブカー(moving vehicle observer)により計測し、旅行時間は正規分布というよりも、対数正規分布に従っていることを示している。

旅行時間が小さくなることには明らかな限界があるが、長くなる方にはその限界はなく、上述の研究結果については直感的にも旅行時間の分布は左右対称でないことは理解できるものである。また、旅行時間が負の値をとることもなく、左右対称で負の値も取りえる正規分布よりも対数正規分布の方が当てはまりが良いという結果は自然と思われる。しかし、旅行時間分布の形状は様々な要因により変化すると考えられるため、対数正規分布が最も適切であるのかは今後の研究が必要であろう。また、条件によって分布形は異なることも考えられるため、様々な条件下でどのような分布特性があるのかを整理することも重要である。さらに、旅行時間の分布と交通量の分布との関係を明らかにすることも必要である。これまで交通量から旅行時間を算出する様々な旅行時間関数が提案されている。実際にその旅行時間関数のパラメータを推定する場合、基本的には推定した旅行時間が観測した旅行時間に一致することがより良い旅行時間関数と言える。信頼性分析の観点からは、これより高次元の旅行時間関数への要求がある。交通量がある分布に従って変動する場合に出力される旅行時間の分布と観測される旅行時間の分布との一致性である。このように信頼性分析では、旅行時間関数に求められるものが高次元になるため、

旅行時間関数を根本的に再検討する必要も考えられる。交通量と旅行時間分布の関係の精緻な分析も今後必要な研究である。

短距離区間の旅行時間について、大山ら<sup>24)</sup>は、東京都心において、隣接する重要交差点間での旅行時間の調査を行い、旅行時間のヒストグラムを3つに分類している。ヒストグラムが1つのピークの場合、2つのピークがある場合、分布が広くなだらかな場合の3分類である。本研究では、それぞれを1ピーク型、2ピーク型、平坦型と呼ぶことにする。隣接交差点間という短い距離のため、1ピーク型は全車が交差点で信号待ちしなくても良い場合や全車が信号待ちする場合に現れ、2ピーク型は信号待ちする車群としない車群に分かれる場合に現れるためや隣接重要交差点での信号サイクル長が異なるためとしている。同一区間でも時間帯によってヒストグラムの形状が大きく異なることがあり、渋滞時では平坦型になる傾向があると報告している。また、全ての観測データで道路長が長くなるほど旅行時間の標準偏差が大きくなっており、その関係は必ずしも線形ではなく、急に旅行時間の標準偏差が大きくなることもあるなどが示されている。

#### b) 旅行時間の変動特性

Smeed<sup>25)</sup>は、ロンドンのデータから、走行速度が低下するほど、旅行時間の変動係数が大きくなることを示している。また、SmeedとJeffcoate<sup>26)</sup>はロンドンのある1つの経路旅行時間の変動について考察し、月変動、曜日変動、時間変動が見られること、走行速度が低いほど変動係数が大きくなることなどを報告している。

前出のHermanとLamは、旅行時間分布の分析とともに、雨の日は旅行時間が長くなること、経路旅行時間はその間に信号待ち等で停止した時間と線形の関係があることや日々の変動は独立であることなど報告している。また、GM研究所へ向かう場合は $\sigma = 0.36\mu^{0.49}$ 、研究所から帰宅する場合は $\sigma = 0.31\mu^{0.70}$ と推定し、 $\sigma = \alpha\sqrt{\mu}$ を用いて旅行時間の標準偏差や変動係数を推定することを提案している。ただし、 $\mu$ は旅行時間の平均値、 $\sigma$ は標準偏差、 $\alpha$ は定数である。

前出のMontgomeryとMayは旅行時間データの回帰分析により、旅行時間は当該時刻の交通量だけでなく、それ以前の30分間の交通量の影響が半分を占めていること、路線によっては、冬季、学校開校時期、降雨、気温、照度、湿潤路面なども旅行時間に影響していることを示唆している。

WillumsenとHounsell<sup>27)</sup>は、(インナー)ロンドンの旅行時間データを実測及びシミュレーション(Contram)により

得て、分析することにより、旅行時間のばらつきを簡素で扱いやすい方法で推定するモデルとして、 $\sigma = 0.9t_f^{0.87}(CI-1)$ を提案している。ここで、 $t_f$ は自由走行時間、 $CI$ は混雑度(実際の旅行時間/自由走行時間 $=\mu/t_f$ )である。

竹内ら<sup>28)</sup>は松原ジャンクション付近の阪和道から西名阪道に7台のビデオカメラおよびAVIを設置し、ビデオカメラ撮影による車両挙動及びAVIによる7km区間の旅行時間の計測を行っている。7km区間の旅行時間は車両間でバラつきが大きく、その原因は自由走行区間での速度傾向、渋滞区間で車両が選択した車線、ジャンクション分流部での渋滞列への加わり方の違いなどが原因ではないかと推測している。非線形回帰曲線により時刻の旅行時間を推定しようとしているが、決定係数が0.2~0.3と低く、旅行時間の推定すら出来ない可能性がある。合流や分流、ジャンクションなどがあり、渋滞が発生するような区間では旅行時間は大きくばらつくことを示唆していると思われる。

島田・廣島<sup>29)</sup>は天竜川に架かる掛塚橋周辺での平日5日間の交通量・渋滞長・旅行速度の観測(AM6:30~AM9:30の間の10分ごと)の分析結果を報告している。交通量の日変動係数(日々間の変動係数)は1.5~19.2%とそれほど大きくなく、交通量が交通容量に規定されたためとしている。一方、旅行時間の日変動係数は14.5~45.9%と大きく、10分前の渋滞長が旅行時間に大きく影響していることを明らかにしている。

上述の竹内ら及び島田・廣島より、ボトルネックがあり、渋滞が発生する箇所が含まれると、断面交通量の変動は容量制約により抑えられるものの、渋滞による旅行時間の変動は非常に大きくなることが分かる。

割田・古田<sup>30)</sup>は首都高速3号渋谷線上りの12km区間の5分間感知器データを用いて、旅行時間の変動分析を行っている。曜日により旅行時間のばらつきの傾向は異なることや曜日や月という単純なグルーピングでは旅行時間のばらつきの傾向を捉えることが困難な時間帯もあることを報告している。MontgomeryとMayや割田・古田の研究から、旅行時間の変動を捉えるためには、事故・工事・故障車や雪・雨等の気象条件の影響も考慮する必要があることが分かる。

本章の(1)交通量の変動要因で述べたように、交通量に関しては、変動要因等の研究が比較的進んでいる。一方、旅行時間は交通量に比べて観測が難しい点などが問題となっており、交通量変動ほどは研究は進んでいない。旅行時間の観測が難しいのは、交通量はあ

る断面を通過する車両数を観測するだけで良いのに比べて、旅行時間は、ある車両を特定し、その車両が2つ以上の地点間を通過する時刻を計測することなどの必要があるからである。この観測に関しては、次章の(2) 諸データによる旅行時間信頼性評価 において、GPSやETCなどの新たな旅行時間観測法について紹介する。

旅行時間変動については、上述の通りの研究がこれまでに行われており、例えば天候等で旅行時間が変動することなどが明らかにされている。しかし、どのように天候が旅行時間変動を起こしているのかなどまでは必ずしも明らかにされていない。降雨の際、需要が不確実に変動するため、旅行時間変動が生じるのか、路面状況の変化のため、変動が生じるのか、さらに、需要変動はピーク時に起きやすいのか、ノン・ピーク時なのかなど、よりミクロな観点から、旅行時間変動のメカニズムを解明することが今後必要と考えられる。

旅行時間は2地点間の通貨時刻の差として計測することができるが、その2地点間の旅行時間を大きく変動させる箇所や要因が複数存在することがあることやその箇所を通過する時間差があり、それらの箇所や要因間の相互関係も重要になると思われる。ミクロ的な旅行時間変動メカニズムを解明する際には、これらの視点も重要となろう。また、これらの視点は、基本的には断面のみで計測できる交通量変動では取り扱われないものであり、旅行時間変動分析が交通量変動分析よりもより一層難しいものとなっている原因の一つとも考えられる。

全ての経路の旅行時間を計測することは事実上不可能であり、経路旅行時間については、なんらかの予測式や予測モデルが必要となると考えられる。ミクロな旅行時間変動メカニズムを解明する研究が蓄積されることによって、旅行時間変動を経験的に予測するモデルや式を導出することが可能となると期待できる。

## 4. 時間信頼性指標

### (1) 旅行時間信頼性指標

#### a) 既存の時間信頼性指標のレビュー

信頼性を定量的に扱うためにはそのための指標が必要となる。「信頼度」とは、JIS工業用語大辞典<sup>1)</sup>によると、「与えられた条件の下で、所定の時間内に、ある機器が所要の機能を果たすことができる確率」とされている。これに倣い、本稿でも、確率で信頼性の度合いを計測するものを信頼度と呼ぶことにする。しかし、信頼性の度合いは確率を用いて表現しないものも多いため、確率を用いる信頼度以外

の信頼性の度合いを表す指標も含める場合は本研究では「信頼性指標」と呼ぶこととする。

ばらつきや変動の定量化は信頼性を考える上で極めて重要である。時間信頼性の指標として求められる要件は、使いやすさ、分かりやすさ、理論的整合性、交通行動との整合性など様々なものがある。本稿では、交通ネットワーク整備や交通政策の評価のための時間信頼性指標について考える。道路ネットワーク整備や道路交通政策の評価は、少なくとも道路整備では、費用便益分析を行うことが必須となっているのが現状であろう。この場合、信頼性の価値を貨幣換算で算出することが必要であり、貨幣換算の容易な信頼性指標が求められる。時間信頼性は旅行時間の信頼性であり、多数回の旅行時間の計測や何らかの方法によって推定される旅行時間分布が重要である。旅行時間もしくは交通量の計測には誤差が含まれるため、観測誤差にある程度ロバストなことも実用的には重要である。

道路ネットワーク評価の際の便益は利用者の行動と深くかかわっている。旅行時間の信頼性では、旅行時間が通常よりも長くなることの影響が短くなる場合よりも大きい。そのため、分散や標準偏差などの旅行時間が長くなる場合と短くなる場合の影響が等しく扱われる指標は適切でないことも考えられる。人々が旅行時間の変動として認知する尺度と分散が同じであるのか、もしくは近いのか、については反例的な事例の報告がある。Senna<sup>31)</sup>は、BenwellとBlackの研究として、表-1のように平均が同じである10回の旅行時間の計測がある3つの選択肢のうちいずれを選ぶのかの調査を行ったところ、分散が最も大きい選択肢の選択者が過半数で最も多かったことを紹介している。このように分散は必ずしもばらつきの指標として適しているとは限らない。この例は、旅行時間の定時性が最も確保されたとみなせるCを選択したものと考えられる。この結果はその設定条件での結果であり、必ずしも一般性を持っているとは限らないが、少なくとも分散が適切でない状況があり得ることは示唆していると思われる。全ての人間の交通行動を統合的に扱うことができる指標は存在するとは限らないものの、交通行動を考える上で、指標として具備すべき重要な要件をできる限り満たしていることが望ましい。

表-2は(著者が知る)信頼性指標をまとめたものである。なお、表には単にばらつきや変動を定量化した指標も記載しており、それらは変動指標の欄に記載している。表-2では、信頼性指標の使い方の観点から便益計測可能指標、信頼度、その他の3つに分類している。便益計算では、道路ネットワークの便益を貨幣換算で計算する必要があり、容易に貨幣換算可能な指標が便益計測可能指標である。基本的



表-1 分散と選択比率の反例

旅行時間の履歴											平均	分散	選択比率
A	0	0	5	6	8	7	6	4	5	9	5	8.2	38%
B	0	0	0	0	0	0	25	5	10	10	5	60.0	6%
C	0	0	0	0	0	0	0	0	20	30	5	105.0	56%

※ 旅行時間履歴には通常時からの遅れ時間を記載している

表-2 時間信頼性指標

		便益計測可能指標	信頼度	その他	変動指標
旅行時間	時間制約 スケジュール	WTBR, 実効旅行時間, 一般化スケジュールコスト	旅行時間信頼度		
	期待効用	(期待効用)		期待効用	
	統計指標	PT, 各%タイル値, AD			BT, BTI, PTI, $\lambda^{skew}$ , $\lambda^{ver}$ , $UI_r$ , <i>Index normal</i> , <i>Index abnormal</i> , $WRT_A$ , $WRT_B$ , 各種%タイル値の指標, 分散, 変動係数, (歪度)
	総旅行時間		総旅行時間信頼度, $\alpha$ 信頼度		
容量			容量信頼度, (リンク 信頼度)	最大予備 容量	
需要			需要減少信頼度, 需要充足信頼度		

に時間を単位としている。速達性の観点からは、平均旅行時間は極めて重要であり、この便益計測可能指標は、ばらつきや変動が大きくなると、その指標が大きくなるだけでなく、平均旅行時間が長くなると、それに伴い大きくなる。変動指標は旅行時間の変動のみを指標化しているため、そのみでは路線等の良し悪しを評価することには適さない。例えば、旅行時間変動は小さいが平均旅行時間が非常に長い路線は必ずしも良い路線とは言えないからである。一方、便益計測可能指標はそれのみを用いて路線評価などが可能である。なお、括弧内に記載している期待効用（旅行時間ログサム）は単純な変換により時間や貨幣換算が可能である。信頼度は上で述べたように、与えられた条件の下で、所定の時間内に、ある機器が所要の機能を果たすことができる確率で、0.0以上1.0以下の値をとる無次元単位の指標である。

また、表-2では、旅行時間の変動の指標化・定量化のアプローチとして、時間制約・スケジュール、期待効用、統計指標、総旅行時間の4つに分類した。このうち、時間制約・スケジュール、期待効用については、交通行動との関連性も含めて、次節で詳述する。交通行動は（主目的から）派生的に発生するものであり、その前後の行動や主目的の行動から大きな影響を受ける。旅行時間の長短のみだけでなく、その前後の行動や主目的の影響も考慮する必要がある。交通工学では、これを簡便に定量的に扱うために、スケジュールという概念を用い、出発時刻や到着制約時刻を考慮して、スケジュールコストを導入している。

朝倉ら<sup>32)</sup>は、1) 設定した旅行時間（目標時間）以内でトリップをできる確率  $\Pr[T \leq t^*] (= F_T[t^*])$ , 2) 設定した確率（目標到着確率）以上でトリップできる旅行時間  $F_T^{-1}[p^*]$ , の2つの時間信頼性の指標を提案している。ここで、 $\Pr[\cdot]$  は確率を算出するオペレータ、 $F_T[\cdot]$  は  $T$  の累積分布関数、 $F_T^{-1}[\cdot]$  はその逆関数、 $T$  は旅行時間の確率変数、 $t^*$  と  $p^*$  はそれぞれ基準となる旅行時間と確率である。本稿では、JISの信頼度の定義に従い、前者の設定した旅行時間以内でトリップをできる確率を時間信頼度と呼ぶことにする。実効旅行時間、スケジュールコストについては、次節で詳述する。また、Loら<sup>33)</sup>は実際のトリップ時間が旅行時間予算制約（travel time budget）内となる確率を Within Budget Time Reliability (WBTR) と呼んでいる。これは時間信頼度の目標時間が時間予算制約に置き換わっただけと見なせる。また、期待効用についても次節で詳述する。

旅行時間を確率事象とする場合、確率指標としての分散・標準偏差・変動係数が旅行時間のばらつきの指標として用いることができる。また、旅行時間の歪度の重要性も指摘されている(van Lintら<sup>34)</sup>)。旅行時間の統計指標としては、パーセントイル値もよく用いられている。米国交通省道路局(Federal Highway Administration, Department of Transportation)では、旅行時間の信頼性を重要なものと位置付け、その測定指標として、バッファertime (Buffer Time; BT), バッファertimeインデックス (Buffer Time Index; BTI), プランニングタイム (Planning Time; PT), プランニングタイムインデックス (Planning Time Index; PTI) を設

定している.

$$BT = T_{95} - \mu_T \quad (1)$$

$$BTI = \frac{T_{95} - \mu_T}{\mu_T} \quad (2)$$

$$PT = T_{95} \quad (3)$$

$$PTI = \frac{T_{95}}{t_f} \quad (4)$$

ここで,  $T$  は旅行時間の確率変数,  $T_{95}$  は旅行時間の95%タイル値,  $t_f$  は自由走行時間,  $\mu_T$  は旅行時間の平均値である.

英国では, 交通サービスの向上を国民と約束する公共サービス協定 (Public Service Agreement; PSA) を策定し, 道路庁 (Highways Agency) や交通省 (Department for Transport; DfT) がそれぞれ戦略的に重要な道路ネットワーク (strategic road network) と主要都市圏の旅行時間信頼性の向上に取り組んでいる. DfT のテクニカルノートによると, ある区間の最遅 10%の全ての車両の旅行時間の合計をそれらに該当する車両数で除したものを基本に道路サービスの評価を行っている. 本研究では, 英国で用いられている以下の指標を  $AD$  (average delay) と記すことにする.

$$AD = \int_{T_{90}}^{\infty} (t - t^*) f_T(t) dt \quad (5)$$

ここで,  $f_T(t)$  は旅行時間の確率密度関数,  $t^*$  は参照旅行時間 (reference journey time) である. なお, PSA の対象自体には, 道路だけでなく, 鉄道の信頼性向上やバス・LRT の利用促進, 交通事故者数減少, 大気汚染改善, CO<sub>2</sub> 排出削減なども含まれる.

van Lint ら<sup>34)</sup>は, 外れ値や観測誤差の影響を受けやすい分散や歪度の代わりに,  $\lambda^{ver}$  や  $\lambda^{skew}$  という指標, そして, それらを合わせて指標  $UI_r$  を提案している. それぞれの定義は以下の通りである.

$$\lambda^{ver} = \frac{T_{90} - T_{10}}{T_{50}} \quad (6)$$

$$\lambda^{skew} = \frac{T_{90} - T_{50}}{T_{50} - T_{10}} \quad (7)$$

$$UI_r = \begin{cases} \frac{\lambda^{ver} \ln \lambda^{skew}}{L_r} & \text{if } \lambda^{skew} > 1 \\ \frac{\lambda^{ver}}{L_r} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

ここで,  $T_{90}$  は旅行時間の90%タイル値,  $T_{50}$  は50%タイル値,  $T_{10}$  は10%タイル値,  $L_r$  は経路  $r$  の距離である.  $\lambda^{ver}$  は分散,  $\lambda^{skew}$  は歪度に対応している. また,  $UI_r$  は非常に長い旅行時間への遭遇しやすさを意味している.

宗像ら<sup>35)</sup>は, 通常時の状態を50%タイル値で代表させ, それと5%タイル値 ( $T_5$ ) の差を5%タイル値で除して正規化させた指標  $Index_{normal}$  や異常時 (最悪時) の状

態を95%タイル値で代表させ, それと5%タイル値の差を正規化させた  $Index_{abnormal}$  などを提案している. また, 割田ら<sup>36)</sup>は  $T_5, T_{50}, T_{95}$  の3つを用いた  $WRT$  (Wide Range Time) という指標を提案している.  $WRT_A$  は  $T_5^2 + T_{50}^2 + T_{95}^2$  の平方根,  $WRT_B$  は  $T_5, T_{50}, T_{95}$  の3つの積の立法根として定義している.

ネットワーク全体を評価する場合, 総旅行時間を用いることが便利な場合がある. 総旅行時間をもとにした信頼性指標としては, 総旅行時間信頼度 (total travel time reliability) や Chen ら<sup>37)</sup>の  $\alpha$ 信頼性指標などがある. Clark と Watling<sup>38)</sup>は, 確率的ネットワーク均衡モデルを基に総旅行時間の確率密度関数を近似的に算出する方法を示し, 総旅行時間についての信頼度を定義している. 総旅行時間信頼度は, 総旅行時間がある閾値以下となる確率である. 一方, Chen らは総旅行時間の100  $\alpha$ %タイル値を信頼性指標としている. このような総旅行時間に関する信頼性はネットワーク全体の信頼性を考える上で便利であるため, ネットワークデザイン問題に適用されることが多い. ただし, 個々の利用者に関する信頼性は個別的には考慮されないため, 信頼性の高い利用者と低い利用者が混在する可能性がある.

#### b) ファイナンスでのリスク指標と時間信頼性指標

ファイナンスの分野では, リスク指標として, バリュー・アット・リスク (VaR; Value at Risk) が多用されている. VaR は損失分布パーセンタイル値 (分位点) となり, おそらく金融機関等で最も広く用いられている指標であると思われる. 損失分布のパーセンタイル値という信頼水準で超過することのない最大損失額という非常にわかりやすい指標ではあるものの, 整合的なリスク尺度の観点から欠陥があることが指摘されている.

Artzner ら<sup>39)</sup>は, 理論的に整合的なリスク尺度が満たすべき公理として, 平行移動不変性 (translation invariance), 劣加法性 (subadditivity), 正の同次性 (positive homogeneity), 単調性 (monotonicity) の4つをあげ, VaR は一般には劣加法性を満たさないと指摘している. 正の同次性が満たされる場合, 劣加法性と凸性とは同値となることが知られており, VaR は凸性が満たされないと見なせる.

交通均衡理論においても, 特に交通の最適化の観点で, 凸性は非常に重要な性質である. しかし, 交通需要が確率変動し, それに伴い, 旅行時間が確率変動する場合, たとえ平均旅行時間のみにより利用者が経路選択を行ったとしても, 経路旅行時間の凸性は一般には満たされないと予想される. つまり, 平均経路旅行時間ですら, 経路交通量に関して凸になるとは限らず, また, システム最適配分を考える場合, その目的関数

は一般には凸にはならないと予想される。したがって、交通ネットワーク均衡分析の枠組みで、交通容量等が確率変動することによる信頼性を考える上では、交通量（の変動）に対して平均経路旅行時間は凸であるとは限らないため、旅行時間の変動指標が凸性を満たすのか、つまり、旅行時間変動に対する変動指標の凸性はそれほど重要ではないとも考えられる。旅行時間に対する変動指標が凸であったとしても、平均経路旅行時間やシステム最適の目的関数が交通量に対して凸になるとは限らないためである。

パーセンタイル値という指標は、1) 理解しやすい、2) 観測が比較的容易である、3) 費用便益分析等に用いることができる便益指標となり得る、4) 分布の右裾のばらつきのみを考慮することができるという利点がある。一方、i) 劣加法性や凸性を満たさない、ii) 設定した水準（信頼水準）より小さな確率で起こるが、長大な旅行時間の影響を考慮することが出来ないことなどが欠点として考えられる。ただし、交通の分野で考える場合、上で述べたように凸性の重要性はファイナンス分野ほど大きくはないこと、ファイナンスでは損失額が正確に分かる一方、交通では旅行時間の分布の裾を考えるほどデータの精度や量が十分でないことが多いことなどから、ファイナンス分野ほどパーセンタイル値の問題点は大きくないと考えられる。

以上より、本研究では、交通ネットワークの信頼性指標として、旅行時間のパーセンタイル値（分位点）に焦点を当てる。

### c) 旅行時間以外の信頼性指標

旅行時間以外の要因に着目した信頼性指標としては、交通容量に着目したものや交通需要に着目したものがある。Chenら<sup>40)</sup>は、交通ネットワークを流れる交通量が捌けるのかという容量信頼性の概念を提唱している。容量信頼性では、まず、最大フロー問題をまず考える。旧来の最大フロー問題はある断面を流れる最大量などであるが、交通均衡状態を仮定していないため、現在の交通需要の何倍までが交通容量内で流れることができるのかということに着目し、以下のような容量信頼性指標  $\lambda$  を提案している。

$$\begin{aligned} \max \lambda \\ \text{s.t. } x_a(\lambda \mathbf{q}) \leq C_a \quad \forall a \in A \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{q}$  は交通需要ベクトル、 $C_a$  はリンク  $a$  の交通容量、 $x_a(\lambda \mathbf{q})$  は交通需要が  $\lambda \mathbf{q}$  の時のリンク  $a$  の配分リンク交通量、 $A$  はリンク集合である。上の問題の  $\lambda$  が最大予備容量 (maximum reserve capacity) である。なお、 $\lambda$  は式 (6)~(8) でも用いられているが、式 (6)~(8) とは異なる指標である。共に元の論文と同じ文字を使用したため、両方とも  $\lambda$  を用いていることに注意されたい。要求される需要レベルを  $\lambda^*$  とするとき、 $R$

$= \Pr[\lambda \geq \lambda^*]$  が容量信頼度である。Chenら<sup>41)</sup>は、より簡便な容量信頼度  $R = \Pr[x_a \leq C_a | a \in A]$  を提案している。これは、全てのリンクが容量以下となる確率を表している。若林ら<sup>42)</sup>はリンクへの需要がリンクの交通容量を超えない確率をリンク信頼度と定義している。このリンク信頼度は個々のリンクについて信頼度である一方、Chenらはネットワーク内の全てのリンクで交通量が容量を下回る確率を考えている。本研究では、Chenら<sup>43)</sup>を全リンク信頼度と呼ぶことにする。

道路ネットワークのハード部分に問題が生じたり、交通需要が（構造的に）増大した場合、旅行時間が増加する。需要が弾力的な場合、このような旅行時間の増加は需要の減少を引き起こすことになる。交通ネットワークの信頼性の低下がネットワークのサービスレベルに影響し、それに伴い、需要が減少することに着目した信頼性を需要信頼性と呼ぶことにする。DuとNicholson<sup>43)</sup>は、リンクの障害等で需要が減少する割合がある閾値以下となる確率として、需要減少信頼度を定義している。この需要減少信頼度は、ODごとに計算する場合とそれらを集計してネットワーク全体に計算する場合の2つがある。また、Heydeckerら<sup>44)</sup>は、均衡時の交通需要は、顕在化した交通需要であり、顕在化していない交通需要や（現サービスレベルでは）充足できなかった交通需要も存在することに着目し、需要充足信頼性 (travel demand satisfaction reliability) として潜在需要がどれほど満たされるのか、顕在化するかの信頼性を提案している。この指標である需要充足信頼度は、需要充足率がある値以上となる確率として定義されている。容量信頼性とも概念的に近いものとなっているが、容量信頼性は需要を満たすネットワーク能力に焦点が当てられている一方、需要充足信頼性は潜在需要が充足するのかに焦点がある。容量信頼性では、渋滞待ち行列は認められず、需要は固定値である一方、需要充足信頼性は、需要は変化するものとなっている。定式化としては、弾力需要を仮定し、潜在需要イベントが確率的に生じるとする。自由走行時の需要を潜在需要とし、均衡時の需要が顕在需要となる。

### (2) 諸データによる旅行時間信頼性評価

前節で述べた信頼性指標の計算のためには、旅行時間データが必要となる。旅行時間の算出にはいくつかの方法がある。車両感知器データが豊富な場合、感知器の位置を基準に道路区間を設定し、その区間の旅行速度を車両感知器で得られた旅行速度データを直接用いるかもしくは観測交通量からKV曲線等を用いて該当区間の旅行速度を算出することができる。そして、区間旅行時間からタイムスライス法などにより合算して経路や路線の旅行時間を計算することが実務的にも行われている。例えば、川北ら<sup>45)</sup>・飛ヶ谷ら<sup>46)</sup>・足立

ら<sup>47)</sup>は車両感知器データを用いて高速道路の時間信頼性の分析を行っている。また、Lyman と Bertini<sup>48)</sup>も車両感知器データを用いて米国ポートランドの道路の信頼性評価を行っている。

車両感知器データは車両感知器周辺の交通量や旅行速度しか観測ができず、高速道路等の車両感知器が密に設置されている道路以外には適用できないか、精度上問題が出ることになる。その他の手法として、AVIデータ、プローブデータ、ETCデータを用いて旅行時間を計測する方法などがある。野間ら<sup>49)</sup>は、筑波山周辺で調査したAVIデータにより複数区間の旅行時間を推定し、PTやBTIの計算を行っている。AVIにより車両番号が認識できた車両の区間旅行時間を計測するものであるが、AVI機器を設置できた区間のみ旅行時間を計測できる。AVIデータも感知器データ同様機器の設置の制約を受け、AVI機器設置の費用が大きいため、広範囲地域での旅行時間計測は難しいのが現状である。

近年、旅行時間の計測はGPSその他の計測機器を搭載した走行車両(プローブカー)から旅行時間情報を収集する研究が進んでいる。一度に多くの計測機器の搭載許可を効率的に得ることが出来るタクシーや貨物車、バスのデータが多い。プローブデータの特徴としては、1) (車両感知器等の設置の有無によらず) 面的な交通データが得られる、2) 区間旅行時間が得られ、感知器の瞬間旅行速度に比べて観測誤差が小さい、3) 走行経路や走行履歴が分かる、4) 信号待ち時間や右左折時間などが分かる、などの長所がある。一方、i) サンプル数増加のためのコストが大きい、ii) 一般乗用車のサンプルの入手が難しい、iii) 得られたデータから走行経路等を特定するマッチングの精度と手間、などの短所もある。なお、従前より、調査員等が車両に乗り込み、特定路線の旅行時間を計測する手法も用いられてきており、これも一種のプローブカーと言えるが、このような車両はフローティングカーとも呼ばれている。

プローブカーデータ自体の研究は多数行われている。本稿では、信頼性や変動分析も行われたものを以下に取り上げる。上杉ら<sup>50)</sup>は、期待値と分散を知りたい対象経路区間を部分的にでも通過する車両のリンク旅行時間情報を用いた経路旅行時間の期待値及び分散の推定方法についてのシミュレーション研究を行っている。この上杉らの研究が対象とした実験では、期待値をほぼ確実に計算するためには2~3%のプローブ混入率が必要であり、分散では5%程度の混入率が必要であるとの結果であった。

タクシーやトラックのプローブデータを用いた研究としては、李ら<sup>51)</sup>は、名古屋市でのタクシープローブによる旅行時間データの統計分析を行っている。約

1kmほどの区間(桜山-御器所)の旅行時間のみを対象としており、信号等の影響などにより2つのピークを持つ分布となっていること、隣接リンクの旅行時間の相関は0.47とそれほど大きくなかったことなどを報告している。中村ら<sup>52)</sup>は、トラックプローブデータとタクシープローブデータの特徴の比較を行い、トラックプローブデータを用いて、東海地方の12路線のBTIなどの計算を行っている。田宮・瀬尾<sup>53)</sup>はタクシーと小型貨物車のプローブデータを用いて、路線別の95%変動率(旅行時間の95%タイル値と平均旅行時間の比)の分析を行っている。

宇野ら<sup>54)</sup>は、バスプローブデータについて、バス停止に伴う遅れ時間の補正を行い、旅行時間分布の特性や旅行時間信頼性指標の計算などを行っている。区間旅行時間は裾裾が厚く、モード(最頻値)が左に寄った分布形をしていたため、対数正規分布に従うという帰無仮説の検定を行った結果、12区間のうち7区間は帰無仮説は棄却されなかったものの、5区間では棄却された。棄却された原因としては、外れ値の影響や区間旅行時間の推定誤差が影響している可能性を指摘している。

また、車両ではなく、人にGPS機器等を携帯させて、移動軌跡を計測するプローブ・パーソンもある。丹下ら<sup>55)</sup>は、GPS携帯を持った被験者の行動データとも言えるプローブパーソンデータを用いて、旅行時間変動分析を行っている。また、田名部ら<sup>56)</sup>は、プローブパーソンデータにより通勤時間の変動係数の計算などを行っている。

ETC車載率の向上に伴い、高速道路の旅行時間計測では、ETCデータを用いることが可能である。ETC設置の高速道路に限られるものの、タクシー・バス・トラック中心のプローブカーデータに比べて、サンプルの偏りが少ない利点を持つものの、適用範囲が高速道路に限られる。

山崎ら<sup>57)</sup>は、名神高速道路の1年間分のETCデータ(車両流入・流出時刻、流入・流出IC)を用いて、旅行時間分布の特性や旅行時間信頼性指標の計算などを行っている。ETCデータでは、車両の流入・流出時刻が分かるものの、その間の利用経路等の情報は一切得られない。高速道路の場合、サービス・パーキングエリアでの休憩等の時間をどのように扱うのが課題となっており、この山崎らの研究では、平均旅行時間に対して前後標準偏差の範囲、 $1\sigma$ の範囲としている。また、旅行時間の分布にも、時間変動のみならず、季節変動なども含まれることがあることも報告されている。太田ら<sup>58)</sup>は東名・名神高速道路のETCデータを用いて、新名神高速道路供用の影響について、BTなど旅行時間信頼性やその他のサービスレベルの変化について分析

を行っている。Wangら<sup>59)</sup>はETCデータを用いて中央道の旅行時間の95%タイル値やBTなどの算出を行っている。

以上のように、AVIデータ、プローブカーデータ、ETCデータを用いた時間信頼性分析が行われ、分析事例も増えてきている。しかし、それらの研究では、基本的にはその研究者が持っているある1種類のデータの分析のみにとどまっている。分析対象がある1つの路線や限定的な範囲のみの場合、そのような分析で十分なこともあると思われる。しかしながら、各データは長所と短所を併せ持っており、1種類のデータのみで該当都市圏・ネットワーク全体の信頼性分析を行うことは極めて困難である。よって、今後は複数のデータを統合・融合し、それらを統合的に分析し、信頼性評価を行う手法を開発すること、そして、その事例を蓄積し、実用的な手法を構築することが重要と考えられる。

## 5. 信頼性の価値と交通行動モデル

道路ネットワークの信頼性は、基本的には利用者の観点から取り扱われることが多い。道路ネットワークは公共的な性質を有しており、その管理者は利用者の利便性の向上を目指しているからである。道路ネットワークの信頼性の評価では、利用者がネットワークの利用について、何をどの程度求めているのかに大きく依存する。つまり、道路ネットワークの信頼性の計測には、利用者が求めているものの把握が不可欠である。利用者が何を求めているのかを正確・定量的に知ることは難しいため、利用者の交通行動を観察することによって、それを推定することが一つの現実的なアプローチであろう。

人々が時間信頼性をどのように考慮して交通行動を行っているのかについて、これまでに多くの研究がなされている。それぞれの研究では、それぞれの視点でモデルを構築し、そのパラメータの推計などを行っている。これらの研究結果から、人々が道路ネットワークに求める信頼性の水準や（ある信頼性指標に対応した）信頼性の価値を推測することができる。

### (1) 信頼性モデルと信頼性の価値

これまでに行われてきた研究で用いられている時間信頼性を考慮した交通行動モデルは、スケジュールモデル、期待効用モデル、統計値モデルの3つに分類することが可能である。スケジュールモデルは、トリップの前後の活動やその制約（特にトリップ後

の活動）を所与にし、到着制約時刻や到着希望時刻を設定し、実際の到着がその制約時刻や希望時刻からどれほど離れるのかを考慮する。期待効用モデルは、旅行時間そのものに着目し、旅行時間の長短によりその限界効用（単位時間当たりの価値）が異なることを利用している。期待効用モデルは経済学など他分野でも多用されている。一方、スケジュールモデルは、交通が主目的の派生需要であるという特性に着目したものである。主目的や主活動が予定通り行うことができなくなることの不効用がその派生行動である交通行動から生じる可能性があるため、信頼性に価値が生じる。つまり、スケジュールモデルでは主目的・主行動の関連から信頼性を取り扱う一方、期待効用モデルでは、旅行時間自体から信頼性をモデル化している。統計値モデルは標準偏差など旅行時間のばらつきの指標を直接用いて、信頼性を考慮するものである。

#### a) スケジュールモデル

スケジュールモデルは、もともと Gaver<sup>60)</sup>や Vickrey<sup>61)</sup>から始まる出発時刻選択の理論研究の流れを受け継いだものである。到着制約時刻や到着希望時刻がある利用者がそれに遅れることや逆に早まり、時間損失が生じることを考慮している。このモデルのスケジュールコスト  $C_s$  は

$$C_s = \alpha t + \beta SDE + \gamma SDL + \theta d_L \quad (10)$$

ここで、 $\alpha, \beta, \gamma, \theta$  は正のパラメータ、 $t$  は旅行時間、 $SDE$  は希望到着時刻から早まって到着した場合のその時間（早着ではない場合は0）、 $SDL$  は希望到着時刻から遅れた場合のその遅れ時間（遅刻でない場合は0）、 $d_L$  は遅刻ダミー（遅刻の場合は1で、その他は0）である。また、遅れた場合、予定のスケジュールを遂行できなくなり、再度スケジュールをプランニングする必要があるなど余分なコストが生じるため、Nolandら<sup>62)</sup>は上式にプランニングコストの項を付加している。

これらの研究の流れの中で、Hall<sup>63)</sup>は実効旅行時間（efficient travel time）を提案している。旅行時間の不確実性が高い場合、遅刻を避けるため、利用者はセイフティマージンを取り、出発時刻を早めると考えられる。このようなセイフティマージンを含んだ旅行時間が実効旅行時間である。旅行時間が正規分布に従う場合、このセイフティマージンは経路旅行時間の標準偏差に比例し、実効旅行時間  $c_{ij}$  は以下のようになる。

$$c_{ij} = m_{ij} + \eta s_{ij} \quad (11)$$

ここで、 $c_{ij}$  はODペア  $i$  の経路  $j$  の実効旅行時間、 $m_{ij}$  はODペア  $i$  の経路  $j$  の（経路）旅行時間の平均、 $s_{ij}$  はODペア  $i$  の経路  $j$  の（経路）旅行時間

表-3 既存研究での信頼性比の推定結果

著者	年	対象	調査	信頼性比	変数	備考
1 BlackとTowriss	1993	英	SP	0.55	SD	SP調査に問題があると指摘されている
2 Abdel-Atyら	1996	米	SP	1.00	SD	最も適合の良いモデルの結果
3 Nolandら	1998	米	SP	1.27	SD	
4 CalfeeとWinston	1998	米	SP	1.20	混雑時間価値	旅行時間が正規分布と仮定・変換
5 Smallら	1999	米	SP	1.89	SD	最も適合の良いモデルの結果
6 LamとSmall	2001	米	RP	1.49	SD	最も適合の良いモデルの結果
7 Hensher	2001	豪	SP	1.12	混雑時間価値	旅行時間が正規分布と仮定・変換 (超混雑10%)
8				1.25	混雑時間価値	旅行時間が正規分布と仮定・変換 (超混雑20%)
9 Copleyら	2002	英	SP	1.30	SD	
10 Smallら	2005	米	RP	1.08	80%値-50%値	旅行時間が正規分布と仮定し, 変換
11 BrownstoneとSmall	2005	米	RP	0.96	遅れ時間	変換
12 de Jongら	2007	蘭	SP	2.40	SD	小サンプルの試行調査
13 阪神高速	2007	日	RP	0.84	余裕時間	認知旅行時間の80%タイル値を正規分布との仮定のもと変換(公表前資料より)
14 AsensioとMatas	2008	ス	SP	0.98	SD	同じデータからの推定と思われるAsensioとMatas <sup>76)</sup> では1.08と推定

の標準偏差,  $\eta$  はセイフティマージン (あるいはリスク態度) に関するパラメータである。

b) 期待効用モデル

期待効用モデルは、経済学等で標準的に用いられているモデルであり、旅行時間の非線形効用関数を仮定し、変動する旅行時間の期待効用を用いるモデルである。交通の分野でも Senna<sup>31)</sup>などがそのモデルを用いてパラメータ推定を行っている。

$$E[u(T)] = \int_{-\infty}^{\infty} u(\omega) f_T(\omega) d\omega \quad (12)$$

ここで、 $u(\cdot)$  は効用関数、 $T$  は旅行時間の確率変数、 $f_T(\cdot)$  は旅行時間  $T$  の確率密度関数、 $E[\cdot]$  は期待値をとる演算である。

期待効用モデルは、単位旅行時間の効用 (限界効用) が時間の長短にかかわらず一定ではなく、それが変化することによって、リスク態度を表現する。つまり、信頼性を考慮した行動を記述することができる。この単位旅行時間の効用 (限界効用) の変化は、交通の分野では、混雑の度合いによって、時間価値が変化するとして捉えることができる。

Calfee と Winston<sup>64)</sup>は、米国で行った SP 調査によって、時間価値の推定を行い、混雑時の時間価値は非混雑時の約 3 倍であったと報告している。Hensher<sup>65)</sup>は、SP 調査による時間価値の研究を行った。その中で最も適合性の高いモデル (尤度が大きいモデル) では、混雑時 (速度低下時) の時間価値は通常時の 2.47 倍、超混雑時 (進んだり、止まったりを繰り返す状態) は 5.82 倍の時間価値である。Wardman<sup>66)</sup>や Small ら<sup>67)</sup>も混雑時は時間価値が上がる

ことを指摘している。また、Steimetz<sup>68)</sup>は、交通密度の価値を推定し、交通密度が減少することに価値があることを報告している。以上のように、混雑により時間価値が増加することが明らかになっていると言える。

これまで、交通の分野では、スケジュールモデルにより信頼性を捉えようとする試みが多かった。スケジュールモデルでは、到着制約時刻や到着希望時刻の存在が前提となり、それがないもしくは希薄な自由目的トリップでは、信頼性への価値はないことになる。しかし、上で述べた混雑による時間価値の変化は到着時刻制約や希望到着時刻がない人々に対しても見られる普遍的な特性を考えられるため、全ての人、どのような目的のトリップにおいても信頼性は重要であることを示唆している。また、スケジュールモデルの観点からは、到着制約が厳しいほど、信頼性の価値が大きいことになり、通勤行動は他よりも信頼性が重視されると考えられがちである。しかし、それに反する結果も報告されている。例えば、前述の Senna の推定では、到着制約のある通勤では、リスク選好との結果となっている。この理由としては、通勤者は毎日同じ経路を使っており、旅行時間の分布を熟知しているためやその 70% の人は遅刻してもペナルティがないことが影響しているのではないかとしている。

c) 統計値モデル

統計値モデルは、効用関数に旅行時間の項だけでなく、旅行時間の分散や標準偏差などそのバラつき

に関する統計値の項を含んだモデルである。95%タイル値はこの平均やばらつきを同時に考えた統計値であり、このようなものを用いるモデルも統計値モデルに含まれることとする。

平均と分散を用いるものはファイナンスの分野でも古くより用いられてきている。旅行時間の効用関数が二次関数を仮定する場合、その旅行時間が変動する場合の期待効用は一次モーメントと二次モーメント、つまり、平均と分散で表現できるため、先に述べた期待効用モデルと平均分散モデルとは関連性がある。また、既に述べた実効旅行時間は平均と標準偏差により構成されており、形式上は統計値モデルと言える。このようにスケジュールモデル、期待効用モデル、統計値モデルは必ずしも排反ではなく、互いに関連している部分もある。

## (2) 信頼性比

### a) 信頼性比とは

時間信頼性を評価する上で、旅行時間の変動が減少することにどれほどの価値があるのかは極めて重要である。それは、1) 旅行時間の変動を定量化する指標、つまり、信頼性指標を決めること、2) その指標により計測された旅行時間の変動が1単位減少することもしくは信頼性が1単位向上することの価値を設定すること、の2つを決めることにより、可能となる。

これまで(平均)旅行時間の減少の価値、つまり、時間価値に関する研究は幅広く行われてきている。信頼性の価値は時間価値との対比によって考えることが可能である。信頼性の価値を意味するVoR(Value of Reliability)と(平均)旅行時間の価値を意味するVoT(Value of Time)の比である信頼性比(Reliability Ratio) (= VoR/VoT)は一つの重要な指標となる。

### b) 既存研究での推定信頼性比

これまでに行われた信頼性を考慮した交通行動のパラメータ推定や信頼性の価値の研究のうち、標準偏差に対する信頼性比に換算できたものをまとめたのが表-3である。既に述べたように、どのような指標により信頼性や旅行時間変動を計測しているのかは重要であり、同じ交通行動を観測したとしても、異なった指標によって計測すると、その指標ごとに信頼性比の値自体は異なってくる。本稿では、信頼性の価値としては、単位標準偏差(SD)に対する価値とする。SDを変数に入れ、パラメータ推定を行っている研究については、そのSDに対するパラメータと(平均)旅行時間のパラメータの比が信頼性比である。SDを変数としていない研究のうち、旅行時

間を正規分布と仮定すると、単位標準偏差(SD)の価値へ変換可能なものは変換することとする。なお、前章で述べたように、旅行時間は必ずしも正規分布とは限らないため、この変換には誤差やバイアスが含まれていることに注意が必要である。この変換の誤差・バイアスの弊害よりも、信頼性の価値を整理する上で、1つでも多くの研究結果を整理・比較できることが重要と考え、このようにしている。なお、対数正規分布を仮定することも考えられるが、対数正規分布を仮定した変換のためには、旅行時間の平均と分散など個々の研究対象の被験者が経験した旅行時間分布の平均と分散などが必要となり、対数正規分布を仮定することは困難であった。一方、正規分布は数理的に好ましい性質を持つため、これらの情報なくして変換可能となっている。

信頼性比を扱った研究として、Batesら<sup>69)</sup>の論文には、RohrとPolakはバスの旅行時間と待ち時間の信頼性比はそれぞれ1.6と1.3であったことを紹介している。NolandとPolak<sup>70)</sup>では、BlackとTowriessによる報告書では信頼性比は0.70で、自動車のみのデータの場合、それは0.55と報告されていることを紹介している。なお、前出のNolandらは、BlackとTowriessの信頼性比が小さいのは、安全余裕時間(セイフティマージン)を明示的に取り扱っていなかったため、本来あるべき信頼性の価値がスケジュール調整に含まれてしまい、過小評価となったと指摘しており、また、前出のBatesらも設問の設定が悪かったためではないかとしている。

Smallらはロサンジェルス市の自動車通勤者に対するSP調査を実施し、SD換算での信頼性比を1.27と推定している。この結果は、Nolandら<sup>62)</sup>として公表されている。その後、Smallらは2500人を対象にした大規模なSP調査を行った。その報告書<sup>67)</sup>では、スケジュールモデル・統計値モデルについて、様々な変数を取り入れたモデル推定を行っている。標準偏差を変数に入れた統計値モデルでの信頼性比は1.86、2.47、2.80となっており、最も適合度が高い(対数尤度が大きい)のが1.86であった。ここでは、平均旅行時間が10分前後の設定であり、それに比べて旅行時間のばらつきが大きいことが他の研究より、信頼性比が大きく推定されたと思われる。なお、この報告書で、Smallらは(文献レビューやこれまでの経験も踏まえてと思われるが)信頼性比は1.3程度が妥当な数値ではないかとも記載している。

Abdel-Atyら<sup>71)</sup>は、自動車の経路選択に関するSP調査の分析を行っている。3つのモデルにより分析を行っているが、最も適合度の良いモデルの結果では、信頼性比は1.0となっている。他の2つのモデ

ルの信頼性比はそれぞれ 1.08 と 2.10 であった。

Lam と Small<sup>72)</sup>は、カリフォルニア州道 91 号のデータを用いて、時間価値や信頼性の価値を推定している。経路選択のみを考慮したモデル推定をいくつか行い、信頼性比は 1.39, 1.46, 1.43, 1.49, 1.51 であった。1.49 のモデルの適合度が最も良く、信頼性比は 1.4 から 1.5 とされる。信頼性の評価指標としては、モデル適合度の観点から、標準偏差よりも 90% タイル値から 50% タイル値を引いたものの方が良く、また、平均よりも中央値の方が若干良かったとしている。

Copley と Murphy<sup>73)</sup>は英国で SP 調査を行い、信頼性比は 1.3 であったと報告している。de Jong ら<sup>74)</sup>は、本調査を行う前のパイロット調査という位置づけで、15 人から 66 の質問を得て、それを分析した結果、信頼性比は 2.4 であったことを報告している。Asensio と Matas ら<sup>75)</sup>は、スペインのバルセロナで SP 調査を行い、パラメータ推定を行っている。推定されたパラメータから、信頼性比は 0.98 であることが分かる。なお、Asensio と Matas ら<sup>76)</sup>でも同じデータでの推定結果を発表しており、そこでは信頼性比は 1.08 となっている。

Small ら<sup>77)</sup>は、カリフォルニア州道 91 号の有料車線と無料車線の選択の RP データ及び SP データの分析を行っている。80% タイル値から 50% タイル値を引いたものを信頼性指標として用いている。その RP データの分析結果について、旅行時間は正規分布に従うと仮定すると、信頼性比は 1.08 と計算できる。Brownstone と Small<sup>78)</sup>は、カリフォルニアの有料道路(州道 91, State Route 91; 州間道 15, Interstate 15, I-15)を対象とした一連の研究について、時間価値及び信頼性の価値の観点からまとめている。距離と時間価値は逆 U の関係、信頼性と料金やその他個人属性(就業時間の柔軟性、性別、収入)と相互作用があると、時間価値や信頼性の価値は個人属性やその他の変数により大きくばらつくとしている。また、推定結果より、10 分の予期せぬ遅れのパラメータと 1 分あたりの旅行時間のパラメータの比は、24 程度(3つのモデルで、24.0, 24.8, 24.2)であったため、遅れ 1 分/通常旅行時間 1 分は約 2.4 で、遅れ 1 分は通常の 1 分の 2.4 倍の価値がある。SDL パラメータを 2.4 倍とするスケジュールモデル、旅行時間は正規分布と仮定し、旅行時間を正規化する。 $\int_0^{\infty} z f_z(z) dz = 0.399$  が平均遅れ時間(正規化後)であり、それを 2.4 倍すると、0.958 で遅れの期待価値となる。正規化後の旅行時間の標準偏差は 1.0 であるため、標準偏差を用いた信頼性比は 0.958 と換算できる。ただし、 $f_z(z)$  は標準正規分布の確率密度関

数である。なお、スケジュールモデルを仮定した場合、遅刻ペナルティは考えていないため、過小推計の可能性はある。Calfee と Winston<sup>64)</sup>と Hensher<sup>65)</sup>の結果も同様に正規分布を仮定し、SD 換算の信頼性比を算出することができる。それらの結果は表-3 の通りである。

阪神高速道路が行った調査では、685 人のサンプルのうち、約 6 割の利用者が 80% タイル値±5 分を実効旅行時間(平均旅行時間+余裕時間)としていることが判明し、設定阪神高速道路の利用者が想定している実効旅行時間は 80% タイル値としている。旅行時間を正規分布と仮定すると、SD 換算の信頼性比は 0.84 となる。

### c) 信頼性比の推定研究のまとめ

表-3 より、信頼性比は 1 から 1.5 程度と思われるが、1.2 程度の研究が多いようである。つまり、旅行時間の標準偏差を 1.0 分減少させるのは、平均旅行時間を 1.2 分減少させるのと同等の効果がある。ただし、各推定には誤差があると同時に、既に述べたように、SD を変数としない推定結果を SD 換算する際に旅行時間分布を正規分布と仮定しているため、実際の旅行時間が正規分布からかけ離れている場合、変換後の値には誤差やバイアスが含まれることになる。したがって、これらのことに留意して、信頼性比の推定結果を解釈する必要がある。

既に述べたように、時間信頼性を考慮した経路やネットワークの便益指標として、旅行時間のパーセントイル値(分位点)は妥当な考えである。上で述べた既存研究より、利用目的や利用状況、国・地域を問わず、一般的な状況での信頼性比は 1.2 程度と思われる。これに基づくと、(正規分布を前提とし)それに対応する 85% タイル値(より正確には 88.5% タイル値)を用いることが一つの妥当な考え方と思われる。昨今、我が国では、道路整備を始めとした公共事業に対する世論が批判的であることを考えると、道路整備を過大に評価する可能性があることに対しては慎重に取り扱う必要があると思われるため、90% タイル値ではなく、85% タイル値とした。この 85% タイル値は、海外の研究を中心にレビューした結果導出したものであること、信頼性の価値はトリップ目的やその他の状況により大きく異なるものであると思われ、それは一般的・平均的な自動車利用状況下での値と考えられることなどに注意が必要である。日本での研究蓄積が少ない現時点での暫定的な目安であると言える。今後、日本での研究蓄積やトリップ目的別の推定などさらなる研究の進展が必要とされている。



## 6. おわりに

本研究では、求められる機能によって、道路交通の信頼性を連結信頼性・時間信頼性・走行信頼性の3つに分類した。本稿では、時間信頼性について、1) 交通量や旅行時間等の変動分析、2) 信頼性指標、3) 信頼性が交通行動に与える影響や信頼性の価値のこれまでの研究の整理、を行った。

交通量や旅行時間の変動分析の既存研究の整理によって、交通量や旅行時間の変動要因や変動特性が明らかになった。時間信頼性を考える上では、特に旅行時間の変動が重要であるが、旅行時間を数理的に用いやすい正規分布と仮定することは適切でない場合が多いと考えられ、非負の右裾の厚い対数正規分布のあてはまりがよいとする研究があるものの、どのような分布が適切なのかは今後詳細に検討すべき課題である。

時間信頼性指標としては、これまで様々なものが提案されており、費用便益分析等で用いることを念頭に、これらを整理した。この整理を踏まえ、本研究では、設定した水準(信頼水準)より小さな確率で起こる長大な旅行時間の影響を考えることが出来ないなどの欠点はあるものの、1) 理解しやすい、2) 観測が比較的容易である、3) 費用便益分析等に用いることができる便益指標となり得る、4) 分布の右裾のばらつきのみを考慮することができるという利点がある旅行時間のパーセンタイル値が指標として妥当と提案するに至った。

道路管理者は利用者の利便性の向上を目指しており、道路交通の信頼性は、基本的には利用者の観点から取り扱われることになる。したがって、利用者が道路利用について、どのようなことをどの程度求めているのかが極めて重要であり、それに基づいて、信頼性を評価する必要がある。これに資する研究として、人々が時間信頼性をどのように考慮して交通行動を行っているのかについて、これまでに多くの研究がなされている。本研究では、これらの研究で用いられているモデルをスケジュールモデル、期待効用モデル、統計値モデルの3つに分類し、それぞれのモデルの特徴などを整理した。

また、信頼性の価値を把握するために、これまでの推定結果をまとめた。旅行時間の変動を標準偏差としてモデルのパラメータ推定を行う研究が多いため、標準偏差を旅行時間変動指標として、それ以外の指標を用いている推定結果については標準偏差指標に変換し、これまでに行われた研究の旅行時間標準偏差が1単位向上する価値と通常的时间価値との比である信頼性比を整理した。その結果としては、

信頼性比は1.2程度が妥当と推認される。これより、時間信頼性を考慮した道路の便益評価には、旅行時間の85%タイル値を用いればよいということになる。旅行時間の85%タイル値については、一般的・平均的な自動車利用の場合であること、海外の研究のレビューから導いたものであり、今後国内の研究事例の蓄積により検証する必要があることなどに注意が必要である。

時間信頼性を考慮した道路の便益評価としては、旅行時間の85%タイル値の減少分を合計し、それに時間価値を乗じることを提案する。つまり、通常費用便益分析で用いられる単なる(確定的もしくは平均的)旅行時間の減少の代わりに旅行時間の85%タイル値の減少を用いることである。これに従前の走行費用減少分や交通事故減少分を付加することによって、時間信頼性を考慮した道路の便益を算出することができる。なお、具体的な85%タイル値の計算方法については別の機会に発表する予定である。

本稿では、道路整備等の便益評価に時間信頼性を取り入れることを念頭に道路利用者の信頼性の価値についてレビューを行ったが、道路利用者にとっては、実際に道路の信頼性が向上することが非常に重要である。信頼性を向上させるための施策や各道路や路線の信頼性をどのように道路利用者に伝えるのかといった別の視点からの信頼性研究のレビューについては今後別の機会に発表したい。

**謝辞:** 本研究は、科学研究費補助金 20760344 (若手研究 B, 研究代表・中山晶一郎) の援助により行われているものである。ここに記し、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) (財)日本規格協会: JIS 工業用語大辞典第4版, (財)日本規格協会, 1995.
- 2) 北村隆一: 変動についての試行的考察, 土木計画学研究・論文集, No. 20, pp.1-15, 2003.
- 3) 池之上慶一郎: 交通量の変動, 技術書院, 1966.
- 4) 朝倉康夫, 柏谷増男, 熊本伸夫: 日リンク交通量変動の推定にもとづく道路網信頼性評価, 土木計画学研究・講演集, No. 13, pp.591-598, 1990.
- 5) 星埜和: 交通工学ハンドブック(第1版), 技報堂出版, 東京, 1984.
- 6) 道路交通データブック改訂委員会: 改訂道路データブック, 交通工学研究会, 1988.
- 7) 飯田恭敬, 高山純一, 本田誠: 金沢市における積雪の交通量に及ぼす影響分析, 第6回交通工学研究発表会論文集, pp.49-51, 1982.

- 8) 岡田知朗, 川野祥弘: 首都高速道路の渋滞特性分析, 第19回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 21-24, 1999.
- 9) 中村一雄, 中田明雄, 岡崎征, 高阪悠二, 北村武次: 交通量変動特性の統計分析, 第3回交通工学研究発表会論文集, pp. 63-66, 1976.
- 10) 井上英彦, 塚井誠人, 奥村誠: カレンダー情報を利用した本四架橋交通量の時系列分析, 土木計画学研究・論文集, No. 20, pp. 843-848, 2003.
- 11) 井上英彦, 塚井誠人, 奥村誠: 本四架橋交通量に基づく休日交通パターンの分類, 第23回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 217-220, 2003.
- 12) 日野泰雄, 西村昂, 西田智一: 変動特性を考慮した簡易交通量予測モデルについて, 第8回交通工学研究発表会論文集, pp. 27-29, 1986.
- 13) 飯田恭敬, 高山純一: 高速道路における交通量変動特性の統計分析, 高速道路と自動車, Vol. 24, pp. 22-32, 1981.
- 14) 曹圭錫, 谷下雅義, 鹿島茂: 東京都内幹線道路における日交通量の特性分析, 第18回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 153-156, 1998.
- 15) 小坂浩之, 曹圭錫, 谷下雅義, 鹿島茂: 首都高速道路の日交通量の変動分析, 第19回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 17-20, 1999.
- 16) 安野貴人, 都明植, 小林潔司: 高速道路における日変動交通量系列の定常性に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No. 20, pp. 913-916, 1997.
- 17) 堤昌文, 樗木武: 交通輸送需要の時系列予測システムとAROPモデル, 土木学会論文集, No. 407/IV-11, pp. 17-26, 1989.
- 18) 村上康紀, 吉井稔雄, 桑原雅夫: 都市高速道路におけるOD交通量の日変動に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 22, pp. 251-254, 1999.
- 19) 田中芳和, 村上康紀, 井上浩, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 小根山裕之: 首都高速道路におけるOD交通量の日変動に関する研究, 交通工学, Vol. 36, pp. 49-58, 2001.
- 20) 松葉一弘, 松本幸正, 野村耕司: 都市高速道路ランプ間OD交通量の時間変動と情報提供による変化, 土木学会年次学術講演会講演概要集IV部門, Vol. 57, pp. 815-816, 2002.
- 21) Herman, R. and Lam, T.: Trip time characteristics of journeys to and from work, *Transportation and Traffic Theory: Proceedings of the Sixth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, D.J. Buckley Ed., University of New South Wales, Sydney, Australia, 26-28 August, Elsevier, pp. 57-85, 1974.
- 22) Richardson, A.J. and Taylor, M.A.P.: Travel time variability on commuter journeys, *High Speed Ground Transportation Journal*, Vol. 12, pp. 77-99, 1978.
- 23) Montgomery, F.O. and May, A.D.: Factors affecting travel times on urban radial routes, *Traffic Engineering & Control*, Vol. 28, pp. 452-458, 1987.
- 24) 大山尚武, 重田清子, 松本俊哲, 池之上慶一郎: 確率変数としての旅行時間の特性について, 第3回交通工学研究発表会論文集, pp. 79-82, 1976.
- 25) Smeed, R.J.: Traffic studies and urban congestion, *Journal of Transport Economics & Policy*, Vol. 2, pp. 33-70, 1968.
- 26) Smeed, R.J. and Jeffcoate, G.O.: The variability of car journey times on a particular route, *Traffic Engineering and Control*, Vol. 13, pp. 238-243, 1971.
- 27) Willumsen, L.G. and Hounsell, N.B.: Simple models of highway reliability: supply effects, *Travel Behaviour Research: Updating the State of Play*, Ortuzar J.D.D. & Hensher, D.A. eds., pp. 249-262, 1998.
- 28) 竹内宏文, 巻上安爾, 清水敬司: 高速道路の交通流動と旅行時間の変動についての調査研究, 第15回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 1-4, 1995.
- 29) 島田宗和, 廣島康裕: 時刻別道路交通状態の日間変動実体と旅行時間の要因分析, 土木学会年次学術講演会講演概要集IV部門, Vol. 53, pp. 610-611, 1998.
- 30) 割田博, 古田寛: 首都高速道路における所要時間変動特性の分析, 第22回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 61-64, 2002.
- 31) Senna, L.A.D.S.: The influence of travel time variability on the value of time, *Transportation*, Vol. 21, pp. 203-228, 1994.
- 32) 朝倉康夫, 柏谷増男, 熊本仲夫: 交通量変動に起因する広域道路網の信頼性評価, 土木計画学研究・論文集, No. 7, pp. 235-242, 1989.
- 33) Lo, H.K., Luo, X.W., Siu, B.W.Y.: Degradable transport network: Travel time budget of travelers with heterogeneous risk aversion, *Transportation Research*, Vol. 40B, pp. 792-806, 2006.
- 34) 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*, Vol. 42A, pp. 258-277, 2008.
- 35) 宗像恵子, 割田博, 岡田知朗: 首都高速道路における所要時間の信頼性指標を用いた事業評価事例, 土木計画学研究・講演集, Vol. 37, CD-ROM, 2008.
- 36) 割田博, 坪田隆宏, 船岡直樹, 宗像恵子: 都市高速道路を対象とした旅行時間信頼性による新たな評価手法の研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, CD-ROM, 2009.
- 37) Chen, A., Kim, J., Zhou, Z. and Chootinan, P.: Alpha reliable network design problem, *Transportation Research Record*, No. 2029, pp. 49-57, 2007.
- 38) Clark, S. and Watling, D.: Modelling network travel time reliability under stochastic demand, *Transportation Research*, Vol. 39B, pp. 119-140, 2005.

- 39) Artzner, P., Delbean, F., Eber, J.-M. and Heath, D.: Coherent measures of risk, *Mathematical Finance*, Vol. 9, pp. 203-228, 1999.
- 40) Chen, A., Yang, H., Lo, H.K. and Tang, W.H.: A capacity related reliability for transportation networks, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 33, pp. 183-200, 1999.
- 41) Chen, A., Chootinan, P. and Wong, S.C.: New reverse capacity model of signal-controlled road network, *Transportation Research Record*, No. 1964, pp. 35-41, 2006.
- 42) 若林拓史, 飯田恭敬, 井上陽一: シミュレーションによる道路網の交通量変動分析とリンク信頼性推定法, 土木学会論文集, No. 458/IV-18, pp. 35-44, 1993.
- 43) Du, Z.P. and Nicholson, A.: Degradable transportation systems: Sensitivity and reliability analysis, *Transportation Research*, Vol. 31B, pp. 225-237, 1997.
- 44) Heydecker, B.G, Lam, W.H.K. and Zhang, N.: Use of travel demand satisfaction to assess road network reliability, *Transportmetrica*, Vol. 3, pp. 139-171, 2007.
- 45) 川北司郎, 北澤俊彦, 飛ヶ谷明人, 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研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 35, CD-ROM, 2007.
- 46) 飛ヶ谷明人, 石橋照久, 田名部淳, 朝倉康夫: 旅行時間信頼性指標と既存の渋滞評価指標との比較～阪神高速道路の事例～, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 37, CD-ROM, 2008.
- 47) 足立智之, 藤川謙, 朝倉康夫: 代替経路を持つ高速道路区間の所要時間信頼性に関する実証分析, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 37, CD-ROM, 2008.
- 48) Lyman, K. and Bertini, B.L.: Using travel time reliability measures to improve regional transportation planning and operations, *Transportation Research Record*, No. 2046, pp. 1-10, 2008.
- 49) 野間真俊, 奥谷正, 井坪慎二, 前川友宏: 交通量自動観測機器を用いた一般道の時間信頼性分析～筑波山交通調査を事例に～, 土木計画学研究・講演集, Vol. 35, CD-ROM, 2007.
- 50) 上杉友一, 井料隆雅, 小根山裕之, 堀口良太, 桑原雅夫: 断片的なプローブ軌跡の接合による区間旅行時間の期待値と分散の推定, 土木計画学研究・論文集, No. 20, pp. 923-929, 2003.
- 51) 李強, 姜美蘭, 森川高行: 幹線道路リンクごとに集計されたプローブカー旅行時間データの特徴分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 32, CD-ROM, 2005.
- 52) 中村俊之, 中嶋康博, 牧村和彦, 井坪慎二: トラックプローブデータを用いた旅行時間信頼性指標に関する一考察, 土木計画学研究・講演集, Vol. 35, CD-ROM, 2007.
- 53) 田宮佳代子, 瀬尾卓也: プローブカーデータを利用した路線別旅行時間の変動特性に関する分析, 土木学会年次学術講演会講演概要集 IV 部門, Vol. 57, pp. 769-770, 2002.
- 54) 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, 土木計画学研究・論文集, No. 23, pp. 1019-1027, 2006.
- 55) 丹下真啓, 土谷宏巖, 田名部淳, 井坪慎二: プローブパーソン調査結果を用いた旅行時間変動と個人行動に関する基礎的検討, 土木計画学研究・講演集, Vol. 35, CD-ROM, 2007.
- 56) 田名部淳, 朝倉康夫, 井坪慎二: 所要時間変動と経路選択の関係性に関する実証分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 35, CD-ROM, 2007.
- 57) 山崎浩気, 宇野伸宏, 倉内文孝, 嶋本寛, 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評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 25, pp. 935-945, 2008.
- 58) 大田修平, 山崎浩気, 宇野伸宏, 塩見康博: ETC データを用いた所要時間信頼性に基づく新規高速道路供用効果分析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, CD-ROM, 2009.
- 59) Wang, R., Warita, H. and Kuwahara, M.: Travel time reliability analysis by ETC data, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, CD-ROM, 2009.
- 60) Gaver, D.P.: Headstart strategies for combating congestion, *Transportation Science*, Vol. 2, pp. 172-181, 1968.
- 61) Vickrey, W.S.: Congestion theory and transport investment, *American Economic Review*, Vol. 59, pp. 251-260, 1969.
- 62) Noland, R.B., Small, K.A., Koskenoja, P.M. and Chu, X.: Simulating travel reliability, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 28, pp. 535-564, 1998.
- 63) Hall, R.W.: Travel outcome and performance: The effect of uncertainty on accessibility, *Transportation Research*, Vol. 17B, pp. 275-290, 1983.
- 64) Calfee, J. and Winston, C.: The value of automobile travel time: implications for congestion policy, *Journal of Public Economics*, Vol. 69, pp. 83-102, 1998.
- 65) Hensher, D.A.: Measurement of the valuation of travel time savings, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 35, pp. 71-98, 2001.
- 66) Wardman, M.: A review of British evidence on time and service quality valuations, *Transportation Research*, Vol. 37E, pp. 107-128, 2001.
- 67) 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, National Cooperative Highway Research Program Report 431, National Academy Press, Washington, D.C., 1999.
- 68) Steimetz, S.S.C.: Defensive driving and the external costs of

- accidents and travel delays, *Transportation Research*, Vol. 42B, pp. 703-724, 2008.
- 69) Bates, J., Polak, J., Jones, P. and Cook, A.: The valuation of reliability for personal travel, *Transportation Research*, Vol. 37E, pp. 191-229, 2001.
- 70) Noland, R.B. and Polak, J.W.: Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues, *Transport Review*, Vol. 22, pp. 39-54, 2002.
- 71) Abdel-Aty, M.A., Kitamura, R. and Jovanis, P.P.: Investigating effect of travel time variability on route choice using repeated-measurement stated preference data, *Transportation Research Record*, No. 1493, pp. 39-45, 1996.
- 72) Lam, T.C. and Small, K.A.: The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment, *Transportation Research*, Vol. 37E, pp. 231-251, 2001.
- 73) Copley, G. and Murphy, P.: Understanding and valuing journey time variability, *Proceedings of European Transport Conference*, CD-ROM, 2002.
- 74) de Jong, G., Tseng, Y., Kouwenhoven, M., Verhoef, E. and Bates, J.: The value of travel time and travel time reliability: Survey design, Final report, 2007.
- 75) Asensio, J. and Matas, A.: Commuters' valuation of travel time variability, *Transportation Research*, Vol. 44E, pp. 1074-1085, 2008.
- 76) Asensio, J. and Matas, A.: An empirical of the travel time reliability for commuters in Barcelona, *Proceedings of European Transport Conference*, CD-ROM, 2006.
- 77) Small, K.A., Winston, C. and Yan, J.: Uncovering the distribution of motorists' preferences for travel time and reliability, *Econometrica*, Vol. 73, pp. 1367-1382, 2005.
- 78) Brownstone, D. and Small, K.A.: Valuing time and reliability: assessing the evidence from road pricing demonstrations, *Transportation Research*, Vol. 39A, pp. 279-293, 2005.
- (2010. 2. 4 受付)

## A REVIEW ON TRAVEL TIME RELIABILITY OF ROAD TRANSPORTATION

Sho-ichiro NAKAYAMA

These days, providing reliable road transportation services is required. The reliability of road transportation can be classified into connectivity reliability, travel time reliability and safety/comfort reliability according to required functions. The travel time reliability is concerned in this study. The variability of traffic flow and travel time is reviewed, and travel time reliability indices proposed in previous studies and their properties are organized. Travel behavior models with travel time reliability are classified, and the value of travel time reliability is examined based on the estimation results of the models. Then, a method for travel time reliability benefit is proposed. This would be helpful for cost-benefit analysis with reliability or road traffic management which increases the reliability.