

交通ネットワークの連結性向上の便益評価法

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

道路整備には様々な便益が発生するが、本研究では、道路整備によって、ネットワーク全体の連結性が向上する便益に焦点を当てる。災害や事故等のネットワーク内のリンクの途絶時やネットワークパフォーマンスの低下時には、連節性が高いほどそのダメージは小さい。このように連結性の便益は信頼性の観点から評価することが可能である。本研究では、時間・連結信頼性の観点から連結性向上の便益を評価する手法を提案する。

Key Words : network connectivity, network reliability, reliability benefit

1. はじめに

道路・鉄道などの交通ネットワークは極めて重要なライフラインの一つであり、阪神淡路大震災や東日本大震災で見られたように、その信頼性の向上は急務であろう。交通ネットワークの信頼性を高めるためには、現在のネットワークを構成するそれぞれのリンクの強度を高めるだけでなく、ネットワークの連結性を高めることも有用である。たとえネットワーク内のいくつかのリンクが使用不能になったとしても連結性が高いと、各ノード間が連結しており、緊急物資など重要性の高いものを郵送することは可能となるからである。このようなネットワークの連結性を評価することは重要な課題と言える。

道路整備を行い、ネットワークの連結性が向上したことをどのように評価すればよいであろうか。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のかは重要な課題である。

本研究では、ネットワークの連結性を評価するために、いわゆる連結信頼性だけでなく、連結性が向上したことによる時間信頼性の向上も評価する。このように連結信頼性・時間信頼性の両方の観点からネットワークの連結性を評価する手法を提案する。

2. 連結信頼性と脆弱性

(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囲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分割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. 連結性向上の評価

(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-1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-1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、工事や災害・信号制御変化等により、旧道の旅行時間が

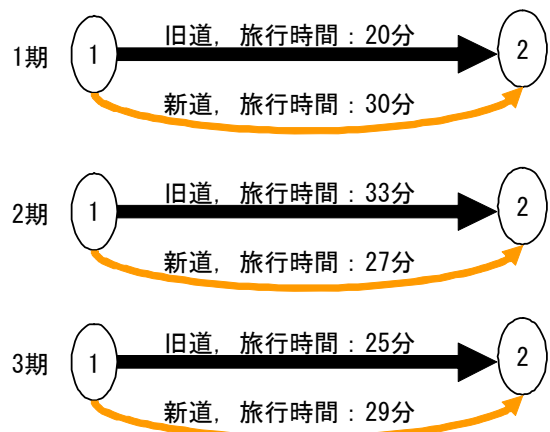


図-1 連結による時間信頼性向上の例

（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-1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-1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ができず、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-1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えることができるが、図-1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-1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-1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³³⁾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「禁止的時間」と呼ぶことにしよう。一般的に合意可能な禁止的時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

うに与えることができる。

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

ここで、 λ_i はODペア*i* ($i \in I$)間の最小旅行時間で、 κ は禁止的時間である。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、禁止的時間、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、今後の課題としたい。禁止的時間については以下で述べる。

トリップを行うのかとり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、とりやめるのか（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 とトリップをとり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、禁止的時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時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時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可能であると思われる。その推定のためのSP調査な

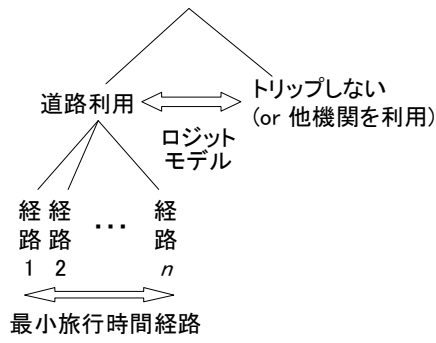


図-2 連結信頼性便益評価のための利用者選択構造

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-2 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³⁴⁾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-2 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³⁵⁾、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、という利点があつて、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³⁶⁾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が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・Lam³⁷⁾、Richardson・Taylor³⁸⁾、Montgomery・May³⁹⁾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、何パーセンタイル値を採用すればよいのかというものとなる。これは、旅行時間の変動をつぶさに分析することにより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⁴⁰⁾、Noland ら⁴¹⁾、Calfee・Winston⁴²⁾、Small ら⁴³⁾、Lam・Small⁴⁴⁾、Hensher⁴⁵⁾、Copley・Murphy⁴⁶⁾、Small ら⁴⁷⁾、Brownstone・Small⁴⁸⁾、de Jong ら⁴⁹⁾、Asensio・Matas⁵⁰⁾、高橋・福田⁵¹⁾）。信頼性比の推定結果をまとめた中山³⁵⁾（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、そのメディアンは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り、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ろう。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、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的変動要因の（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。

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

ここで、 $E_Z[\cdot]$ 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-1 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-1 の通りである。よって、 $E_Z[\lambda^{0.85}(\mathbf{Y}^a, \mathbf{Z}^a)] = 28.4$ 分である。また、表より OD 間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、 $E_Z[\lambda^{0.85}(\mathbf{Y}^b, \mathbf{Z}^b)] = 31.2$ 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。

4. まとめ

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、その一つの主要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・経済的損失を生みだすこと（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ろう。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。

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。

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ベ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: プ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) 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.
 - 34) 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.
 - 35) 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, No.1, pp. 95-114, 2011.
 - 36) 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.
 - 37) 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.
 - 38) 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.
 - 39) Montgomery, F.O. and May, A.D.: Factors affecting travel times on urban radial routes, *Traffic Engineering & Control*, Vol. 28, pp. 452-458, 1987.
 - 40) 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.
 - 41) Small, K.A., Noland, R., Chu, X. and Lewis, D.: Simulating travel reliability, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 28, pp. 535-564, 1998.
 - 42) 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.
 - 43) 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.
 - 44) 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.
 - 45) Hensher, D.A.: Measurement of the valuation of travel time savings, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 35, pp. 71-98, 2001.
 - 46) Copley, G. and Murphy, P.: Understanding and valuing journey time variability, *Proceedings of European Transport Conference*, CD-ROM, 2002.
 - 47) 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.
 - 48) 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.
 - 49) 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.
 - 50) Asensio, J. and Matas, A.: Commuters' valuation of travel time variability, *Transportation Research*, Vol. 44E, pp. 1074-1085, 2008.
 - 51) 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.

(2011. 8. 5 受付)

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

Sho-ichiro NAKAYAMA