

ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究 の諸相・展望とその便益評価の一考察

中山 晶一朗¹

¹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

本論文では、ネットワークレベルでの道路交通の信頼性を対象とし、まず、連結信頼性と脆弱性のこれまでに行われた研究の整理を行う。そして、ネットワークレベルでの信頼性の評価の際に必要な交通量や旅行時間が確率変動する確率的交通均衡モデルやシミュレーション手法の分類・整理を行い、今後の課題をまとめる。次に、信頼性向上施策や信頼性を考慮したネットワークデザイン問題に関する研究を整理する。最後に、本信頼性研究のレビューを踏まえて時間信頼性・連結信頼性を統合した道路整備等の便益評価の一手法を提案するとともに、信頼性研究の今後の課題について述べる。

Key Words : *network reliability, vulnerability, reliability benefit, stochastic equilibrium models*

1. はじめに

交通は人やモノの移動であり、通常、道路・鉄道・航空路線・船舶路線等のネットワーク上を移動する。特に、道路は密にネットワークが形成されており、道路交通の信頼性の分析では、ネットワーク全体で評価することが不可欠である。局所的な速度低下や特定 OD の需要増加などはネットワークを通じて広範囲に影響を及ぼすからである。

旅行時間などのデータがあれば、道路や路線の旅行時間の信頼性を取り扱うことができる。しかし、道路ネットワークが大規模である場合、ネットワーク全体で旅行時間データを得ることは非常に大きなコストが必要であり、それは現実的ではないことも多々ある。そこで、利用可能な少数のデータを基にネットワーク全体の旅行時間変動を再現するモデルが必要とされる。

近年、公共事業の事業評価を厳密に行う必要があり、道路整備等の評価では費用便益分析を行うことが求められることが多くなっている。現時点での日本の道路の費用便益マニュアルでは、主要な便益として、旅行時間減少、走行費用減少、交通事故減少の3つが取り上げられている。しかし、その他にも便益として算定すべき要因はあり、環境への影響や信頼性は特に重要とされている。したがって、より適切で精緻な道路整備や道路施策の評価のためには、旅行時間の信頼性や連結信頼性の便益を均衡配分の枠組みでネットワーク

レベルで算出することは極めて重要であると言える。

旅行時間の信頼性が重要であるのは、旅行時間が不確実であり、到着制約時刻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ことなどに起因する。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。また、到着制約時刻や希望到着時刻が明確にはない場合でも、交通やトリップは主目的活動の派生需要であり、旅行時間が不確実であると、その主目的活動を遂行する上でスケジュールが乱れることになり、(少なくとも心理的には)旅行時間の変動は望ましくはない。以上のように、旅行時間の信頼性が低いと、様々な経済的・社会的・心理的な損失が発生、もしくは発生し得ることとなる。本稿では、このような旅行時間に関する信頼性を時間信頼性と呼ぶことにする。このような時間信頼性を費用便益分析にも取り入れる必要がある。

費用便益分析等において、均衡配分(ワードロップ均衡)等の配分を行う場合、後述するが、あるノードペア間が道路整備などにより新たに連結されることによって発生する便益を十分には加算できないことがある。ノードペア間が他の(以前から存在する)経路により連結されており、それらの経路の所要時間が新規道路よりも短い場合などが該当する。それは、新たに連結された経路は、所要時間が長い場合、用いられな

いからである。しかしながら、ノードペア間が新たに連結されることにより、何らかの便益が発生するはずである。その一つが連結信頼性の向上である。もしある経路が何らかの理由（事故・工事・災害等）で通行できなくとも、他の連結された経路があることでそのノードペア間の往来が可能となる。このような場合、新たに連結されたことによる便益が発生していることが分かる。また、事故やその他の要因により、通常用いられる経路の旅行時間が大幅に長くなる場合、もし代替経路があるならば、そちらを使えば、早く到着することが可能となる。このように、信頼性の観点から見ると、ノード間が密に連結されるほど信頼性は高まる。このように道路整備による連結信頼性や時間信頼性の向上効果は無視できないと考えられるが、通常行われる均衡配分（ワードロップ均衡）を用いた費用便益分析ではそれを便益として正確に取り扱うことはできない場合がある。費用便益分析に連結信頼性・時間信頼性をどのように取り込むかは重要な課題である。

以上のように、個々のリンクや経路、路線の旅行時間分布や連結性のみならず、ネットワークレベル（ネットワーク全体）で道路交通の信頼性を扱うことは重要である。本稿では、ネットワークの連結に関する信頼性である連結信頼性だけでなく、時間信頼性をネットワークレベルで捉える研究の整理・レビューを行い、今後のネットワークレベルでの信頼性研究の発展に資すると共に、これまであまり試みられなかった連結・時間信頼性を統合した便益評価の一手法を提案する。

本稿では、ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の整理として、第2章で連結信頼性と脆弱性のこれまでの研究の整理を行い、第3章で道路ネットワーク全体での時間信頼性の評価手法の整理と特徴をまとめ、第4章において、信頼性を用いたネットワークデザインや信頼性向上のための施策のこれまでの研究の整理を行う。そして、第5章で時間信頼性と連結信頼性の統一的な評価指標の提案を行い、第6章で結論をまとめるとともに今後の展望を示す。

2. 連結信頼性とその評価

(1) 連結信頼性

本節では、ノードペア間が連結されており、その間の移動が可能かという観点での信頼性である連結信頼性について述べる。

a) 連結信頼性指標

連結信頼性は、これまでノード間信頼度¹⁾とリンク信頼度¹⁾の2つの信頼度によって指標化されている。ノード間信頼度はノード間が走行可能な確率で

あり、リンク信頼度は当該リンクを走行可能な確率である。なお、より広い連結性の定義として、あるサービスレベル以上での走行可能な確率として連結信頼度を定義することも可能である。

基本的には、連結信頼度はノード間もしくはリンクに対して定義される。ネットワークレベルで連結信頼性を考える際には、ネットワークのODペア集合が分かっている場合は全ODペア間で移動可能な確率としてネットワーク信頼度を定義できる。これは構造関数¹⁾と呼ばれることもある。ODペア集合を特定できない場合、全リンクが同時に走行可能な確率をネットワーク信頼度とすることがある。

上で述べた連結信頼度が最もよく用いられる連結信頼性指標であるが、その他にも連結信頼性指標はある。連結の度合いはOD間を移動できるかどうかだけでなく、幾通りの経路で移動できるのかということも重要である。ただし、経路間には多くの重複するリンクが含まれる場合もあり、経路数を考える場合経路間重複を考慮する必要がある。瀬戸ら²⁾は、全ODペアに非重複経路が最低N本存在するというN-edge-connected networkの概念³⁾を援用し、道路ネットワークの連結性（接続性）の評価を行っている。このようにノード間を連結する経路数に着目するのと類似の概念として冗長性がある。複数・多数のリンク途絶に焦点を当て、他の途絶の条件付き連結確率の情報エントロピーとしての冗長性指数などが提案されている⁴⁾。また、連結する確率とは異なった観点として、アベイラビリティによる信頼性評価も提案されている⁵⁾。ここでのアベイラビリティとは、信頼性工学用語としてのアベイラビリティで、利用可能な時間比率を意味する。確率ではなく、リンク等が途絶した場合それが復旧するまでの時間を算定し、連結している時間比率に着目する観点である。

Bell・Schmöcker⁶⁾は、最小費用経路を選択した場合にリンク障害に遭遇しない確率としての遭遇信頼度（encountered reliability）を提案している。交通量にかかわらず旅行時間が変化しない（リンク旅行時間が定数となっている）非混雑（uncongested）なネットワークを考える場合、利用者の行動（交通量や旅行時間）を取り扱う必要はない。

連結信頼性は、基本的にはノード間が少なくとも一つの利用可能な経路で結ばれているのかというノード間連結を取り扱うものである。現実的には、あるノード間が連結はしていてもその連結している経路が非現実的な程度に迂回する超長な経路のみの場合、それは実質的には連結しているとは言えないとも考えられる。この観点は、単に連結しているのか、否か、だけでなく、ある一定のサービスレベルの範

圏内で連結しているのか、否か、を取り扱うというものである。朝倉ら⁷⁾は、(平常時ネットワークでの最短距離に対して)許容できる迂回限界範囲でOD間トリップが可能である確率として連結信頼度を定義し、若林ら⁸⁾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。これらも連結信頼性の拡張と言えるが、交通量が交通容量を超えない等のサービスレベル内で走行できる確率を扱うものであるため、単に連結しているのかどうかだけでなく、あるサービスレベルを確保した上での連結性が扱われている。なお、このような連結性に混雑度合いを考慮することは川上⁹⁾などの初期の研究からも見られるが、これを理論的に適切に扱うためには、交通ネットワーク均衡モデルの適用が必要となることに注意が必要である。

ネットワークの連結信頼度の観点から、どのリンクが重要であるのかについても研究がなされている。若林¹⁰⁾は、(ノード間)連結信頼度 R をリンク a の(リンク)信頼度 r_a で偏微分した $\partial R/\partial r_a$ を確率重要度と呼んでいる。このように個々のリンクの重要度は、ネットワークの信頼性指標の偏微分として与えることができ、信頼性を考慮したネットワークデザイン問題ではそれは重要な働きをする。

b) 信頼度の算出法

小林¹¹⁾及び若林・飯田¹²⁾は道路ネットワークの信頼度の計算を最小パス法(ミニマル・パス法)及び最小カット法(ミニマル・カット法)を用いて行った。最小パス法では、ノード間を結ぶ全てのパス(経路)が同時に通行できなくなることはない確率を求めるものである。また、最小カット法とは、あるノードペアに着目し、リンク途絶が発生するとそのノード間の通行ができなくなるカットの集合(カットと呼ばれるネットワークを二分する直線上リンク集合)を求め、その全てのカットの通行ができる確率を求める方法である。これら2つの方法は直感的に理解しやすいものの、どのように最小パスやカットの集合を求めるのが問題となる。その計算は組み合わせ的であり、ネットワークが大きくなるにつれて、計算量は指数関数的に増大する。交通工学分野では、これらの近似的な計算法がいくつか発表されている。飯田・若林¹³⁾は、部分的な最小パス・カット集合を利用し、ブール演算でネットワーク信頼度の上限値と下限値を求める方法(ブール演算法)を提案した。また、飯田ら¹⁴⁾は、パスによる近似値とカットによる近似値はそれぞれのパス・カット数に応じて単調に増加する性質を用い、それらの曲線の交点として信頼度を求める交点法を提案している。若林ら¹⁵⁾は、一般・直接的なサンプリングにより信

頼度を算出する直接モンテカルロ法とサンプリング領域を限定することで推定値(推定信頼度)の分散を減少させることができる分散減少モンテカルロ法の2つの方法の解説を行っている。ブール演算法は数学的根拠があるものの、ネットワークが大きくなるにつれてその上限・下限値を求めることが難しくなるため、大規模なネットワーク計算では、交点法やモンテカルロ法の実用性が高いとされ、交点法の信頼度の計算精度はモンテカルロ法に比べて優れているとは言えないものの、ネットワークの増大に対する計算量の増加は比較的小さく、より実用であるとされる¹⁶⁾。

大規模ネットワークの信頼度の計算のために、その近似計算ではなく、ネットワーク自体を簡略化・集約化するアプローチもある^{17),18)}。ネットワークを階層化し、連結信頼度を計算することも行われている¹⁹⁾。また、考慮する経路をあらかじめある定数(n とする)のみと固定し、 n 番目最短経路探索などでそれらの経路が全て連結する確率によって計算することも行われている²⁰⁾。ネットワークの集約・単純化、階層化、経路選択枝集合は交通均衡分析の一般的な問題でもあり、これまでの交通均衡分析での研究蓄積を用いることも可能である。また、木俣・石橋²¹⁾は、その2つのノードを除去すれば非連結となるノードペアを用いて、ネットワークを分割して、信頼度を効率的に計算する方法を紹介している。

(2) 脆弱性

連結信頼性と類似した脆弱性(vulnerability)という概念がある。1995年に起きた阪神淡路大震災により、交通ネットワークが構造上の壊滅的な被害を被ったと共に、その機能上でも様々な甚大な影響があったため、交通ネットワークの脆弱性が注目されるようになった。

脆弱性の定義は確立されているとは言えないものの、Taylorら²²⁾は、D'Este・Taylor^{23),24)}など一連の研究を踏まえ、脆弱性研究が対象とするものとして、疎なネットワークでは、非常に小さい確率で生じるが、その影響が非常に大きい事象を取り扱う、ネットワークの構造上の脆弱さが重要であるとし、特に欠損等が発生すると甚大な影響が出るクリティカルなリンクがどこであるのかが問題となるとしている。また、脆弱なノードとは、少数のリンクが欠損した場合、深刻なアクセシビリティの低下が生じるノード、臨界リンク(クリティカル・リンク)とは、欠損した場合、深刻なアクセシビリティの低下を引き起こすリンクと定義した。Berdica²⁵⁾は、脆弱性を道路ネットワークサービスを大幅に低下させる事象に

に対する感受性 (susceptibility) として定義している。

Jenelius ら²⁶⁾は重要性 (importance) とエクスポージャー (exposure) という概念を導入した。いずれも重要さであるが、重要性は一つのリンクに対してのものであり、エクスポージャーは (複数のリンクが損傷することを含めた) シナリオに対してのものである。

Lleras-Echeverri・Sanchez-Silva²⁷⁾は、脆弱性をネットワークの形だけでなく、アクティビティやマネジメントなど他側面からも考慮されるとし、アクセシビリティで脆弱性を計測している。アクセシビリティとしては、一般化コストを使っている。Sohn²⁸⁾は、人口と距離を用いたアクセシビリティにより、洪水に対する脆弱性の検討を行い、Chang・Nojima²⁹⁾及びChang³⁰⁾は、単純距離 (ネットワークのリンク長の合計)、距離のみを使ったアクセシビリティ指標、距離と (災害前の) OD 交通量を使ったアクセシビリティ指標の3つにより、災害時の交通計画について考えている。Chen ら^{31),32)}は、交通行動を非集計モデルで定式化し、そのログサムにより計測している。

以上の既存研究を踏まえると、脆弱性は、生起する確率が非常に小さい事象であるものの、発生した場合甚大な被害・損害が生じることがあるカストロフ性をも対象としていると言える。このような場合、生起確率を厳密に把握し、それを考慮して、期待的な被害・損害を考えることにあまり意味を見い出せない。なぜなら、生起確率が小さい場合のその確率を正確に計測することは極めて困難で、推定・計測の誤差は数桁単位となることも多々あるからである。甚大な被害・損害をもたらすカストロフ的災害等は生起確率の大小にかかわらず、何らかの対策が必要であると考えられ、逆にそのようなカストロフ性は期待値の範疇では捉えられないため、確率論の俎上に載せず、交通ネットワークが機能を果たす上での「弱さ」のみを対象とする場合、それを脆弱性と呼んでいる。以上ではこれまでの脆弱性の研究をまとめているが、生起確率を陽に扱った研究はなく、甚大な被害・損害を引き起こす事象が生じた場合のアクセシビリティの低下等を対象としているものが多い。連結信頼性と脆弱性のモデリング上の違いは確率論の俎上にあるのかどうかであろう。

3. ネットワークレベルの旅行時間確率変動モデル

前章では、ネットワークの連結に関する信頼性について述べた。道路交通のネットワークレベルのサービスレベルとしては、ネットワークが連結しているのかだけでなく、旅行時間の長短等も重要である。

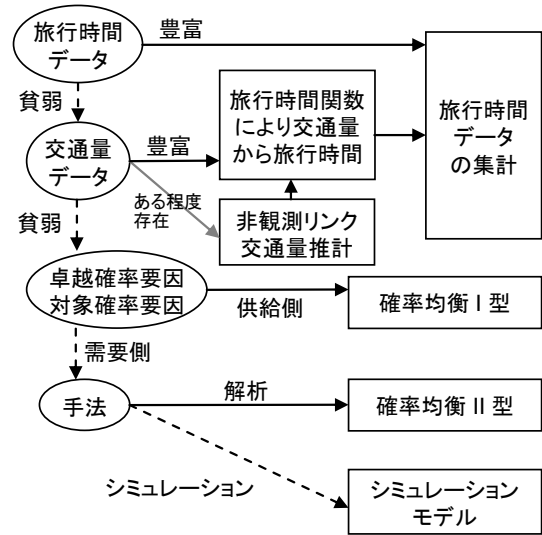


図-1 ネットワークレベルでの旅行時間変動評価法の分類

第1章で述べたように、道路整備などによる連結性の向上の便益を算定するためには、単にリンクが連結しているだけでなく、時間信頼性の向上も考慮する必要がある。時間信頼性は、旅行時間の変動に対するものであり、便益評価の方法としては、まず、旅行時間の変動の確率分布を把握し、それをもとに時間信頼性指標を計算し、それをを用いて時間信頼性向上便益を算出することが考えられる。本章では、ネットワークレベルでの時間信頼性の便益評価での各リンクの旅行時間分布の推定についてこれまでの研究の整理・レビューを行う。なお、時間信頼性指標を計算し、それをを用いて時間信頼性向上便益の算出の部分については第5章で述べる。

旅行時間データがネットワーク全体で豊富にある場合、旅行時間分布の把握は容易である。しかし、ネットワークの隅々に渡り旅行時間データが直接得られることは稀であり、それには膨大なコストが必要となることが多い。豊富な旅行時間データが存在しない場合、交通量データを用いることが考えられ、それも利用できない場合は、確率均衡配分やシミュレーションを用いる方法が考えられる。図-1はネットワークレベルでの旅行時間分布の推定方法を分類したものである。

交通量データがある程度利用可能な場合、観測されたリンク交通量を元に非観測リンクの交通量を推計し、それをを用いて旅行時間を算出する方法もある。朝倉ら³³⁾は観測リンク交通量から非観測リンクを含むネットワークのリンク交通量を推計するモデルを開発し、それをを用いて、日々の観測データを用いた交通量の変動を推定し、信頼性分析を行っている。また、高山・飯田³⁴⁾や外井・天本³⁵⁾などの他の非観測リンク交通量推定モデルを用いて信頼性分析を行

うことができる。非観測交通量推定モデルは配分モデルに比べて計算コストが小さいことが利点である。

旅行時間データや交通量データからではネットワーク全体の信頼性指標の計算が難しい場合やより作業量を抑え、効率的に行いたい場合、確率均衡モデルやシミュレーションモデルを用いることができる。供給側、つまり、交通容量等のリンク特性が原因の場合、例えば駐車車両の有無によるあるリンクの容量低下は（渋滞長が次のリンクまで伸びることなどがなければ）他リンクに影響しないなどリンク間で独立に旅行時間の確率変動を設定することが可能な場合も多い。そのような場合は取り扱いが比較的容易で、既存の確定的均衡配分手法の若干の拡張により対応することができる。したがって、その場合にはシミュレーションを用いることの優位性はそれほど高くないと考えられる。

(1) 確率均衡モデルの確率要因

交通ネットワーク均衡の確率モデルには幾つもの種類がある。その分類では、何を確率的に取り扱うのか、何が確定的に取り扱われるのかが重要である。

代表的なネットワーク均衡モデルとして知られる確率的利用者均衡モデルで確率的に扱われているものが何であるのかは少々複雑である。確率的利用者均衡モデルは、ランダム効用モデルによる経路選択を取り入れたネットワーク均衡モデルである。ランダム効用モデルによって算出された経路選択確率に比例して「確定的」に経路交通量を配分するのが確率的利用者均衡モデルである。確率的利用者という名称であるものの、この利用者の経路選択は確率的ではなく、確定的な経路選択として単にランダム効用モデルを用いたのみであると言える。したがって、確率的利用者均衡モデルでは、経路選択は確定的であるため、経路交通量も確定的であり、リンクや経路の実際の旅行時間（実旅行時間）も確定的となる。ただし、利用者が経路選択する際の知覚・認知旅行時間は確率的であると見なせる場合がある。経路選択でのランダム効用 U を $-\theta t + \varepsilon$ とする場合、 ε を旅行時間のばらつきとみなすことも不可能ではない。ここで、 t は旅行時間、 ε はランダム項、 θ はパラメータである。しかし、これはあくまで知覚・認知旅行時間が確率的であり、配分された交通量による実旅行時間が確率的であるわけではない。また、経路の長さにかかわらずランダム項の分散が変化しない場合、ランダム項が旅行時間のばらつきを表しているという解釈は論理・理論的な問題があり、それは人間の知覚誤差などと解釈されるべきものであろう^{36),37),38)}。よって、経路選択でのランダム効用モ

デルの誤差項を旅行時間分布やそれに類するものとして取り扱うことは適切ではないと言える。

これまでに交通量や実旅行時間が確率的に変動するとした交通均衡モデルが開発されている。本稿では、実際の旅行時間が確率的に扱われている均衡を「確率均衡」と呼ぶことにする。なお、この確率均衡は確率的利用者均衡とは異なるものである。

確率均衡モデルは、交通量の確率的な変動はないものの、天候や駐車車両の有無などが原因で交通容量や自由走行時間が変動し、実旅行時間が確率変動することを扱ったモデルと交通需要の変化や経路選択の変動により交通量自体が確率変動を行い、それに伴い旅行時間も確率変動するモデルの2つのタイプに分けることができる。本研究では、前者を確率均衡Ⅰ型、後者を確率均衡Ⅱ型と呼ぶことにする。

この確率均衡モデルは、確率的利用者均衡とは異なり、実旅行時間は確率変動するが、定式化やモデルの数理部分は確定的な交通均衡モデルの枠組みを維持している。大枠を壊さず、確定的な交通均衡モデルを旅行時間等が確率変動することを取り扱えるように発展させたものと言え、交通均衡モデルの確率化である。確定的な交通均衡モデルの研究蓄積や経験は膨大であり、これを用いることは実用化の観点からは重要である。一方、定式化やモデル自体を新たな確率的アプローチで行うことも可能である。確率過程、マスター方程式、確率微分方程式など用いて、定式化やモデル化自体までも変え、確率化を行うことである。交通均衡モデルの確率化としては、確率的利用者均衡モデルなどへ部分的に確率的な要素を取り入れたモデル、旅行時間が確率的な扱われ、整合的に確率を扱った確率均衡モデル（確率均衡Ⅰ型とⅡ型）、定式化・モデル化自体も確率的なアプローチを取り入れたモデルの3段階に分けられよう。

(2) 確率均衡モデル

本節では、前節で触れた確率均衡モデルについて詳述する。上述の通り、本研究では、確率均衡モデルは、交通量の確率的な変動はないものの、天候や駐車車両の有無等が原因で交通容量や自由走行時間が変動し、実旅行時間が確率変動することを扱った確率均衡Ⅰ型と交通需要や経路選択の変動により交通量自体が確率変動を行い、それに伴い旅行時間も確率変動する確率均衡Ⅱ型の2つのタイプに分ける。

確率均衡Ⅰ型は、個々のリンクに何らかの変動が生じるものであり、通常、リンク間の変動は独立と仮定されている。したがって、個々のリンク旅行時間がある分布に従うとし、その和として経路旅行時間の分布を算出することは比較的容易である。旅行時

表-1 これまでの確率均衡モデル

注) D: 確定的, S: 確率的

分類	著者等	確率要因	交通量	定式化	経路選択基準	備考
確率均衡I型	Yin & Ieda (2001)	リンク関連	D	相補性	期待効用	
	Lo & Tung (2003)	交通容量	D	相補性	平均旅行時間	
	Yin et al. (2004)	リンク関連	D	相補性	期待効用	動的モデル
	Lo et al. (2006)	交通容量	D	相補性	実効旅行時間	マルチクラス
	Watling (2006)	事故等	D	変分不等式	遅刻ペナルティ	
確率均衡I型	Shao et al. (2006)	交通需要	S	変分不等式	実効旅行時間	マルチクラス
確率均衡II型	Watling (2002a)	経路選択	S	不動点	平均旅行時間	
	Watling (2002b)	交通需要, 経路選択	S	不動点	平均旅行時間	
	Nakayama & Takayama (2003)	交通需要, 経路選択	S	相補性	期待効用	
	中山ら(2004)	経路選択	S	最適化	平均旅行時間	
	中山ら(2006)	交通需要	S	最適化	平均旅行時間	情報提供効果分析
	中山・高山(2006)	交通需要, 経路選択	S	相補性・不動点	実効旅行時間	
	Lam et al. (2008)	交通需要, 天候	S	不動点	実効旅行時間	
	内田 (2009)	交通需要, 交通容量	S	相補性	実効旅行時間	プロビットモデル

間を正規分布に従うと仮定すると、その和の分布も正規分布であり、さらに取り扱いが容易になる。一方、交通需要や経路選択の変動により、交通量自体も確率変動する場合、リンク旅行時間はリンクごとで独立であるとは仮定しにくい。したがって、リンク間の共分散も考慮する必要がある。リンク旅行時間の平均については、個々のリンクの旅行時間の平均を単純に足し合わせるだけで算出可能であるが、分散に関しては、共分散が存在するため、一般に個々のリンク旅行時間の分散の和は経路旅行時間の分散にはならない。なお、リンク間の独立が成り立っている場合は可能である。このように交通量自体も確率変動する場合はリンク旅行時間の共分散を取り扱う必要があり、取り扱いが一段と難しくなる。よって、本稿では、確率均衡 I 型と II 型に分類し、リンク旅行時間の共分散を考慮するモデルを II 型としている。なお、リンク容量の変動と交通量の変動の両方を扱うモデルは交通量の変動に付随し、リンク旅行時間の共分散を扱わざるを得ないため、II 型とする。表-1 はこれまでに一般ネットワークに対して定式化された確率均衡モデルである。

a) 確率均衡 I 型

Yin ら³⁹⁾は、Yin & Ieda⁴⁰⁾を拡張し、旅行時間が正規分布に従うとした確率均衡の定式化を行っている。ただし、リンク旅行時間変動の原因については特に記載はない。経路選択はスケジュールモデルを二次近似して得られた期待効用に基づいたものとなっている。また、離散時間でポイントキューを用いた動的モデルの提案も行っている。

Lo & Tung⁴¹⁾は、交通容量が一様分布に従って確率変動する場合の確率均衡の定式化を行っている。特徴としては、平均旅行時間を元に経路選択を行うものの、旅行時間の信頼性が過度に低い（旅行時間が

ある基準範囲を超える確率が閾値以上となる）経路を選択しないという経路選択基準を取り入れている。しかし、この信頼性が過度に低い経路を選択しないという行動基準ゆえに、経路集合の制約付き相補性問題として定式化され、計算ステップ毎に経路集合が変化し、計算の収束上問題が生じる可能性がある。また、解の存在や一意性の検討もなされていない。

Lo ら⁴²⁾は、Lo & Tung⁴¹⁾とは別の交通容量が確率変動する場合の確率均衡モデルを提案している。彼らは Travel Time Budget と呼んでいるが、実質的にはほぼ実効旅行時間（平均旅行時間とセイフティ・マージンの和）と同じものに基づいた経路選択となっている。なお、リスク態度に関するマルチクラスも扱っている。

Watling⁴³⁾は、遅刻ペナルティを考慮した確率均衡モデルの定式化を行っている。交通量は確定的であるものの、旅行時間は正規分布としている。なお、混合正規分布も取り入れられている。変分不等式問題として定式化を行われ、解の存在と共に経路旅行時間の単調性が仮定されれば解が一意であることを証明している。

Shao ら⁴⁴⁾は、マルチクラスで交通需要の変動を考慮した確率均衡モデルの研究を行った。しかし、交通量はリンク間で独立と仮定され、確率均衡 II 型とは分類できない。ただし、交通需要の変動や経路・リンク交通量の変動を考慮しているため、交通量の変動を取り扱わない I 型の亜種とした確率均衡 I'型とする。モデルとしては、実効旅行時間をもとに経路選択が行われ、変分不等式として定式化されている。解の存在は示されているものの、一意性については触れられていない。

一般ネットワークへの定式化は行われていないが、Mirchandani & Soroush⁴⁵⁾はリンクの走行時間関数として BPR 関数を採用し、その自由走行時間が確率的に変動した場合の確率的利用者均衡について分析を行っている。問題設定等から判断して、一般ネットワ

ークについて定式化可能であり、経路選択の方法によっては解は一意になると思われる。また、飯田・内田⁴⁶⁾及びUchida・Iida⁴⁷⁾は、実効旅行時間を用いた交通量配分の概念を提案した先駆的な研究である。飯田・内田らは、そのような配分をリスク利用者均衡配分(risk user equilibrium assignment)と呼んでいる。

b) 確率均衡 II 型

リンク交通量が変動する場合、該当リンクの交通量のみが変動するというのは非常に考えにくく、隣接・近隣の交通量もあわせて変動するだろう。したがって、交通量変動を扱う場合、リンク間の交通量変動の共分散を考慮する必要がある。同じく経路交通量・OD 交通量の変動を仮定する場合もリンク交通量の共分散を考慮する必要がある。既に述べたように、リンク交通量やリンク旅行時間の共分散を考慮する確率均衡モデルは確率均衡 II 型である。

確率均衡 II 型は I 型に比べて取り扱いが一層難しい点がある。一つは既に述べたように、経路旅行時間の分散がリンク旅行時間の分散の和とならない点である。これによって、解の一意性の保証されるモデルが非常に限定される。これは、リンクに相互干渉がある均衡モデルの解の一意性は一般には保証されず、共分散の存在はリンクの相互干渉と同様の効果があるためである。数理的には、目的関数のヘシアンや変分不等式・相補性問題のヤコビアンが正定値行列になりにくいことに起因する。様々な要因を取り入れ、モデルを複雑にすることは可能であるが、解が一意的なモデルとして、どこまで確率要因を取り入れることができるのか、また、非常に強い仮定を設けずに定式化やその数理特性を解明できるのかが確率均衡 II 型の研究のポイントであると思われる。

Watling³⁷⁾は、確率的利用者均衡を経路選択確率の通りに確率的に交通量を配分するモデルに発展させている。離散選択モデルから算出される経路選択確率通りに確率的に経路選択が行われる場合、経路交通量は多項分布に従う。経路交通量が多項分布に従う場合の確率均衡の定式化を厳密に行っているため、リンク旅行時間の共分散も考慮されている。ただし、このモデルは、一つの OD ペアのためのネットワークでは解の一意性が保証されているが、それ以外の一般的なネットワークでは一意性が保証されないという問題を持つ。そのため、解の存在範囲を解析的に導出している。

中山ら³⁸⁾は、経路選択が確率的に行われる場合、大規模ネットワークでは経路交通量がポアソン近似できることに着目し、Watling³⁷⁾のモデルを発展させた解が一意的なモデルを提案している。特徴としては、最適化問題として定式化している点である。

さらに、中山ら⁴⁸⁾は、交通需要が正規分布に従って変動していると仮定し、リンク・経路交通量が正規分布に従う確率均衡モデルの研究を行っている。

1) 交通需要が独立で、分散がその平均のある定数倍であり、2) 経路選択が平均旅行時間に基づいて行われると仮定しているため、最適化問題として定式化できている。交通需要の分散がその平均のある定数倍であるという仮定は限定的であり、確率構造の設定の自由は低いが、最適化問題として定式化されており、その定式化はワードロップ均衡とほぼ同様の形であるため、実用的にも十分適用可能な点が特徴である。また、緊急車両への情報提供の効果分析へ拡張し、金沢ネットワークでの評価を行っている。

Watling⁴⁹⁾およびNakayama・Takayama⁵⁰⁾は、仮想リンクを導入することにより、確率的な経路選択のみで交通需要の確率変動も扱っている。潜在需要を固定し、仮想リンクを選択した利用者はトリップを行わない利用者となる。ただし、このような設定では、交通需要は二項分布に従うため、二項分布の分散はその平均値よりも大きくはできないため、交通需要の分散を自由に設定することが出来ない。中山・高山⁵¹⁾は、この問題点を解消した交通需要・経路選択の両方の確率変動を考慮した確率均衡モデルを提案している。なお、このモデルでは、確率構造の自由度は大きく、理論的にも精緻であるものの、最適化問題ではなく、不動点問題として定式化されている。

Lam ら⁵²⁾は、天候の不確実性を考慮した確率均衡モデルを構築している。天気予報により、事前にある程度の情報があり、ある程度の予測が可能であるため、ベイズ推論により、天気予報の情報を獲得した後の事後確率を用いて確率配分を行っている。天候のうち降雨を対象とし、降雨の程度により旅行時間関数(BPR 関数)の補正も行っている。モデルの基本構造は前出のShaoらと同じであるが、リンク間独立の緩和と天候要因導入が発展した点である。

内田⁵³⁾は、Clark・Watling⁵⁴⁾のポアソン変動の交通需要の枠組みを拡張し、交通需要と共に交通量がポアソン分布に従う確率均衡モデルを提案した。このモデルでは、交通容量の確率変動も考慮している。また、経路選択としては、プロビットモデルを採用している。なお、交通量はポアソン分布に従うため、平均旅行時間によって経路選択する場合、中山ら³⁸⁾が示したように最適化問題として定式化可能である。

小林⁵⁵⁾は、合理的期待仮説^{56),57)}に基づいた交通ネットワーク均衡を提案している。この均衡では、道路利用者の期待・認知する旅行時間分布と実際の旅行時間分布が一致していることが特徴である。このように小林の合理的期待均衡は、旅行時間は確率分

布として取り扱われ、旅行時間の不確実性を考慮した均衡と考えられる。このモデルでは、均衡へ至るプロセス等も解明され⁵⁸⁾、また、ゲーム理論との整合性も図られている。そして、道路利用者の期待(認知)を陽に取り扱っており、行動論的基礎から精緻にモデル化されていることが特長と言えよう。しかし、現段階では、単純ネットワークへの適用に留まり、一般ネットワークへの適用までには至っていないようである。また、衛ら⁵⁹⁾は、確率的利用者均衡の確率化として、利用者は確率変動する知覚旅行時間が最小となる経路を選択するという条件下で交通量を確率的に扱うモデルを提案している。大規模ネットワークへの適用は課題としているが、MCMC(マルコフチェーンモンテカルロ法)を用いた計算法も提案している。

(3) 確率的利用者均衡モデルの応用

これまでに確率的利用者均衡を応用した研究も行われている。井上ら⁶⁰⁾は、確率的利用者均衡を用いて道路ネットワークの時間信頼性度の算出を行っている。知覚旅行時間が正規分布に従うものの、交通量や実旅行時間は確定的であると、プロビット型確率利用者均衡を応用している。その応用点は、知覚旅行時間の分散は平均の定数倍と設定したことである。また、感度分析により、リンクの重要度を与えた。なお、問題点としては、確率要因が認知旅行時間の変動となっていることであり、本来は、災害や需要等の実体的な変動要因を扱うことが自然である。また、確定的旅行時間が大きくなるに応じて、その分散も大きくなるため、旅行時間は大きくとも分散が小さい経路などを考慮することは出来ない。確率的利用者均衡の修正モデルとして、Hazelton³⁶⁾は、自分の選択結果以外が条件的に与えられた中で、経路選択を考える必要があると指摘し、conditional SUE(条件付き確率的利用者均衡)を提案している。

Asakura⁶¹⁾は、確率的利用者均衡を用いて、減損した(degraded)ネットワークの信頼性について研究している。減損したリンクの情報はあいまい・不確実であるため、誤差項を考慮するロジットモデルによりネットワーク利用者の行動を取り扱っており、配分は確率的利用者均衡としている。そして、情報提供の効果分析にもそれを用いている。

(4) その他の確率モデル

Cascetta⁶²⁾と Cascetta・Canterella⁶³⁾は、マルコフ連鎖を用いた動的モデルを構築しているが、その定常状態は確率的交通量を持つ均衡であると解釈でき、旅行時間の不確実性を考慮した均衡分析に応用でき

る可能性があると言える。

Waller・Ziliaskopoulos⁶⁴⁾は、chance constrained programming(確率制約計画)の概念をセル伝搬モデル(cell transmission model)を用いた動的配分モデルに適用し、(セルの)需要が確率変動する場合のシステム最適化問題の定式化及びアルゴリズムの開発を行っている。また、Boyceら⁶⁵⁾は、リスク態度を考慮した動的配分を行っている。

Bell⁶⁶⁾は、ネットワーク利用者とデーモンと呼ばれている仮想的な存在が非協力ゲームを行うことを仮想することにより、交通ネットワークの信頼性を評価する研究を行っている。利用者の行動は最小期待コスト経路の選択であり、デーモンは利用者の期待コストが最大になるように(複数存在する)各シナリオの生起確率を操作する。そして、悲観的な利用者の期待コストがネットワーク信頼性指標となると提案している。また、Bell・Cassir⁶⁷⁾は、ODごとにデーモンが存在するとし、 $n+m$ 人ゲームを考えている。Szetoら⁶⁸⁾は、Bellらのモデルを拡張(ODペアごとに複数のデーモン)するとともに、非線形相補性問題として定式化を行っている。

(5) シミュレーションモデル

前節までは何らかのモデルにより旅行時間分布を解析的に導出したり、扱おうとするものであった。一方、旅行時間分布をシミュレーション的に計算することも可能である。つまり、交通需要が変動することによる旅行時間の確率分布が必要な場合、交通需要を少しずつ変化させ、その都度配分を行い、リンク等の旅行時間を計算すると、旅行時間の平均や分散等を算出することができる。本節では、解析的ではなく、シミュレーションによって旅行時間分布もしくは平均や分散等の統計量を算出する研究について整理する。なお、ここで言うシミュレーションとは、いわゆる交通流シミュレーションではないことに注意されたい。

朝倉ら⁶⁹⁾は、リンクの混雑率(日交通量/日容量)が所与の判定基準以下である確率(あるレベル以上の混雑に遭遇しない確率)をリンク通過可能確率と定義し、それを用いてネットワークの連結性と時間信頼性(ある一定時間内での到着可能確率)のシミュレーション分析を四国地域道路網を対象に行った。そこでは、OD交通量を正規乱数として与え、それに基づき配分することを繰り返している。若林ら⁸⁾も、OD交通量を変動させ、リンクへの交通量(交通需要)がリンクの交通容量を超えない確率を扱った信頼性分析シミュレーションを行っている。その結果、混雑度と変動係数は逆相関で、混雑が高い場合は変動

係数はほぼ一定であったことや混雑リンクは交通容量で抑えられるが、よく用いられるため、利用率が高めで安定し、変動が小さくなり、混雑が高い方が正規分布に従う傾向があることなどを報告している。

交通容量が確率変動する場合のシミュレーション分析も行われている。Chenらは、彼らが提案した容量信頼性のシミュレーションによる分析を行い⁷⁰⁾、さらに、交通容量とOD交通量の両方が確率変動する場合のシミュレーション分析も行っている⁷¹⁾。

交通需要を変化させ、その値ごとに均衡配分を行うシミュレーションは時間信頼性分析よりも、長期的な影響分析の方が適しているとも考えられる。その理由は、ある交通需要を設定し、それについての均衡配分を行うことは利用者がその交通需要を知っていることなどを前提にするが、それは時間信頼性の観点からはなじまないからである。一方、道路整備等の費用便益分析では、長期の交通需要推計が求められるが、その需要推定には誤差や不確実性を排除できない。将来需要は不確実であるが、その当該年度では知ることができる（少なくとも平均的には周知）と仮定することはそれほど不自然ではない。Zhao・Kockelman⁷²⁾は、交通需要モデルの不確実性の影響について、25のゾーンに分割されたダラス・フォートワースの均衡配分についてシミュレーションにより考察している。この研究では、交通需要が確率変動していることを対象とするよりも、交通需要は確実には分からないことの影響を対象としている。

Wallerら⁷³⁾は、交通需要が不確かな場合の均衡配分を用いた交通政策評価についてシミュレーションの数値計算によって検討している。需要が不確かな場合、期待値を用いて、均衡配分を行うことの問題点を指摘している。理論的には、旅行時間関数が非線形の場合、それは明らかである。ODペア数が100のオハイオ州内のネットワークの例では、平均総旅行時間を比較的安定に求めるためには、最低でも2000回のモンテカルロシミュレーションが必要という結果を示している。また、ネットワークのリンクに新たなレーンを付加する政策について、ODの期待値を用いて1回の配分による検討と、ODを変化させるモンテカルロシミュレーションによる検討では、政策順位が変わること、平均総旅行時間について2.1%異なることなどが示されている。

4. ネットワーク信頼性評価と信頼性向上施策

(1) ネットワーク・デザイン

ネットワークデザイン問題として、Asakuraら⁷⁴⁾

は、リンク利用可能確率を高めるリンク増強問題を定式化し、その感度分析を明らかにしている。

第2章で述べたように拡張されたリンク信頼度(拡張リンク信頼度)はリンク交通量が容量を超えない確率である。この概念をネットワークレベルに拡張すると、ネットワーク内のすべてのリンクが容量を超えない確率を信頼性指標とすることができる。Chootinanら⁷⁵⁾は、これを最大にするという問題を上位問題とする二段階最適化問題によりネットワークデザイン問題を取り扱っている。また、Chenら⁷⁶⁾はこの拡張全リンク信頼度を最大にする信号制御問題に取り組んでいる。

Lo・Tung⁴¹⁾が予備容量需要係数(容量に対する需要の余裕度)を最大化させるリンク容量増強のネットワークデザインについて検討している。なお、確率均衡配分を用いていないものの、Yang・Wang⁷⁷⁾は信頼性指標の一つである予備容量最大化と総旅行時間最小化の比較を行っており、Ziyou・Yifan⁷⁸⁾は予備容量に関する最適信号制御を取り扱っている。

Sumaleeら⁷⁹⁾は、Clark・Watling⁵⁴⁾が提案した総旅行時間に関する信頼性(総旅行時間信頼性)を用いたネットワークデザイン問題に取り組んでいる。信頼性向上のために変化させる交通容量等のデザインパラメータに関して総旅行時間信頼度を最大化させる問題を取り扱っているが、その最大化の計算のために目的関数である総旅行時間信頼度の勾配を解析的に導出している。

Chenら⁸⁰⁾は、総旅行時間の分布の α パーセンタイル値を最小にする α 信頼性ネットワークデザイン問題を定式化し、米国アイオワ州のある街のネットワークを対象に、予算制約下で α 信頼性を最大にする(総旅行時間の分布の α パーセンタイル値を最小にする)リンク容量増大計画を立てている。

その他の研究として、Chenら⁸¹⁾は、交通需要が正規分布に従うとし、ネットワークの計画・運営者の上位問題と利用者の下位問題の二段階確率最適化問題をシミュレーション的にGAを用いて解いている。また、Patil・Ukkusuri⁸²⁾やUkkusuri・Patil⁸³⁾は需要が変動した場合のネットワークデザインを行っている。

(2) 情報提供・制御問題

時間信頼性と情報提供とは関係が深い。交通情報は交通状況や旅行時間が正確には分からない状況でこそ意味がある。よって、旅行時間が確定的な均衡配分、特にワードロップ均衡配分では、基本的に情報提供を適切に扱うことはできない。また、通常確率的利用者均衡は知覚旅行時間は確率的であるとの取り扱いも可能であるが、実旅行時間は確定的に

扱っている点に注意が必要である。そこでは、実旅行時間に知覚誤差が付加されており、道路利用者は平均的には実旅行時間を知っているということになっている。情報提供により、この知覚誤差を小さくするという設定で形式的に情報提供効果分析を行うことができるが、日々様々な要因で旅行時間が変動し、平均的には旅行時間が小さくなる経路の旅行時間がその日はたまたま長くなることを情報提供により回避させるということは再現できない。これは、確率的利用者均衡モデルでは知覚誤差の是正のみしか取り扱うことができず、また、実旅行時間については確定的均衡が成立しており、何らかの要因で平均的には旅行時間が小さくなる経路の旅行時間がその日はたまたま長くなるというような状況は扱っていないためである。したがって、実旅行時間が長大になるというような実際の情報提供を適切に扱うためには、旅行時間が不確実な設定、実旅行時間が確率的な確率均衡モデルが必要になる。情報提供自体の研究蓄積は多大なものがあるが、確率均衡自体が最近開発が進んだモデルであるため、上記の観点から取り扱われた情報提供の研究は少ない。

情報提供により、旅行時間の変動を抑えることも可能であると考えられる。交通情報提供によって交通集中や事故等で旅行時間が長大になった経路からそうでない経路への変更が可能とすると、旅行時間は安定するであろう。情報提供により旅行時間減少を例証した研究があるため、この知見から情報提供は信頼性を向上させる効果があると期待できる。しかし、ハンチングなど情報提供によりシステムが不安定になる可能性も指摘されており、旅行時間減少のみならず、信頼性の観点からも情報提供効果の考察や分析が必要である。中山ら⁴⁸⁾は、交通量や旅行時間が確率的に変動する状況下において、ITS(高度道路交通システム)などにより時々刻々の交通状況(各リンクの旅行時間)を正確に知ることができる場合に、救急車に最短旅行時間の経路を知らせるという情報提供を取り扱っている。金沢道路ネットワークへの適用の結果、緊急車両(救急車)に最短旅行時間経路へ経路誘導することによって、約3分の旅行時間短縮が可能であったとしている。Lamら⁸⁴⁾は、前日の交通状況をつぶさに知ることができる事後的な情報提供によって信頼性を向上することを単純ネットワークを対象に示している。間嶋ら⁸⁵⁾はリンクが通行できなくなる事象が確率的に生起する場合の情報提供効果を仮想格子ネットワークを対象に分析している。また、Arnottら⁸⁶⁾は交通容量が確率的に変動する場合の情報提供効果について考察している。

ランプ制御でシステム最適な状態へ誘導する研究

も行われている。Akamatsu・Nagae⁸⁷⁾や長江・赤松⁸⁸⁾は、1つのODが一般道と高速道で結ばれる2リンクネットワークを対象に、旅行時間が不確実に変動する場合の動的システム最適配分⁸⁹⁾を確率制御問題として定式化し、その最適条件や数値解法等を考察した。また、交通需要が不確実に変動する場合の道路料金の制御について、長江⁹⁰⁾は同様のアプローチで考察している。若林・飯田⁹¹⁾はランプ制御による信頼性向上について、若林・飯田⁹²⁾はネットワークに一方通行策を導入した場合の信頼性向上について、仮想ネットワークを対象に数値計算を行っている。

(3) 信頼性向上とその施策評価

前節で述べた情報提供以外にも様々な交通施策や管理等で信頼性を向上することが可能である。その向上策は、需要側と供給側の2つに大別することができよう。リンク容量の増強やリンクの補強等によるリンク閉鎖確率の低減などが供給側の対策と言える。一方、前節の情報提供やランプ制御等は需要側と分類できる。

村木ら⁹³⁾は、地震による交通流動変化を考慮した損失額算出手法を提案し、全国レベルの幹線交通の耐震信頼性向上分析を行うと共に、(東京・大阪間)中央新幹線新設効果と東名高速耐震補強の効果を算出している。また、坪田ら⁹⁴⁾は、アンケート調査を行い、首都高速山手トンネル供用に伴う時間信頼性向上便益を算出している。

道路整備や交通政策の費用便益分析の際に、時間信頼性向上便益を算入する試みが続けられている。諸外国の取り組みとしては、特に英国、オランダ、ニュージーランド、スウェーデンで時間信頼性便益の導入の準備が進んでいる。各国ともに、時間信頼性指標としては旅行時間の標準偏差を採用しているようであり、英国やオランダでは信頼性比(標準偏差として計測した信頼性の価値を時間価値で除したものを0.8とし^{95),96)}、ニュージーランドやスウェーデンでは0.9が検討されているようである^{96),97)}。よって、これらの場合、ある施策の時間信頼性便益は、 $0.8 \sim 0.9 \times \text{時間価値} \times \text{旅行時間の標準偏差の変化量}$ と計算できる。Eliasson⁹⁷⁾は、スウェーデン・ストックホルムでの混雑税の費用便益分析で、時間信頼性の便益計算も行っている。

5. 時間・連結信頼性の統合評価

(1) 連結性向上の便益

道路整備は道路ネットワークの密度を高めるため、

明らかに時間・連結信頼性が向上し、その便益を適切に評価する必要がある。道路ネットワークの密度が高くなることに対する便益を考える上では以下の4つの視点が重要と思われる: 1) トータルの交通容量が増え、既存利用者に対するサービスレベルが向上(旅行時間が低下), 2) 新規整備部分周辺を中心に新たに利用が可能となり、新規利用者に対する便益が発生, 3) 災害等でもOD間の連結が途絶しにくくなり、連結信頼性が向上, 4) より多くの経路でOD間が繋がるため、ある経路のサービスレベルが低下してもOD間としては旅行時間の増加が抑えられ、信頼性が向上, の4つである。なお、これらは便益を捉えるための視点を示したものであり、必ずしも互いに排反ではなく、実際の便益算定では二重計算がないよう留意しなければならない。最初の単純旅行時間減少はこれまでの需要固定型配分を用いた費用便益分析でも算入されている。2番目の新規利用者の便益も、需要固定型配分をそのまま用いるのではなく、整備前後のOD表を適切に作成することにより部分的には対応可能であり、また、需要変動モデル(もしくは機関分担モデルなど)を導入することによって、より精緻に評価することができる。3番目と4番目の2点が信頼性に関するものである。

まず、4番目の「より多くの経路でOD間が繋がるため、ある経路のサービスレベルが低下してもOD間としては旅行時間の増加が抑えられ、信頼性が向上」について検討する。ここで、ノード1とノード2が一つの道路(旧道)で結ばれていたが、その間に新たな道路(新道)が整備されるという状況を考えよう。また、分かりやすくするために、各道路利用者は合理的で旅行時間の小さい道路を選択し、また、旅行時間は交通量に依存せず、自由走行時間で道路を走行できると仮定する。なお、道路利用者はその自由走行時間を知っているとする。旧道の旅行時間が20分で、新道が30分の場合(図-2の1期の部分参照)、これまでの需要固定型ワードロップ配分を用いた便益計算では、新道整備の便益は算出されない。なぜならば、ノード1から2へ向かう利用者は新道の整備の後でも変わらず全員が旧道を利用するからである。しかしながら、「より多くの経路でOD間が繋がるため、ある経路のサービスレベルが低下してもOD間としては旅行時間の増加が抑えられ、信頼性が向上」と上述したように、ノード1と2の間の連結性が向上したことにより、便益が発生する場合がある。これを図-2を用いて説明しよう。新道建設直後の1期では、旧道の旅行時間が(確定的に1期以内では変化せずに)20分で、新道が(確定的に)30分であったが、次の期(2期)では、工事

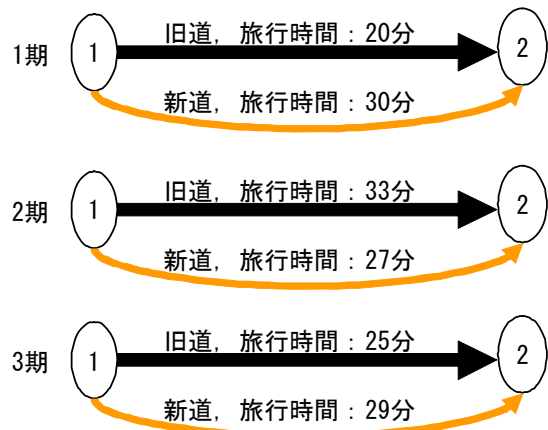


図-2 連結による時間信頼性向上の例

や災害・信号制御変化等により、旧道の旅行時間が(確定的に)33分で、新道が(確定的に)27分となったとする。さらに、3期では、旧道の旅行時間が(確定的に)25分で、新道が(確定的に)29分とする。1期と3期では、全員が旧道を利用するものの、2期では、全利用者が新道を利用する。旅行時間が変化する場合は新道が利用されることがあり得て、その場合は便益が発生する。旧道と新道の両方がある場合、ノード1と2の間の移動に要した1~3期の平均旅行時間は24分である。一方、もし仮に新道が建設されておらず、旧道のみしかなく、図-2と同様に旧道の旅行時間が1期20分、2期33分、3期25分であった場合、ノード1と2の間の移動に要した平均旅行時間は26分となる。したがって、この場合の新道の便益は2分の旅行時間短縮となる。

ここで、各期間の旅行時間の変化を捉えず、1~3期の平均旅行時間のみで便益を考えてみよう。旧道の1~3期の平均旅行時間は26分で、新道の平均旅行時間は28.7分である。これをそのままワードロップ配分的に1~3期の平均便益を考えると、1~3期の間は全員が(1~3期の)平均旅行時間の小さい旧道のみを利用することになり、新道の便益を計測できない。図-2の例では旅行時間の変動・変化を考慮しないと、新道の便益が計算できない。以上のように、旅行時間の変化・変動を考慮すると、算定が可能となる連結性の便益があることが分かる。

以上の議論では、旅行時間の変化・変動に着目しているが、これは既に述べた時間信頼性の向上の便益ではなく、あくまで連結性向上による便益である。これまでに主に交通工学が取り扱ってきた時間信頼性は旅行時間が確率変動することに対する信頼性であり、前提として、利用者が事前に旅行時間を確実に知ることはできず、確率的にしか分からないことを前提としている。このような前提のため、利用者は旅行時間の確率変動が大きい場合は遅刻しない

ようにセイフティ・マージン等を取り、早めに出発する必要が出てくる。これは時間損失になり、旅行時間の確率変動が小さくなることには価値が生まれる。しかし、上述の図-2での議論は各期内の旅行時間は確定的で利用者はそれを知っていることを前提としているため、時間信頼性に該当しない。時間信頼性を考える上で重要な点は、利用者が旅行時間をトリップ前に知っているのかどうかであり、知らない場合は時間信頼性を考えることになる。

上記の議論では、対象とするノードペア間が連結しているのかどうかという狭い意味での連結信頼性（以下、狭義連結信頼性）の範疇とも言えない。第2章(1)節では、単に走行可能な状態で連結されているのかどうかだけでなく、サービスレベルも考慮したいいくつかの信頼性研究を紹介したものの、上述の例はこれまで交通工学が対象としてきた連結信頼性と時間信頼性の狭間の信頼性とも言える。

上述の通り、旅行時間の変化を知ることができない場合は時間信頼性としてその価値を考慮することができるが、図-2の議論のように、利用者が旅行時間の変化を知った上で、行動を行うことができる場合、その変化ごとにワードロップ均衡配分を行うことで、道路整備等による連結性向上の便益（上述の4番目の視点からの便益）を算出することができる。図-2の例で行ったように、変化・変動ごとにワードロップ均衡配分等で各ODペアの最小旅行時間を計算し、その平均をとったものが利用者のコストである平均旅行時間となり、これに基づいて便益を算出することができる。また、そのような状況下での旅行時間データがある場合は、利用者のOD間の最小旅行時間を取り出して用いることもできる。図-2の例のような利用者が変化・変動を知った上で行動を行うという前提は、工事や災害等によるリンク閉鎖やリンク容量半減など比較的長期に渡る事象などが該当し得ることが多いと考えられる。

次に、上述の3番目の視点の狭義連結信頼性の向上について考えよう。連結していないということはそのノード間の旅行時間が無限大であるとして取り扱うことが可能である。しかし、このような方法で現実の道路の便益評価で連結信頼性を取り扱うことには問題が伴う。より実際的には、十分に大きな時間を設定し、それで代用することが考えられる。新規公共投資の研究⁹⁸⁾での禁止的価格という用語にならない、この十分に大きな時間を「禁止的期間」と呼ぶことにしよう。一般的に合意可能な禁止的期間を設定できる場合にはそれを用いることが可能である。

ODペア*i*間が連結されている確率を π_i とし、その間の利用者数を q_i とすると、トリップを行えない

場合のコストを含んだ期待総旅行コストは以下のように入えることができる。

$$\sum_{i \in I} q_i \pi_i \lambda_i + \kappa \sum_{i \in I} q_i (1 - \pi_i) \quad (1)$$

ここで、 λ_i はODペア*i*($i \in I$)間の最小旅行時間で、 κ は禁止的期間である。確率的な事象は連結の有無だけで、連結している場合の旅行時間は確定的としている。なお、単純化のため、 κ はODにかかわらず一定、連結されている場合 λ_i は一定としている。

式(1)の期待総旅行コストを計算するためには、禁止的期間、最小旅行時間及び連結確率が必要になる。本稿では、ネットワークレベルで実務的にも利用しやすいワードロップ均衡によって最小旅行時間を計算することを想定する。連結確率の算出については、道路のハードウェア部分であり、今後の課題とした。禁止的期間については以下で述べる。

トリップを行うのかとやめるのかの選択や他の交通機関等への選択を考慮することにより、（非連結となつて）トリップができない不便益を定量的に扱うことが可能である。交通の分野では、非集計モデルの研究蓄積や経験が豊富であるため、トリップを行うのか、とやめるのか（もしくは道路を利用するのか、他の交通機関を用いるのか）の2項ロジットモデルが考えられる。トリップを行う場合のランダム効用 U_i とトリップをとやめる場合のランダム効用 U_i^d を（単純化のために）以下のように定義する。

$$U_i = -\theta \lambda_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$U_i^d = -\rho + \varepsilon_i^d \quad (3)$$

ここで、 θ は正のパラメータ、 ρ は定数項、 ε_i と ε_i^d はランダム項である。トリップを取りやめる場合の定数項について、 $\rho = \theta \kappa$ と考えると、2項ロジットモデルで推定した定数項 ρ とパラメータ θ から、 ρ/θ として、禁止的期間と上述したトリップを取りやめるための（時間換算の）コスト κ が得られる。この推定された κ を用いることによって、トリップを行えないことに対する不便益を算定できる。これは調査データに基づいた一つの禁止的期間に対応するものと見なすことも可能である。なお、ここでは、ODにかかわらずトリップを行えない場合の不効用は一定としているが、より複雑な設定も可能である。また、震災時などを対象とする場合、震災直後の交通需要は通常時と大きく異なり、また、災害規模が大きくなると人命もかわるような必要性の極めて高い需要も多く発生するため、そのような場合も考慮する時は別途禁止的期間を推定する必要がある。逆に言うと、様々な状況での κ を推定し、それを用いることで、様々な状況に対応することがある程度

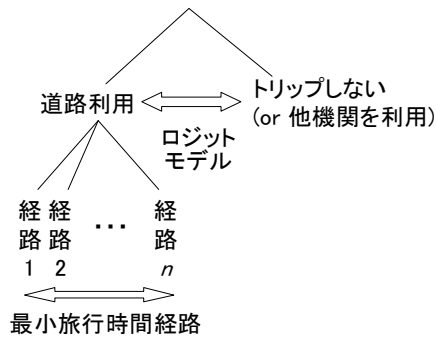


図-3 連結信頼性便益評価のための利用者選択構造

可能であると思われる。その推定のための SP 調査などの手法や技術開発は今後必要である。本稿では、紙面制約の都合上、需要が通常時（震災等の場合通常需要の復興期以降）を前提とし、最小旅行時間も配分によって与える。

既に述べたように実務的な観点から配分はワードロップ均衡を用いることにするため、2 項ロジットモデルを用いて κ を推定した場合、道路利用者の選択は図-3 の通りとなる。OD ペア i が連結されている場合はトリップを行うのか、取り止めるのかの両方を選択することができる一方、連結されていない場合はトリップを行わないしか選択できない。トリップを行う場合、便益指標としてのログサム変数（北村・森川⁹⁹⁾の p.144 参照）、つまり、最大効用の期待値は $-\ln[e^{-\theta\lambda_i} + e^{-\theta\kappa}]/\theta$ として与えられる。連結されていない場合、その OD 間旅行時間は無限大と考えると、最大効用の期待値は $-\ln[e^{-\infty} + e^{-\theta\kappa}]/\theta = \kappa$ である。連結される確率が π_i であることを踏まえ、式(1)にこれらのログサム変数を代入すると、

$$\tilde{C}(\pi) = -\frac{1}{\theta} \sum_{i \in I} q_i \pi_i \ln[e^{-\theta\lambda_i} + e^{-\theta\kappa}] + \kappa \sum_{i \in I} q_i (1 - \pi_i) \quad (4)$$

が得られる。2 項ロジットモデルを用いた図-3 の選択構造を仮定する場合、式(1)よりも上式の方が理論的に整合性の取れたものとなっている。

この式(4)は狭義連結信頼性の便益を捉えるものである。上述の通り、これだけでなく、連結性が向上し、「より多くの経路で OD 間が繋がるため、ある経路のサービスレベルが低下しても OD 間としては旅行時間の増加が抑えられ、信頼性が向上」する効果もある。これは既に述べた通り、各 OD ペアの最小旅行時間の平均によって計測できる。式(4)とこれを組み合わせると、これら 2 つの観点からの連結性向上便益（以下、単に連結性向上便益と呼ぶ）を算出することができる。この場合、式(4)では、最小旅行時間は確定的であったが、それを変化・変動させることが必要となる。利用者が認知できる（程度に比較的長期に変化・変動する）確率要因の変数ベク

トルを \mathbf{Z} とする。この \mathbf{Z} の変化により、OD 間の最小旅行時間は変化する。それを $\lambda_i(\mathbf{Z})$ と表記することにする。 $\lambda_i(\mathbf{Z})$ は OD ペア i 間の最小旅行時間（の確率変数）となる。また、 π_i も \mathbf{Z} に依存すると考えられるため、 $\pi_i(\mathbf{Z})$ と表記することにする。 $\lambda_i(\mathbf{Z})$ の平均 $E[\lambda_i(\mathbf{Z})]$ と $\pi_i(\mathbf{Z})$ を式(4)に代入すると、（2 つの観点からの）連結性向上便益計算のための総コスト \hat{C} は以下の通りとなる。

$$\hat{C}(\mathbf{Z}) = -\frac{1}{\theta} \sum_{i \in I} q_i \pi_i(\mathbf{Z}) \ln[e^{-\theta E[\lambda_i(\mathbf{Z})]} + e^{-\theta\kappa}] + \kappa \sum_{i \in I} q_i [1 - \pi_i(\mathbf{Z})] \quad (5)$$

(2) 時間信頼性指標

既に述べたが、利用者が事前に旅行時間を把握できない場合、旅行時間が変動することにより、遅刻やスケジュール通りの活動を行えない等の不利益を被ったり、逆に遅刻等を避けるために、セイフティ・マージンを取り、早めに出発することで、時間損失が出るため、時間信頼性には価値が生まれる。

これまでに様々な時間信頼性の定量化のための指標が提案されている。著者がそれらをまとめたところ^{100),101)}、時間信頼性指標としては、旅行時間のパーセンタイル値（以下、%タイル値）が、1)（指標の利用者にとって）理解しやすい、2)（外れ値の影響を受けにくく）観測上ロバストである、3) 単体で評価に用いることができる、4) 旅行時間分布の右裾のばらつきのみを考慮することができる、という利点があって、少なくとも分散・標準偏差などよりも妥当であるとしている。なお、時間信頼性指標については福田¹⁰²⁾も整理を行っている。

1 つ目の点については、これまでに様々な研究者が時間信頼性を考慮した交通行動分析を SP 調査等によって行っているが、旅行時間のばらつきを分散もしくは標準偏差で被験者に提示した研究事例を著者は把握していない。少なくとも、分散もしくは標準偏差によってばらつきを人々に理解させることは困難であると研究者の多くは考えていると言える。時間信頼性指標は必ずしも確率・統計の知識をある程度持つ人々のみを用いるとは限らない。（政策評価などその他の知識はあっても）確率・統計については実験被験者と同程度の知識を持つ人々にとって、分散・標準偏差よりも%タイル値の方が理解しやすいと言えよう。また、標準偏差や分散を知る人々でも分散が 10 であるバラつきがどれほどのものかをイメージするよりは 95%タイル値は 32 分ということの方が理解が容易とも思える。

次に、2 点目についてであるが、旅行時間の観測に

は誤差があり、外れ値もある。それを排除することは一般に困難である。分散や標準偏差などは外れ値の影響を大きく受ける一方、%タイル値は外れ値の影響を分散・標準偏差ほどは受けない。分散・標準偏差は外れ値の値そのものが直接的に影響する一方、%タイル値の場合、設定したパーセントよりも大きな外れ値があったとしてもその外れ値の値そのものが直接影響するのではないからである。

3点目は評価についてである。旅行時間の分散・標準偏差は、旅行時間のばらつきのみを考慮するものであり、このばらつきのみでは路線や経路の優劣を決めることには適さない。ばらつきが小さくとも平均旅行時間が長大な路線・経路が望ましいとは言えないためである。このようなばらつきのみを表す指標の場合は平均なども併用する必要がある。一方、%タイル値は平均に相当する情報も加味されており、そのみで評価に用いることができる。

上記の4点目についてであるが、旅行時間を観測した研究がこれまでも行われており、Herman・Lam¹⁰³、Richardson・Taylor¹⁰⁴、Montgomery・May¹⁰⁵では、観測した旅行時間は正規分布よりも右裾が厚く、対数正規分布に近いことを示している。また、信頼性として特に問題となるのは、旅行時間が通常(平均)よりも短くなる場合よりもむしろ長くなる場合である。これらの観点から、旅行時間が短くなるばらつきと長くなるばらつきを等しく考えるよりも、長大になる場合に焦点を当てる方が望ましい。

旅行時間の%タイル値によって、時間信頼性を評価することとした場合、次の問題は、何パーセントタイル値を採用すればよいのかということとなる。これは、旅行時間の変動をつぶさに分析することよりもむしろ利用者がどれほど時間信頼性に価値をおいているのかを調査する必要がある。これまでに様々な研究者が時間信頼性を考慮した自動車利用行動の分析を行っている(Abdel-Atyら¹⁰⁶、Nolandら¹⁰⁷、Calfee・Winston¹⁰⁸、Smallら¹⁰⁹、Lam・Small¹¹⁰、Hensher¹¹¹、Copley・Murphy¹¹²、Smallら¹¹³、Brownstone・Small¹¹⁴、de Jongら¹¹⁵、Asensio・Matas¹¹⁶、高橋・福田¹¹⁷)。信頼性比の推定結果をまとめた中山¹⁰⁰(の表-3)によると、各研究の信頼性比は1.0~1.5のものが大半であり、そのメジアンは1.16で、モードも1.1~1.2前後と思われる。1.1~1.2という信頼性比は%タイル値に換算すると、86.4~88.5%程度に対応する。簡便のため、85%もしくは90%などの数値が実務上望ましい。いずれにするかであるが、日本の阪神高速の調査(公表前資料)では80%タイル値によって交通行動を決定しているとの調査結果を加味して、本稿では、時間信頼性を旅行時間の85%タイル値によって評価し

たい。なお、この85%タイル値という値であるが、一般的な交通行動を各国で推定した結果であることを念頭に置く必要がある。居住国、トリップ目的や利用者の属性により、信頼性への価値は異なると考えられるが、それらを一括りにした平均的なものと言える。よって、今後の研究蓄積によってその値を精緻化する必要がある。これは現時点の研究蓄積での暫定的なものという位置付けとなる。旅行時間分布が分かっている場合はそれぞれの指標間で(ある程度)変換可能であるため、どの指標が最も適切であるのかは本質的な問題ではないかもしれない。本章の目的は、時間信頼性指標をどれにするのかよりも、時間信頼性と連結信頼性の統合である。よって、(%タイル値の採用自体を含めて)85%タイル値に疑問がある場合は、以下の議論では別の指標をそれに置き換えて考えてほしい。

この85%タイル値に時間価値を乗ずることで、貨幣換算の便益となり得る。実務的には、旅行時間の分布形を細かく考えることはその他の部分の精度や重要性に比べて、それほど高くはないとも言えるため、旅行時間の標準偏差が求められている場合は、旅行時間は正規分布であると仮定し、値を変換することも、それほど妥当性が低いとは言えないとも考えられる。その場合、85%タイル値の代わりに、 $\mu + 1.2\sigma$ 等を用いればよい。なお、 μ は旅行時間の平均、 σ はその標準偏差である。

(3) 連結・時間統合信頼性評価

前節で述べたように、本稿では、時間信頼性を旅行時間の85%タイル値に基づいて評価する。一方、災害や工事等で影響が比較的長期で旅行時間の変化・変動を利用者が認知できる場合については、式(4)によって連結性向上の便益を算定できる。

利用者の行動決定前に確定的には認知できない確率の変動要因の(確率)変数ベクトルを \mathbf{Y} とする。既に述べたように利用者が認知できる要因の確率変数ベクトルを \mathbf{Z} である。また、それらの実現値(ベクトル)をそれぞれ \mathbf{y}, \mathbf{z} とする。利用者は、 $\mathbf{Z} = \mathbf{z}$ ということを行行動決定前に認知するものの、 \mathbf{Y} の実現値 \mathbf{y} は認知できない。

まず、分かりやすさのために、 \mathbf{Y} のみが確率的である場合について考えよう。前節で述べたように、旅行時間が変動することに対しては、セイフティ・マージンをとるなどが必要で、旅行時間の85%タイル値で評価するものとする。つまり、利用者は旅行時間の85%タイル値を用いて行動を決定する。ODペア $i (\in I)$ の経路 $j (\in J_i)$ について、

$$\Pr[t_{ij}(\mathbf{Y}|\mathbf{Z}=\mathbf{z}) \leq T_{ij}^{0.85}] = 0.85 \quad (6)$$

を満たす $T_{ij}^{0.85}$ を $t_{ij}^{0.85}(\mathbf{Y}, \mathbf{z})$ と表記することにする。なお、 $t_{ij}(\cdot)$ は OD ペア i の経路 j の (経路) 旅行時間関数である。これが時間信頼性を考慮したその経路のトリップコストである。

次に、 \mathbf{Y} と \mathbf{Z} の両方が確率変動する場合である。利用者は事前に \mathbf{Z} の実現値を \mathbf{z} と知ることはできないものの、長期的には、 \mathbf{Z} 自体は (確率的に) 変化する。この場合、経路旅行時間の 85% タイル値は (長期的には) 確率的となる。つまり、 $t_{ij}^{0.85}(\mathbf{Y}, \mathbf{Z})$ は \mathbf{Z} に対して確率的である。なお、 \mathbf{Y} に対しては 85% タイル値という確定的なものとなっている。ただし、 \mathbf{Y} によってその値自体は変化する。利用者は合理的であることを前提としているため、 $t_{ij}^{0.85}(\mathbf{Y}, \mathbf{Z})$ が最も小さい経路を選択する。OD ペア i の経路旅行時間の 85% タイル値の最小値

$$\lambda_i^{0.85}(\mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = \min_{j \in J_i} [t_{ij}^{0.85}(\mathbf{Y}, \mathbf{Z})] \quad (7)$$

がその OD ペアの利用者が費やすコストとなる。繰り返しになるが、 \mathbf{Z} の実現値を利用者が事前に認知することに注意が必要である。各期で \mathbf{Z} が変化する場合、各期ごとに OD 間で最小となる 85% タイル値を利用者はコストとして被っており、期が異なることで、その最小 85% タイル値は確率的に変化する。これを式(4)に代入すると、以下の式が得られる。

$$C(\mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = -\frac{1}{\theta} \sum_{i \in I} q_i \pi_i(\mathbf{Z}) \ln [e^{-\theta E_{\mathbf{Z}}[\lambda_i^{0.85}(\mathbf{Y}, \mathbf{Z})]} + e^{-\theta \kappa}] + \kappa \sum_{i \in I} q_i [1 - \pi_i(\mathbf{Z})] \quad (8)$$

ここで、 $E_{\mathbf{Z}}[\cdot]$ は確率変数 \mathbf{Z} に関する (対象 OD 間連結時のみでの) 期待値をとるオペレータである。この総期待最小コスト C によって、連結・時間信頼性の便益を統合的に評価することができる。

時間価値を τ とし、道路政策 (もしくは道路整備等) の実施前の各確率変数を $\mathbf{Y}^b, \mathbf{Z}^b$, 実施後は $\mathbf{Y}^a, \mathbf{Z}^a$ とすると、 $\tau[C(\mathbf{Y}^b, \mathbf{Z}^b) - C(\mathbf{Y}^a, \mathbf{Z}^a)]$ によって、その政策効果 (整備効果) の便益を連結性向上及び時間信頼性の向上を含めた形で算出することができる。

式(8)で示した連結・時間統合信頼性評価のための総コスト式を図-2のネットワークに適用する。交通需要 q は 1.0 万台とする (OD を表す添字は省略)。利用者が認知できる要因によって変化するリンク 1 と 2 の旅行時間 $t_1(\mathbf{Z}), t_2(\mathbf{Z})$ を表-2 の通り与える。利用者が認知できない旅行時間変動 $t_1(\mathbf{Y})$ と $t_2(\mathbf{Y})$ は共に平均が 0.0 で標準偏差はそれぞれ 5.0 と 2.5 の正規分布とする ($t_1(\mathbf{Y}) \sim N[0, 5], t_2(\mathbf{Y}) \sim N[0, 2.5]$)。なお、 \mathbf{Y} と \mathbf{Z} は独立で、 $t_1(\mathbf{Y}, \mathbf{Z}) = t_1(\mathbf{Y}) + t_1(\mathbf{Z})$ とする (リンク 2 も同様)。また、調査によって、 $\kappa = 90.0$,

表-2 認知できる事象の旅行時間変化及び確率

	事象1	事象2	事象3	事象4
リンク1	20分	33分	25分	通行止め
リンク2	30分	27分	29分	通行止め
生起確率	0.32	0.32	0.32	0.04
最小85%値	25.2分	29.6分	30.2分	-

小数2位を四捨五入

$\theta = 0.1$ と推定できたとする。

まず、旧道・新道両方ある場合を考える。各事象での最小 85% タイル値は表-2 の通りである。よって、 $E_{\mathbf{Z}}[\lambda^{0.85}(\mathbf{Y}^a, \mathbf{Z}^a)] = 28.4$ 分である。また、表より OD 間が非連結となる確率は 0.04 である。これらを式(8)に入れると、 $C(\mathbf{Y}^a, \mathbf{Z}^a) = 30.8$ 万分となる。次に、新道 (リンク 2) がない場合を考える。この時の OD 間非連結確率は 0.08 とする (新道もある場合は 0.04 と改善している)。この時、 $E_{\mathbf{Z}}[\lambda^{0.85}(\mathbf{Y}^b, \mathbf{Z}^b)] = 31.2$ 分であり、 $C(\mathbf{Y}^b, \mathbf{Z}^b) = 35.9$ 万分となる。したがって、新道の整備効果は 5.1 万分の減少である。このうち、非連結確率減少部分は 2.3 万分、認知可能な旅行時間変化部分は 2.0 万分 (図-2 での説明と同じ)、認知できない旅行時間変動部分 (平均ではなく、85% タイル値を用いたことによる部分) は 0.8 万分となっている。

6. まとめと展望

本稿では、まず、ネットワークレベルでの信頼性を対象とし、これまでに行われた連結信頼性・脆弱性の研究を整理した。連結信頼性は、四半世紀前より研究がなされており、その一つの主な研究テーマはネットワークの大きさに対して指数関数的に計算量が増大することに対処する計算法についてであった。そして、単に走行可能なリンクで連結しているだけでなく、ある一定のサービスレベルの中での連結が考えられるようになり、時間信頼性へと研究が進展してきた。また、連結というものに関しては、阪神淡路大震災を契機に、近年では、脆弱性としても研究が進んでいる。脆弱性の研究の一つの背景には、ネットワークの単数・複数のリンクの途絶がとてつもない社会的・経済的損失を生み出すこと (カタストロフ性) が阪神淡路大震災での教訓として得られたこと、このような稀現象に対するリンクの信頼性、つまり、リンクが途絶する確率を推定することは非常に困難であることが背景にある。確率を考えずに、ネットワークの脆弱さや脆弱な個所を考えるのが脆弱性の研究のモデリング上の特徴と言えよう。ネットワークの連結性に対する研究の大きな流

れは以上のものである。連結信頼性については、近年の情報科学の進展を取り入れ、さらなる効率的な計算法の開発、本稿でもその一手法を提案しているが、便益評価方法の確立、連結信頼性計算に必要なリンク信頼性（リンク途絶確率）の推定方法の開発が今後必要であろう。ただし、リンク信頼性（リンク途絶確率）の推定方法は地震工学等の他分野の範囲とも言えるが、パラメータ推定の研究蓄積を持つ我々もそれに寄与する必要があるとも考えられる。脆弱性については、その指標が様々な提案されており、脆弱性指標の確立が重要である。

ネットワーク全体での信頼性の評価では、大多数のリンクの旅行時間分布が分かっている場合などのデータが豊富な場合を除き、交通量や旅行時間の変動の推定のために有用な交通量・旅行時間が確率変動する確率均衡モデルやシミュレーション法などが必要となる。交通量・旅行時間が確率変動する確率均衡はこれまで確定的に研究が進展してきた交通均衡モデルの確率化である。リンクの容量等のネットワークの供給側の確率変動と交通需要や経路選択等の需要側の確率変動では取り扱い方に違いがあり、後者ではリンク旅行時間の共分散を考慮する必要があり、より複雑な問題である。この需要側の確率変動による確率均衡モデルについては、解が一意とは限らないため、解が一意的なモデルで考慮できる確率変動要因の特定や解が一意的なモデルの限界を明らかにすること、解が一意的でない場合の解の存在範囲の特定などが理論的には課題として残っている。また、確率均衡モデルの解の安定性や day-to-day ダイナミクスの研究もほとんど行われていない。統計力学や情報科学、ファイナンスの分野での確率モデルの膨大な研究蓄積を応用し、新しいタイプのモデルや手法の開発も今後重要であろう。

信頼性研究を真の意味で社会に還元するためには、信頼性の向上施策やそのネットワークデザインの研究も重要である。これについては様々な研究がなされているが、一つの課題としては、ネットワークレベルでの信頼性を測る指標の確立がある。時間信頼性指標は個々の利用者の観点での指標であり、それを全利用者で足し合わせたものがよいとは考えられるが、その計算量に対処する必要がある。確定的な場合のネットワーク問題では総走行時間が用いられることが多いが、それに対応した指標がいくつか提案されている。ネットワークレベルの指標としては、便益評価できることが望ましいため、貨幣もしくは時間単位での指標が求められる。本稿では、式(8)を提案しているが、期待値や 85% タイル値の計算をどのように高速に行うのかが課題であり、感度分析を

用いたり、旅行時間分布をある（妥当な）確率分布に特定することによって計算の高速化が図れると考えられる。

信頼性と情報提供には関連性が高いため、情報提供に関しては信頼性の観点から再度様々な考察が必要であろう。このような信頼性向上やネットワークデザイン問題については、確定的な場合の研究蓄積は豊富にあるため、それを十分に活用することが近道であると言えよう。

本稿では、時間・連結信頼性を考慮した便益評価方法を提案した。便益の計算には、禁止的時間を用いているが、禁止的時間は状況によって大きく異なるであろう。例えば、大震災直後は人命救助があり、極めて大きい禁止的時間となることも考えられる。様々な状況での禁止的時間推定法の確立やその推定の蓄積も今後重要であろう。このような時間・連結信頼性の同時便益評価自体はまだ研究の途についたばかりであり、様々な研究蓄積の上で実用的なモデルを確立することが必要である。

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) 飯田恭敬, 北村隆一: 交通工学, オーム社, 東京, 2008.
- 2) 瀬戸裕美子, 倉内文孝, 宇野伸宏: 脆弱性の概念を用いた道路網接続性評価に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 37, CD-ROM, 2007.
- 3) Grötschel, M., Monma, C.L. and Stoer, M.: Design of survival networks, Ball, M.O. et al. eds., *Network Models*, Elsevier, Amsterdam, pp. 617-672, 1995
- 4) 星谷勝, 山本欣弥: 情報エントロピーを用いたシステムの信頼性と冗長性の検討, 土木学会論文集, No. 654/I-52, pp. 355-366, 2000.
- 5) 黒田勝彦, 瀬賀康浩, 山下智志: 都市高速道路ネットワークにおけるアヴェイラビリティについて, 土木計画学研究・講演集, No. 11, pp. 267-274, 1988.
- 6) Bell, M.G.H. and Schmöcker, J.D.: Public Transport Network Reliability: Topological Effects, *Proceedings of the 3rd International Conference on Traffic and Transportation Studies*, pp. 453-460, 2002.
- 7) 朝倉康夫, 柏谷増男, 藤原健一郎: 交通ネットワークにおける迂回の限界を考慮した OD ペア間信頼度の指標, 土木学会論文集, No. 555/IV-34, pp. 41-49, 1997.
- 8) 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.

- 9) 川上英二：道路交通システムの機能上の耐震性の一評価方法, 土木学会論文報告集, No. 327, pp. 1-12, 1982.
- 10) 若林拓史：阪神淡路大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価, 土木計画学研究・論文集, No. 13, pp. 391-400, 1996.
- 11) 小林正美：道路網・ネットワークシステムの信頼度解析法に関する研究, 都市計画別冊・学術研究発表会論文集, Vol. 15, pp. 385-390, 1980.
- 12) 若林拓史, 飯田恭敬：交通ネットワーク信頼性解析への信頼性グラフ理論適用の考え方, 土木計画学研究・講演集, No. 10, pp. 125-132, 1987.
- 13) 飯田恭敬, 若林拓史：ブール演算を用いた道路網ノード間信頼度の上・下限値の効率的算出法, 土木学会論文集, No. 395/IV-9, pp. 75-84, 1988.
- 14) 飯田恭敬, 若林拓史, 吉木務：ミニマルパス・カットを用いた道路網信頼度の近似計算法, 交通工学, Vol. 23, No. 4, pp. 3-13, 1988.
- 15) 若林拓史, 飯田恭敬, 福島博：道路網の信頼性解析に対するモンテカルロ法の適用, 土木計画学研究・講演集, No. 11, pp. 259-266, 1988.
- 16) 若林拓史, 飯田恭敬, 福島博：道路網信頼性の近似解析方法の比較研究, 土木学会論文集, No. 407/IV-11, pp. 107-116, 1989.
- 17) 高山純一, 大野隆：連結性能から見た道路網の信頼性評価法, 土木計画学研究・講演集, No. 11, pp. 251-258, 1988.
- 18) 飯田恭敬, 若林拓史, 吉木務：道路網信頼性解析へのネットワーク集計法の適用, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 567-574, 1989.
- 19) 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, pp. 51-60, 1998.
- 20) 中川真治, 若林拓史, 飯田恭敬： n 番目最短経路を用いた簡便な信頼性解析法, 土木学会第 50 回年次学術講演会, pp. 106-107, 1995.
- 21) 木俣昇, 石橋聡：地震時緊急路網のシステム信頼性評価に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No. 6, pp. 145-152, 1988.
- 22) Taylor, M.A.P., Sekhar, S.V.C. and D'Este, G.M.: Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks, *Network and Spatial Economics*, Vol. 6, pp. 267-291, 2006.
- 23) D'Este, G.M. and Taylor, M.A.P.: Modelling network vulnerability at the level of the national strategic transport network, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 4, No. 2, pp. 1-14, 2001.
- 24) D'Este, G.M. and Taylor, M.A.P.: Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks, Bell, M.G.H. & Iida, Y. eds., *The Network Reliability of Transport*, Pergamon, Oxford, U.K., pp. 23-44, 2003.
- 25) Berdica, K.: An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done, *Transport Policy*, Vol. 9, pp. 117-127, 2002.
- 26) Jenelius, E., Petersen, T. and Mattsson, L-G.: Importance and exposure in road network vulnerability analysis, *Transportation Research*, Vol. 40A, pp. 537-560, 2006.
- 27) Lleras-Echeverri, G. and Sanchez-Silva, M.: Vulnerability analysis of highway networks, methodology and case study, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport*, Vol. 147, pp. 223-230, 2001.
- 28) Sohn, J.: Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: an accessibility approach, *Transportation Research*, Vol. 40A, pp. 491-506, 2006.
- 29) Chang, S.E. and Nojima, N.: Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective, *Transportation Research*, Vol. 35A, pp. 475-494, 2001.
- 30) Chang, S.E.: Transportation planning for disasters: an accessibility approach, *Environment and Planning*, Vol. 35A, pp. 1051-1072, 2003.
- 31) Chen, A, Yang, C., Kongsomsaksakul, S. and Lee, M.: Network-based accessibility measures for vulnerability analysis of degradable transportation networks, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 7, pp. 241-256, 2007.
- 32) Chen, A, Kongsomsaksakul, S., Zhoua, Z., Lee, M. and Recker, W.: Assessing network vulnerability of degradable transportation systems: an accessibility based approach, *Transportation and Traffic Theory*, Allsop, R.E., Bell, M.G.H., Heydecker, B.G. eds., Elsevier, Amsterdam, pp. 235-262, 2007.
- 33) 朝倉康夫, 柏谷増男, 西山晶造：観測リンク交通量を用いた道路網交通流の日変動推定とその信頼性分析への応用, 土木学会論文集, No. 482/IV-22, pp. 17-25, 1994.
- 34) 高山純一, 飯田恭敬：常時観測交通量データを用いた非観測区間交通量の簡易推計法, 第 18 回日本道路会議論文集, pp. 1146-1147, 1989.
- 35) 外井哲志, 天本徳浩：非観測道路区間交通量推計のための交通量観測点の最適配置計画に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 7, pp. 251-258, 1989.
- 36) Hazelton, M.H.: Some remarks on stochastic user equilibrium, *Transportation Research*, Vol. 32B, pp. 101-108, 1998.
- 37) Watling, D.: A second order stochastic network equilibrium model, I: Theoretical foundation, *Transportation Science*, Vol. 36, pp. 149-166, 2002.
- 38) 中山晶一郎, 高山純一, 長尾一輝, 笠嶋崇弘：旅行時間の不確実性を考慮した交通ネットワーク均衡モデル, 土

- 木学会論文集, No. 772/IV-65, pp. 67-77, 2004.
- 39) Yin, Y., Lam, W.H.K. and Ieda, H.: New technology and the modeling of risk-taking behavior in congested road networks, *Transportation Research*, Vol. 12C, pp. 171-192, 2004.
- 40) Yin, Y. and Ieda, H.: Assessing performance reliability of road networks under nonrecurrent congestion, *Transportation Research Record*, No. 1771, pp. 148-155, 2001.
- 41) Lo, H.K. and Tung, Y.K.: Network with degradable links: capacity analysis and design, *Transportation Research*, Vol. 37B, pp. 345-363, 2003.
- 42) Lo, H.K., Luo, X.W. and Siu, B.W.Y.: Degradable transport network: Travel time budget of travelers with heterogeneous risk aversion, *Transportation Research*, Vol. 40B, pp. 792-806, 2006.
- 43) Watling, D.: User equilibrium traffic network assignment with stochastic travel times and late arrival penalty, *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, pp. 1539-1556, 2006.
- 44) Shao, H., Lam, W.H.K. and Tam, M.L.: A reliability-based stochastic traffic assignment model for network with multiple user classes under uncertainty in demand, *Network and Spatial Economics*, Vol. 6, pp. 173-204, 2006.
- 45) Mirchandani, P. and Soroush, H.: Generalized traffic equilibrium with probabilistic travel times and perceptions, *Transportation Science*, Vol. 21, pp.133-152, 1987.
- 46) 飯田恭敬, 内田敬: リスク対応行動を考慮した道路網経路配分, 土木学会論文集, No. 464/IV-19, pp. 63-72, 1993.
- 47) Uchida, T. and Iida, Y.: Risk assignment: A new traffic assignment model considering the risk of travel time variation, *Transportation and Traffic Theory*, Daganzo, C.F. ed., Elsevier, Amsterdam, pp. 89-105, 1993.
- 48) 中山晶一郎, 高山純一, 長尾一輝, 所俊宏: 現実道路ネットワークの時間信頼性評価のための確率的交通均衡モデル及びそれを用いた情報提供効果分析, 土木学会論文集 D, Vol. 62, No. 4, pp. 526-536, 2006.
- 49) Watling, D.: Stochastic network equilibrium under stochastic demand, Patriksson, M. and Labbe, M. eds., *Transportation Planning: State of Art*, Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands, pp. 33-51, 2002.
- 50) Nakayama, S. and Takayama, J.: Traffic network equilibrium model for uncertain demands, Presented at the 82nd Annual Meeting of Transportation Research Board, on CD-ROM, 2003.
- 51) 中山晶一郎, 高山純一: 交通需要と経路選択の確率変動を考慮した交通ネットワーク均衡モデル, 土木学会論文集 D, Vol. 62, No. 4, pp. 537-547, 2006.
- 52) Lam, W.H.K., Shao, H. and Sumalee, A.: Modeling impacts of adverse weather conditions on a road network with uncertainties in demand and supply, *Transportation Research*, Vol. 42B, pp. 792-806, 2008.
- 53) 内田賢悦: 需要・供給・認知の確率変動を反映した利用者均衡配分, 土木学会論文集 D, Vol. 65, pp. 386-398, 2009.
- 54) Clark, S. and Watling, D.: Modelling network travel time reliability under stochastic demand, *Transportation Research*, Vol. 39B, pp. 119-140, 2005.
- 55) 小林潔司: 不完備情報下における交通均衡に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 8, pp. 81-88, 1990.
- 56) Muth, J.F.: Rational expectations and the theory of price movements, *Econometrica*, Vol. 29, pp. 315-335, 1961.
- 57) Lucas, R.E., Jr.: Asset prices in an exchange economy, *Econometrica*, Vol.46, pp. 1429-1445, 1978.
- 58) 小林潔司, 藤岡勝巳: 合理的期待形成過程を考慮した経路選択モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 458/IV-18, pp. 17-26, 1993.
- 59) 衛翀, 井料隆雅, 朝倉康夫: ネットワークにおける利用者交通行動の事後確率分布, 土木計画学研究・講演集, Vol. 40, CD-ROM, 2009.
- 60) 井上博司, 飯田祐三, 岸野啓一, 長谷川哲郎: 確率利用者均衡を用いた道路網の時間信頼性評価, 土木計画学研究・論文集, Vol. 15, pp. 647-654, 1998.
- 61) Asakura, Y.: Evaluation of network reliability using stochastic user equilibrium, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 33, pp. 147-158, 1999.
- 62) Cascetta, E.: A stochastic process approach to the analysis of temporal dynamics in transportation networks, *Transportation Research*, Vol. 23B, pp. 1-17, 1989.
- 63) Cascetta, E. and Canterella, G.E.: A day to day and within-day dynamic stochastic assignment model, *Transportation Research*, Vol. 25A, pp. 277-291, 1991.
- 64) Waller, S.T. and Ziliaskopoulos, K.: A chance-constrained based stochastic dynamic traffic assignment model: Analysis, formulation and solution algorithms, *Transportation Research*, Vol. 14C, pp. 418-427, 2006.
- 65) Boyce, D.E., Ran, B. and Li, I.Y.: Considering travelers' risk-taking behavior in dynamic traffic assignment, *Transportation Networks: Recent Methodological Advances*, Bell, M.G.H. ed., Pergamon, pp. 67-81, 1998.
- 66) Bell, M.G.H.: A game theoretical approach to measuring the performance reliability of transportation networks, *Transportation Research*, Vol. 34B, pp. 533-546, 2000.
- 67) Bell, M.G.H. and Cassir, C.: Risk-averse user equilibrium traffic assignment: an application of game theory, *Transportation Research*, Vol. 36B, pp. 671-681, 2002.
- 68) Szeto, W.Y., O'Brien, L. and O'Mahony, M.: Generalisation of the risk-averse traffic assignment, *Transportation and Traffic Theory*, Allsop, R.E. et al. eds., Elsevier, Amsterdam, pp. 127-153, 2007.
- 69) 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.

- 70) 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.
- 71) Chen, A., Yang, H., Lo, H.K. and Tang, W.H.: Capacity reliability of a road network: An assessment methodology and numerical results, *Transportation Research*, Vol. 36B, pp. 225-252, 2002.
- 72) Zhao, Y. and Kockelman, K.M.: The propagation of uncertainty through travel demand models: An exploratory analysis, *Annals of Regional Science*, Vol. 36, pp. 145-163, 2002.
- 73) Waller, S.T., Schofer, J.L. and Ziliaskopoulos, K.: Evaluation with traffic assignment under demand uncertainty, *Transportation Research Record*, No. 1771, pp. 69-74, 2001.
- 74) Asakura, Y., Hato, E. and Kashiwadani, M.: Stochastic network design problem: An optimal link investment model for reliable network, Bell, M.G.H. and Iida, Y. eds., *The Network Reliability of Transport*, Pergamon, Oxford, U.K., pp. 245-259, 2003.
- 75) Chootinan, P., Wong, S.C. and Chen, A.: A reliability-based network design problem, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 39, pp. 247-270, 2005.
- 76) 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.
- 77) Yang, H. and Wang, J.Y.T.: Travel time minimization versus reserve capacity maximization in the network design problem, *Transportation Research Record*, No. 1783, pp. 17-26, 2002.
- 78) Ziyu, G. and Yifan, S.: A reserve capacity model of optimal signal control with user-equilibrium route choice, *Transportation Research*, Vol. 36B, pp. 313-323, 2002.
- 79) Sumalee, A., Watling, D.P. and Nakayama, S.: Reliable network design problem, *Transportation Research Record*, No. 1964, pp. 81-90, 2006.
- 80) Chen, A., Kim, J., Zhou, Z. and Chootinan, P.: Alpha reliable network design problem, *Transportation Research Record*, No. 2029, pp. 49-57, 2007.
- 81) Chen, A., Subprasom, K. and Ji, Z.: Mean-variance model for the build-operate-transfer scheme under demand uncertainty, *Transportation Research Record*, No. 1857, pp. 93-101, 2003.
- 82) Patil, G.R. and Ukkusuri, S.V.: system-optimal stochastic transportation network design, *Transportation Research Record*, No. 2029, pp. 80-86, 2007.
- 83) Ukkusuri, S.V. and Patil, G.R.: Multi-period transportation network design under demand uncertainty, *Transportation Research*, Vol. 43B, pp. 625-642, 2009.
- 84) Lam, T.H., Yang, H. and Tang, W.H.: Generalized travel cost reliability in a simple dynamic network under advanced traveler information system, Bell, M.G.H. and Iida, Y. eds., *The Network Reliability of Transport*, Pergamon, Oxford, U.K., pp. 323-338, 2003.
- 85) 間嶋信博, 朝倉康夫, 柏谷増男, 越智大介: ドライバーへの情報提供を考慮したネットワーク信頼性評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol. 55, pp. 732-733, 2000.
- 86) Arnott, R., de Palma, A. and Lindsey, R.: Does providing information to divers reduce traffic congestions?, *Transportation Research*, Vol. 25A, pp. 309-318, 1991.
- 87) Akamatsu, T. and Nagae, T.: Dynamic ramp control strategies for risk averse system optimal assignment, Allsop, R.E. et al. eds., *Transportation and Traffic Theory*, Elsevier, Oxford, U.K., pp.87-110, 2007.
- 88) 長江剛志, 赤松隆: リアルタイム観測情報を活用した動的なシステム最適交通配分: 確率制御アプローチ, 土木学会論文集D, Vol. 63, pp. 311-327, 2007.
- 89) 山崎周一, 赤松隆: 不確実性に対するリスク回避度を考慮した動的な交通システム最適配分, 土木計画学研究・論文集, Vol. 23, pp. 963-972, 2006.
- 90) 長江剛志: 交通需要の不確実性を考慮したネットワークの動的有料道路料金更新問題, 土木計画学研究・論文集, No. 23, pp. 955-961, 2006.
- 91) 若林拓史, 飯田恭敬: 交通管理運用策による道路システムの信頼性向上効果, 土木計画学研究・講演集, No. 14, pp. 51-54, 1991.
- 92) 若林拓史, 飯田恭敬: 交通管理運用策による道路システムの所要時間信頼性向上効果, 土木計画学研究・講演集, No. 15, pp. 99-102, 1992.
- 93) 村木康行, 高橋清, 家田仁: 利用者便益から見た全国幹線交通ネットワークの耐震信頼性評価と耐震性向上による影響分析, 土木計画学研究・論文集, No. 16, pp. 341-348, 1999.
- 94) 坪田隆宏, 菊池春海, 梶原一夫, 坂爪誠, 割田博, 倉内文孝: 首都高速道路における所要時間信頼性向上便益の試算, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, CD-ROM, 2009.
- 95) Department for Transport: The reliability sub-objective TAG unit 3.5.7, Transport Analysis Guidance (TAG), Department for Transport, London, U.K., 2009.
- 96) 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, CD-ROM, 2009.
- 97) Eliasson, J.: A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system, *Transportation Research*, Vol. 43A, pp. 468-480, 2009.
- 98) 例えば, 上田孝行, 森杉壽芳, 林山泰久: 交通整備事業の便益計測に関するいくつかの留意事項, 運輸政策研究,

- Vol. 5, pp. 23-35, 2002.
- 99) 北村隆一, 森川高行: 交通行動の分析とモデリング, 技報堂出版, 2002.
- 100) 中山晶一郎: 道路の時間信頼性に関する研究レビュー, 土木学会論文集D3(土木計画学), Vol. 67, 登載決定, 2011.
- 101) 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. 39, CD-ROM, 2009.
- 102) 福田大輔: 旅行時間変動の価値づ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, 土木計画学研究・論文集, Vol. 27, pp. 437-448, 2010.
- 103) 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.
- 104) 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.
- 105) Montgomery, F.O. and May, A.D.: Factors affecting travel times on urban radial routes, *Traffic Engineering & Control*, Vol. 28, pp. 452-458, 1987.
- 106) 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.
- 107) Small, K.A., Noland, R., Chu, X. and Lewis, D.: Simulating travel reliability, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 28, pp. 535-564, 1998.
- 108) 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.
- 109) 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.
- 110) 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.
- 111) Hensher, D.A.: Measurement of the valuation of travel time savings, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 35, pp. 71-98, 2001.
- 112) Copley, G. and Murphy, P.: Understanding and valuing journey time variability, *Proceedings of European Transport Conference*, CD-ROM, 2002.
- 113) 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.
- 114) 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.
- 115) 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.
- 116) Asensio, J. and Matas, A.: Commuters' valuation of travel time variability, *Transportation Research*, Vol. 44E, pp. 1074-1085, 2008.
- 117) 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. 24, CD-ROM, 2010.

(2010. 2. 4 受付)

A STUDY OF PERSPECTIVE OF ROAD TRANSPORTATION RELIABILITY ON THE NETWORK LEVEL AND ITS EVALUATION

Sho-ichiro NAKAYAMA

In this paper, road transportation reliability on the network level is considered. First, previous studies of connectivity reliability and vulnerability are reviewed. Next, stochastic network equilibrium models, whose flows and travel times are stochastic, and simulation techniques are classified, and their future works are pointed out. Then, transportation policies and network design problems which increase or optimize the reliability are reviewed. Finally, a method of unified travel time and connectivity reliability assessment is proposed based on the review of this paper.