

# 時間信頼性と連結信頼性を統合した 道路評価手法の開発・改良 -石川県道路ネットワークを対象として-

大澤 脩司<sup>1</sup>・中山 晶一朗<sup>2</sup>・高山 純一<sup>3</sup>・藤生 慎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: doboku@jsce.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: fujiu@se.kanazawa-u.ac.jp

道路ネットワークのサービス水準には、道路交通サービスを安定的に提供する能力、すなわち信頼性が密接に関係している。このことから、信頼性を取り入れて道路交通サービスを評価することは重要である。道路ネットワークにおける信頼性にも様々なものが考えられるが、中でも特に、旅行時間のばらつきの程度に基いて評価する時間信頼性と、目的地までの到達可能確率を評価する連結信頼性は重要度の高い信頼性指標である。本研究ではこれら時間信頼性・連結信頼性を統合した評価方法を提案することを目的とする。このため、これら2つの信頼性を評価可能な確率的均衡配分を用いた便益評価方法を構築し、構築した手法を実際の道路ネットワークに適用させることで、手法の妥当性及び適用可能性を検討する。

**Key Words :** *travel time reliability, connectivity reliability, stochastic user equilibrium*

## 1. はじめに

経済・社会活動の高度化にともない、道路ネットワークのサービスの向上のみならず、これらサービスを安定的に提供することが求められている。道路ネットワークのサービスは種々考えられるが、中でも特に重要性の高いものとして、旅行時間にばらつきがなく、安定した旅行時間で目的地まで到達できるかや、OD間に事故や渋滞等で走行不能でないリンクがどれだけ存在するかなどを挙げるができる。こうしたサービスの安定的な供給能力は、道路ネットワークにおける信頼性と言える。

道路ネットワークの信頼性についても、サービスと同様種々の考え方がある。中山<sup>1)</sup>では道路ネットワークの信頼性を連結信頼性・時間信頼性・走行信頼性の3つに分類している。本研究では、これら道路ネットワークにおける信頼性を考慮した道路評価手法の開発を目指す。このために、道路評価において重用であると考えられる連結信頼性と時間信頼性の2つに着目する。これらを考慮して道路ネットワークの信頼性を評価するためには、

連結信頼性と時間信頼性を評価するための指標が必要である。

時間信頼性は、道路ネットワークにおいて旅行時間にとどの程度ばらつきが生じるかを評価するものである。したがって、その指標として旅行時間の分散・標準偏差・変動係数等を用いることができると考えられる。しかし、分散や標準偏差といった一般的なばらつきの評価指標は、直感的にはどの程度のばらつきか把握しにくく、利用者に理解されにくいという問題がある。すなわち、道路利用者が認識する旅行時間のばらつきと分散・標準偏差は必ずしも一致せず、旅行時間のばらつきの指標として適さないと考えられる。そこで、時間信頼性の別の指標として%タイル値がよく用いられている。%タイル値によって計算されるバッファertimeなどがその代表といえよう。

連結信頼性の研究としては、構造関数<sup>2)</sup>を定義し、ノード間の連結確率という形式で指標化している場合が多い。連結確率の算出方法として、若林・飯田<sup>3)</sup>は最小パス法と最小カット法を用いている。最小パス法は、ノー

ド間を結ぶパスの全てが同時に通過できなくなることはない確率、すなわちノード間が1つ以上のパスで連結されている確率を算出する手法である。

最小カット法は、リンク途絶によってノード間が連結されなくなるとき、途絶するリンク数が最小となるようなリンクのカット集合を求め、ノード間の非連結状態が発生する確率を求める方法である。瀬戸ら<sup>4)</sup>は、何通りの経路で移動できるかを評価するため、全ODペアに非重複経路がN本存在するというN-edge-connected networkを使用している。これと同様の概念として、リンクの途絶に直目し、他の途絶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標がこれまでに提案されている<sup>5)</sup>。

中山<sup>10)</sup>が整理しているように、これまで時間信頼性あるいは連結信頼性に着目した研究は多く行われている。しかし、道路ネットワークの評価という観点では連結信頼性と時間信頼性という道路の信頼性を単独で評価するだけでなく、費用便益評価を含め、信頼性と便益評価を統合して評価することが必要である。このように連結・時間信頼性を統合的に扱う研究として、土倉ら<sup>7)</sup>がある。土倉ら<sup>7)</sup>は時間信頼性と連結信頼性を統合した道路ネットワークの評価手法を開発し、それを金沢市道路ネットワークに適用させ、開発した統合評価法の利用可能性を評価している。本研究では土倉らが開発した手法の利用可能性評価の次の段階として、手法の適用対象を石川県道路ネットワークに拡大し、改良の余地を考察する。

## 2. 道路ネットワークにおける信頼性

本章では、本研究で扱う時間信頼性と連結信頼性の2つの道路ネットワークにおける信頼性について、個々の評価方法を述べる。

### (1) 時間信頼性

時間信頼性は旅行時間のばらつきの程度に基づいた票方法である。1.に述べたように、ばらつきの統計量として一般的な標準偏差や分散は、旅行時間のばらつきの指標としては、道路利用者が認知するばらつきと必ずしも一致するとは限らない。このため、時間信頼性の指標として%タイル値を使用する研究がこれまで多くなされており、特に95%タイル値が最もよく用いられている。本研究でもこれを踏まえ、95%タイル値を用いることとする。ただし、%タイル値の設定は様々な要因によって異なると考えられ、厳密には詳細な調査のもと設定されることが望ましいと考えられるが、本研究では時間信頼性指標として使用されるべき望ましい%タイル値が判明している状況下での評価手法を提案することを目的とする。ただし、95%タイル値以外を設定する場合でも、パラメ

ータの数値変更によって対応可能であり、以降の議論には影響を与えない。

ここで、旅行時間の95%タイル値を考慮することの意味するところについて考えよう。旅行時間の95%タイル値を $t_{95}$ と表すことにする。これはある確率変数 $X$ （リンク旅行時間）が95%の確率で $X \leq t_{95}$ となるような値を指す。道路利用者は旅行時間の95%タイル値を考慮して行動するという事は、すなわち利用者は5%の確率で想定していた旅行時間 $t_{95}$ より遅れることを承知の上で行動すると仮定したことになる。

リンク旅行時間の%タイル値は、リンク交通量の%タイル値を旅行時間関数に代入することで容易に算出できる。一方、経路旅行時間はリンク旅行時間の和であるが、各リンクの旅行時間や交通量には相関があるために、経路を構成する全てのリンクの旅行時間の同時確率密度関数などがわからないと、経路旅行時間の%タイル値を求めることができない。そこで、本研究では今村ら<sup>8)</sup>の手法を援用し、近似的に経路旅行時間の%タイル値を求める。これにより、配分モデルから計算される各リンクの旅行時間の平均、分散、共分散によって経路旅行時間の平均と分散が計算可能である。本研究では今村ら<sup>8)</sup>、中山ら<sup>9)</sup>に従って交通量は正規分布に従うとするが、この場合でも一般に旅行時間は正規分布に従うとは限らず、旅行時間の分布形は旅行時間関数に依存する。更にリンク旅行時間の分布形と経路旅行時間の分布形も一致するとは限らない。本研究ではこのような経路の旅行時間分布を正規分布あるいは対数正規分布と近似した以下のケースで%タイル値を計算する。

#### a) 正規分布1

ここでは、交通量は正規分布に従うと仮定する。この点については3.で詳述する。後述する配分モデルから経路旅行時間の平均及び分散が計算可能であることから、ここでは経路旅行時間の分布をこの平均と分散を持つ正規分布と近似する。各経路旅行時間が標準正規分布に従うと仮定する。この場合、リンク旅行時間の期待値及び分散はそれぞれ式(1)、(2)で表される。

$$E[T] = t_0 \left\{ 1 + \frac{E[X^2]}{C^2} \right\} \quad (1)$$

$$\text{Var}[T] = E[T^2] - (E[T])^2 \quad (2)$$

ここで、 $X$ はリンク交通量の確率変数、 $T$ はリンク旅行時間の確率変数、 $E[\cdot]$ と $\text{Var}[\cdot]$ はそれぞれ平均と分散を計算する演算子である。また、リンク旅行時間はBPR関数によって計算する。

経路旅行時間は正規分布に従うと仮定していることから、その95%タイル値は標準正規分布表から式(3)によって算出される。

$$c_{95} = 1.645\sqrt{\text{Var}[C]} + E[C] \quad (3)$$

ここで、 $c_{95}$  は経路旅行時間の 95% タイル値、 $C$  は経路旅行時間の確率変数である。

b) 正規分布2

前項に示した手法とは別の視点で、経路旅行時間分布の正規分布への近似を考える。

ODペア  $rs$  の経路  $k$  の旅行時間を算出する関数を  $c_k^{rs}(-)$ 、全てのリンク交通量の確率変数を要素に持つ確率変数ベクトルを  $\mathbf{X}$  とすると、 $c_k^{rs}(\mathbf{X})$  は経路旅行時間の確率変数となる。経路旅行時間関数を式(4)のように交通量の平均値  $E[\mathbf{X}]$  周りに一次のテーラー展開をする。

$$c_k^{rs}(\mathbf{X}) \approx c_k^{rs}(E[\mathbf{X}]) + \nabla_{\mathbf{x}} c_k^{rs}(\mathbf{x}) \Big|_{\mathbf{x}=E[\mathbf{X}]} (\mathbf{X} - E[\mathbf{X}]) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{x}$  はリンク交通量 (の実現値) のベクトルである。なお、 $c_k^{rs}(E[\mathbf{X}])$  はリンク交通量が平均値である時の経路旅行時間、 $\nabla_{\mathbf{x}} c_k^{rs}(\mathbf{x}) \Big|_{\mathbf{x}=E[\mathbf{X}]}$  はリンク交通量が平均値である時の経路旅行時間の勾配であり、ともに確定値あるいは確定値ベクトルである。

リンク交通量が正規分布に従うと仮定していること、及び正規乱数の和もまた正規乱数となることから、式(4)によって与えられる経路旅行時間もまた正規分布に従う。また、この経路旅行時間の近似的な正規分布から、式(5)によって経路旅行時間の 95% タイル値を求めることができる。

$$c_{95} = 1.645 \sqrt{(\nabla_{\mathbf{x}} c_k^{rs}(\mathbf{x}) \Big|_{\mathbf{x}=E[\mathbf{X}]})^2 \sigma^2 + c_k^{rs}(E[\mathbf{X}])} \quad (5)$$

c) 対数正規分布

正規分布は扱いが容易である一方、 $-\infty$  から  $\infty$  までが定義域であるため負の値をとり得る。実際には旅行時間が負になるということは起こりえない。また左右対称であるために旅行時間の分布としてはふさわしくない場合も考えられる。このような問題点を踏まえ、0以上の領域で定義される分布形として対数正規分布を仮定する。ここでは経路旅行時間が式(6)のような対数正規分布に従うと仮定する。

$$\ln C \sim N(\lambda, \zeta^2) \quad (6)$$

ここで、

$$\lambda = \ln(E[C]) - \frac{1}{2} \zeta^2 \quad (7)$$

$$\zeta^2 = \ln \left( 1 + \frac{\text{Var}[C]}{E[C]^2} \right) \quad (8)$$

である。ただし、 $N(\lambda, \zeta^2)$  は平均が  $\lambda$ 、分散が  $\zeta^2$  の正規分布、 $E[C]$  は経路旅行時間の期待値、 $\text{Var}[C]$  は経路旅行時間の分散である。このとき経路旅行時間の95% タイル値は正規分布の累積分布関数  $\Phi((y - \lambda)/\zeta)$  に式(9)を代入し、式(10)を解くことによって最終的に式(11)によって求めることができる。

$$y = \frac{(\ln c_{95} - \lambda)}{\zeta} \quad (9)$$

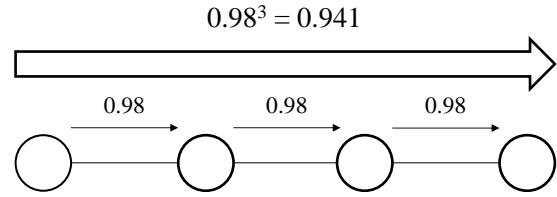


図-1 経路の連結確率の例

$$\Phi(y) = 0.95 \quad (10)$$

$$c_{95} = \exp(1.645\zeta + \lambda) \quad (11)$$

(2) 連結信頼性

連結信頼性は、リンクが通行できなくなるような障害 (リンク機能障害) が確率的に発生するとしたとき、障害の影響によって目的地まで到達不能とならない、すなわちリンク機能障害発生状況下であっても目的地に到達できるOD間のトリップ確率を評価するものである。

本研究では、平常時における道路ネットワークの信頼性を評価することを目的としている。平常時においては交通渋滞や交通事故などにより、全てのリンクで通行不能となるような障害が発生し得る。従って、各リンクには渋滞や事故の発生確率を考慮することによって独自の信頼度を定義することが可能であると考えられる。この信頼度を各リンクの連結確率と定義すれば、OD間の連結確率が定義できる。本研究ではこれを活用してODの間の連結便益を算出することとする。

ここで、OD間の連結確率の定義手法について考えよう。図-1のように、3つのリンクで構成される経路があるとす。3つのリンクの連結確率は全て0.98であると、経路全体の連結確率は  $0.98^3$  となる。厳密にODの間の連結確率を算出するためには最小パス法あるいは最小カット法を用いるのが妥当であると思われるが、計算簡略化のため、各ODの間で最小の旅行時間である経路の連結確率をそのOD間の連結確率とする。

3. 需要変動下での確率的利用者均衡配分モデル

本研究では確率要因として交通需要の確率的な変動と、リンクの確率的な途絶の2要因を考える。道路利用者は交通需要を事前に確実に知ることはできず、交通需要の変動を確率事象として捉えているとする。リンクの途絶は確率的に発生するものであるが、長期に渡る事象であることが多く、リンクの途絶に関する情報を利用者が得ることは容易であるとする。すなわち事前に利用者はリンクの途絶を把握しているものとする。

リンクの途絶は事前に把握できるため、通過可能なり



リンクのみで構成された道路ネットワークにおける均衡配分モデルを考える。先述の通り交通需要は確率的に変動するため、交通需要の確率的な変動下での均衡配分となる。リンクの途絶状態を利用者はあらかじめ把握しているが、リンク途絶は確率的に生起するため、通過可能なリンクで構成されるネットワークは様々な組合せとなる。

ひとつの通過可能なリンクで構成されたネットワークについて、今村ら<sup>8)</sup>・中山ら<sup>9)</sup>に従い、OD交通量は互いに独立な正規分布に従うと仮定し、このような正規分布に従うような確率分布をもったOD交通量をネットワークに配分する。さて、このような配分を実際の道路ネットワークに適用する際には一つの問題が生じる。確定的なOD交通量に関するデータは各種交通調査から得ることができ、これらをOD交通量の平均として捉えることができる。一方、分散についてはこれらのデータから算出することは困難な場合が多い。田中ら<sup>10)</sup>は、首都高速道路のOD交通量の平均値 $\mu$ と分散 $\sigma^2$ との関係について、非線形回帰分析により、 $\sigma^2=16\mu$ という関係を示している。本研究では田中ら<sup>10)</sup>の考えに基づき、OD交通量の分散は平均値の定数倍で表されると仮定する。

ODペア $rs$ 間のOD交通量を確率変数 $Q^{rs}$ とすると、その平均と分散はそれぞれ $E[Q^{rs}]$ 、 $Var[Q^{rs}]$ となる。ここで、OD交通量の分散は平均の定数倍であるとするならば、 $Var[Q^{rs}]$ は $\eta E[Q^{rs}]$ となる。ただし、 $\eta$ は正のパラメータである。

次に、ODペア $rs$ 間の経路交通量の平均を $\mu_k^{rs}$ 、分散 $(\sigma_k^{rs})^2$ を $\eta\mu_k^{rs}$ と表すことにする。ODペア $rs$ 間の経路 $k$ の集合を $K^{rs}$ 、起点ノードの集合を $R, S$ とすると、経路交通量の分布は以下の確率分布で示すことができる。

$$F_k^{rs} \sim N[\mu_k^{rs}, \eta\mu_k^{rs}] \quad (12)$$

ここで、 $F_k^{rs}$ はODペア $rs$ 間の経路 $k$ の経路交通量の確率変数である。

今村ら<sup>8)</sup>・中山ら<sup>9)</sup>に従い、経路交通量は互いに独立な正規分布に従うと仮定すると、独立な正規変数の和は正規変数になることから、正規分布に従うODの交通量と経路交通量の関係として以下のフロー保存則が成立する。

$$Q^{rs} = \sum_{k \in K^{rs}} F_k^{rs} \quad \forall r \in R, \forall s \in S \quad (13)$$

$$E[Q^{rs}] = \sum_{k \in K^{rs}} \mu_k^{rs}, Var[Q^{rs}] = \sum_{k \in K^{rs}} (\sigma_k^{rs})^2 \quad \forall r \in R, \forall s \in S \quad (14)$$

また、経路交通量とリンク交通量の関係についても、独立な正規変数の和は正規変数であるので、式(15)のようにリンク $a$ の交通量の確率変数 $X_a$ は正規分布に従う独立な経路交通量 $F_k^{rs}$ の和となる。加えて、 $\eta$ を用いることでその分布は式(16)で表される。

$$X_a = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \delta_{a,k}^{rs} F_k^{rs} \quad (15)$$

$$X_a \sim N \left[ \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \delta_{a,k}^{rs} F_k^{rs}, \eta \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \delta_{a,k}^{rs} F_k^{rs} \right] \quad (16)$$

ここで、 $\delta_{a,k}^{rs}$ はODペア $rs$ 間第 $k$ 経路がリンク $a$ を含むときは1、そうでないときは0である。

経路交通量は独立であると仮定したが、リンク間では同一の経路交通量が行くために必ずしも独立ではない。

ここまでは今村ら<sup>8)</sup>・中山ら<sup>9)</sup>と同様である。ただし、今村ら<sup>8)</sup>・中山ら<sup>9)</sup>では、利用者は最小旅行時間の経路を選択するが、本研究では経路選択は式(17)のようなロジックモデルに従うとする。ODペア $rs$ 間の経路選択肢集合 $K_{rs}$ から経路 $k$ が選ばれる確率 $P_k^{rs}$ は、

$$P_k^{rs} = \frac{\exp(-\vartheta c_{95,k}^{rs})}{\sum_{k' \in K_{rs}} \exp(-\vartheta c_{95,k'}^{rs})} \quad (17)$$

ここで、 $P_k^{rs}$ はODペア $rs$ 間において経路 $k$ が選択される確率、 $c_{95,k}^{rs}$ はODペア $rs$ 間の経路 $k$ の旅行時間の95%タイム値、 $K_{rs}$ はODペア $rs$ 間の経路選択肢集合、 $\vartheta$ は分散パラメータである。

式(17)によって、経路交通量は式(18)で表される。

$$\mu_k^{rs} = q^{rs} \frac{\exp(-\vartheta \cdot c_{95,k}^{rs})}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\vartheta \cdot c_{95,k}^{rs})} \quad (18)$$

ここで、 $q^{rs}$ はODペア $rs$ 間のOD交通量の平均値 (=  $E[Q^{rs}]$ )である。

以上より、交通需要が独立な正規分布に従う場合のロジック型均衡配分は、平均経路交通量を求める以下の変分不等式として定式化される。

Find  $\mu^* \in \Omega$  such that

$$\sum_{rs} \sum_k c_{95,k}^{rs}(\mu^*) \cdot (\mu_k^{rs} - \mu_k^{rs*}) \geq 0 \quad \forall \mu \in \Omega \quad (19)$$

ここで、 $c_{95,k}^{rs}(\cdot)$ は $\mu_k^{rs}$ はODペア $rs$ 間の経路 $k$ の平均経路交通量、 $\mu$ はそのベクトル、 $\Omega$ は $\mu$ のとり得る集合である。

#### 4. 便益評価式

時間信頼性と連結信頼性を統合した道路評価のため、本研究ではこれら2つの信頼性を統合したコスト算出式を定義する。

あるODについて、そのODが連結されている場合、少なくとも1つ以上の経路でそのOD間は連結されており、道路利用者はトリップを行うことができる。一方、全ての経路が途絶している、すなわちOD間が連結している場合にはそのOD間でトリップを行うことはできない。経路について考えれば、ある経路において、経路上のいずれか1つのリンクでも途絶してしまえばその経路でのトリップは不可能となる。この場合、利用者は別の経路でトリップを行う・他の交通機関を利用・トリップを行

わないのいずれかの行動を選択することになる。OD間が連結しておらずトリップが行えないことは利用者にとって明らかに不利益である。これをトリップキャンセルコスト $\kappa$ とし、通常のトリップに要するコストを上回るものとして定義する。この $\kappa$ の算入により、連結信頼性を含んだ便益評価が可能となる。なぜならば、道路整備などの交通施策を実施した場合には、道路ネットワークにおける連結性能には変化が生じるはずであり、トリップの可否に影響するためである。すなわちトリップキャンセルコストの変動は、ネットワークの連結性能の変動と連動しているためである。このようなトリップキャンセルコストを含んだ期待総旅行コストの基本式を式(20)のように定義する。

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q^{rs} [\pi^{rs} \lambda^{rs} + \kappa(1 - \pi^{rs})] \quad (20)$$

ここで、 $q^{rs}$ は OD ペア  $rs$  間の交通需要 (の平均値) ,  $\pi^{rs}$  は OD ペア  $rs$  間が連結されている確率,  $\lambda^{rs}$  は OD ペア  $rs$  間が連結されている場合のそのコストである。前章で交通需要は正規分布に従うとしたが、交通需要は一般に大きなものと想定すれば、大数の法則からそのばらつきは平均に比べて小さく、交通需要の実現値はその平均値のみと考えることにする。 $\lambda^{rs}$ については後述する。式(20)は時間信頼性・連結信頼性を統合した便益評価の考え方を段階を追って示すための式であり、実際には後述する別の便益算定式を使用する。

道路利用者のトリップに関する行動は、図-2のようなトリップを行うか、とりやめるか (もしくは他の交通期間を用いるか) の2項ロジットモデルで考えることができる。トリップを行う場合のランダム効用 $U^{rs}$ と、トリップをとりやめる場合のランダム効用 $\bar{U}^{rs}$ をそれぞれ式(21)、式(22)のように定義する。

$$U^{rs} = -\theta \lambda^{rs} + \varepsilon^{rs} \quad (21)$$

$$\bar{U}^{rs} = -\rho + \bar{\varepsilon}^{rs} \quad (22)$$

ここで、 $\theta$  は正のパラメータ、 $\rho$  は定数項、 $\varepsilon^{rs}, \bar{\varepsilon}^{rs}$  はランダム項である。

トリップをと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 $\rho$ とパラメータ $\theta$ から、トリップキャンセルコスト $\kappa$ を $\rho/\theta$ として得ることができる。

ODペア $rs$ 間が連結されていない場合はトリップをとりやめる選択しかできない。一方、連結されている場合はトリップを行う選択に加え、あえてとりやめる選択の両者が選択可能である。この場合の便益指標としてのログサム変数、すなわち最小コストの期待値は式(23)で与えられる。OD間間が連結されていない場合、そのOD間の旅行時間は $\infty$ であると考え、最大効用の期待値は式(24)で与えられる。OD間が連結されている確率が

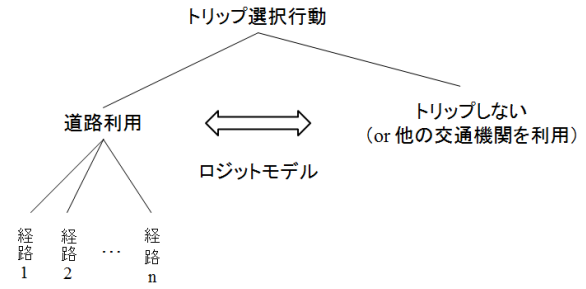


図-2 連結信頼性のための利用者選択構造

$\pi^{rs}$ であることを踏まえ、ログサム変数を式(20)に代入すると、式(25)が得られる。

$$-\frac{1}{\theta} \ln(e^{-\theta \lambda^{rs}} + e^{-\theta \kappa}) \quad (23)$$

$$-\frac{1}{\theta} \ln(e^{-\infty} + e^{-\theta \kappa}) = \kappa \quad (24)$$

$$-\frac{1}{\theta} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q^{rs} \pi^{rs} \ln[e^{-\theta \lambda^{rs}} + e^{-\theta \kappa}] + \kappa \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q^{rs} (1 - \pi^{rs}) \quad (25)$$

道路利用者のトリップ選択行動に図-2のような構造を仮定する場合は式(20)より式(25)の方が理論的に整合が取れている。

交通需要は正規分布に従って確率変動し、交通量及び旅行時間も確率変動する。加えて、道路利用者は経路旅行時間の95%タイル値を用いて行動していることから、トリップを行う場合のコストには旅行時間の95%タイル値を用いる必要がある。道路利用者の経路選択行動は式(18)によって記述されるため、ODペア $rs$ 間が連結しており、トリップを行う場合のコストは、

$$\lambda^{rs} = -\frac{1}{\theta} \ln \left( \sum_{k \in K} e^{-\theta c_{95,k}^{rs}} \right) \quad (26)$$

として与えることができる。ただし、 $c_{95,k}^{rs}$ は OD ペア  $rs$  の経路  $k$  の旅行時間の 95% タイル値である。

以上を整理すると、最終的な道路ネットワークの信頼性向上便益算定のための総旅行コスト算出式は式(27)となる。

$$-\frac{1}{\theta} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q^{rs} \pi^{rs} \ln \left[ \exp \left( \frac{\theta}{\theta} \ln \left[ \sum_{k \in K_{rs}} e^{-\theta c_{95,k}^{rs}} \right] \right) + \exp(-\theta \kappa) \right] + \kappa \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q^{rs} (1 - \pi^{rs}) \quad (27)$$

この総旅行コストの増減によって、時間信頼性・連結信頼性を含めた交通施策の便益評価が可能となる。

## 5. 石川県道路ネットワークへの適用

(1) ネットワーク概要

3章に示した配分モデル及び4章に示した統合評価法を石川県道路ネットワークへ適用する。

適用したネットワーク (図-3) はノード数1088, リンク数3292である。

交通需要の分散は平均の定数倍として考えるため, 今回は土倉ら<sup>7)</sup>と同様に $Var[X] = 42E[X]$ とした。また, 各ODにおけるトリップキャンセルコストについても土倉<sup>7)</sup>と同様に, 最小旅行時間の3倍に設定した。交通需要の平均については, 平成22年度道路交通センサスにおける平日朝6時台 (6:00~7:00) のデータを基に設定した。

各リンクの連結確率については便宜的に全リンク一律に0.99と設定した。リンクの連結確率は連結信頼性の評価に大きく影響することから, 実際には個々のリンクごとに設定値を検討する必要があるが, 本手法による詳細な道路評価のための設定値決定手法については今後の課題とし, 本研究では, 構築した時間信頼性と連結信頼性の統合評価法を実際の道路ネットワークへ適用した場合に得られる結果の特性や適用可能性を考察・検討することを目的とする。

(2) 適用結果

石川県道路ネットワークにおける手法の適用結果を示す。なお, ここでは, 経路旅行時間の分布を, 2章に示した正規分布1に近似したケースでの結果を示す。表-1に, 以下の3パターンでの便益計算結果を示す。

パターンⅠ: 時間信頼性と連結信頼性の両方を考慮した便益計算

パターンⅡ: 時間信頼性のみを考慮した便益計算

パターンⅢ: 連結信頼性のみを考慮した便益計算

以上の各パターンでの便益計算結果を比較すると, 時間・連結信頼性の双方を考慮したパターンが最も便益が高く計算されていることから, 従来の便益計算による手法や, 時間信頼性あるいは連結信頼性を単独で評価していた場合には把握が困難であった, 道路ネットワークの信頼性向上による便益を含んで評価できているものと考えられ, また, 石川県規模の道路ネットワークであっても, 本手法は適用可能であることが確認できた。

(3) 適用上の課題について

本手法の適用上の課題として, 各ODで利用される経路は予め与える必要があるが, 今回のような比較的規模の大きいネットワークを対象とした場合, 経路の列挙が非常に困難であることが課題の1つとして挙げられる。また, 列挙する経路が少なすぎると, 配分結果が現実と乖離する可能性があるが, 規模の大きなネットワークではOD数も必然的に多くなり, 経路を列挙し過ぎると計算負荷が増大するという問題もある。

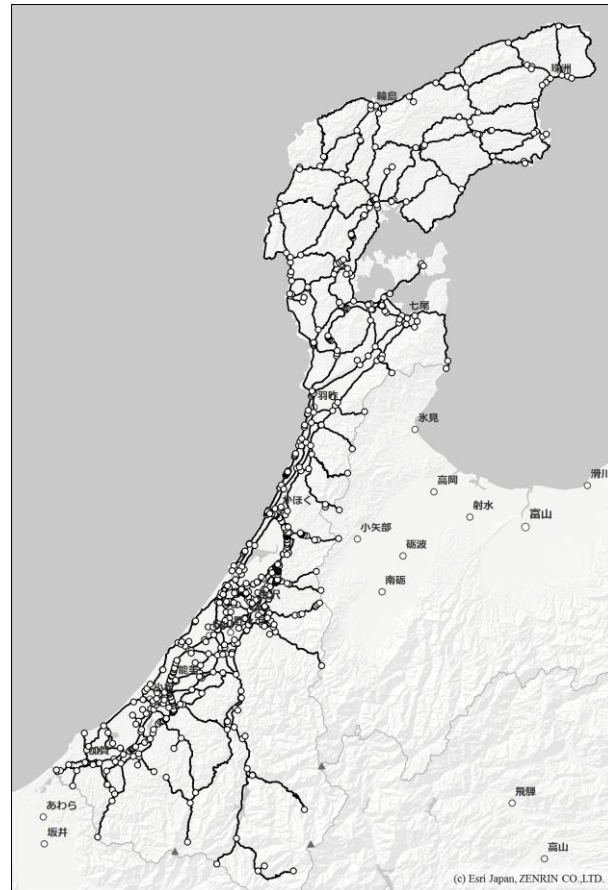


図-3 石川県道路ネットワーク図

表-1 各パターンにおける便益計算結果 (万円)

パターンⅠ	パターンⅡ	パターンⅢ
15,42万円	3,05万円	12,93万円

規模の大きなネットワークでは, ODをどのように設定するかも大きな課題である。土倉ら<sup>7)</sup>では, 第3回金沢都市圏PT調査結果を基にODを設定しているが, この調査では利用経路に関する調査が行われており, ノードレベルでのODを容易に設定することができた。しかし, 本研究のように, 道路交通センサスなど, 我々が把握できるのはBゾーンレベルのODであることが多い。また, 起終点としてのODの設定だけでなく, OD交通量についても, 我々が利用できるデータには誤差が含まれており, 修正が必要である。

また, 本手法の軸の一つである連稀有信頼性の評価にあたっては, 各リンクの連結確率をどのように与えるか, 加えてトリップキャンセルコストをどのように推定するかといった課題も残されている。

6. まとめ

本研究では, 道路ネットワークにおける信頼性として,



時間信頼性と連結信頼性の2つの代表的な信頼性に着目し、これらを含んだ期待総旅行コストを定義、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手法を提案した。加えて、信頼性を評価可能な確率的均衡配分によって得られる経路旅行時間の95%タイル値などを用いて、道路ネットワークにおいてリンクが追加されるような道路整備による便益を評価する手法を構築した。また、構築した手法を石川県道路ネットワークへ適用し、市レベルのネットワークだけでなく県レベルのネットワークにおいても、道路整備による連結信頼性や時間信頼性の変化部分も便益として計算可能であることを示した。

今後の課題としては、大規模なネットワークに適用する場合の経路の列挙手法、ODの設定手法、トリップキャンセルコストの推定手法、各リンクの連結確率の設定手法といった、本手法を実務的に利用するために必要な実際的な設定値の決定手法を確立することが挙げられる。

### 謝辞

本研究は国土交通省・道路政策の質の向上に資する技術開発の支援を受けて実施したものです。ここに記して、感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 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, 95-114, 2011.
- 2) 飯田恭敬，北村隆一：交通工学，オーム社，東京，2008.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.654I-52, pp.355-366, 2000.
- 6) 中山晶一郎：ネットワークレベルでの道路交通の信頼性の諸相・展望とその便益評価の一考察，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.67, No.2, 147-166, 2011.
- 7) 今村悠太，中山晶一郎，高山純一：旅行時間のパーセンタイル値に基づく利用者均衡配分モデルによる信頼性評価法とその金沢市道路ネットワークへの適用，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.67, No.5, pp.I\_625-I\_634, 2011.12.
- 8) 土倉悟，中山晶一郎，高山純一：時間信頼性と連結信頼性を統合した道路評価法の開発および金沢市道路ネットワークへの適用，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.69, No.5, pp.555-562, 2013
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 北澤俊彦，岩里泰幸，石橋照久，飛ヶ谷明人：阪神高速道路における所要時間信頼性評価，交通工学，Vol.45, No2, pp.28-35, 2010.
- 12) 宗像恵子，割田博：首都高速道路における所要時間信頼性を考慮した情報提供，交通工学，Vol.45, No.2, pp.22-27, 2010.
- 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, pp75-84, 1988.
- 14) 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.772IV-65, 67-77, 2004.10.
- 15) 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確率的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, 537-547, 2006.11
- 16) 飯田恭敬，若林拓史，福島博：道路網信頼性の近似解析方法の比較研究，土木学会論文集第 407 号，IV-11 1989.7.

(???)受付

## DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF A BENEFIT EVALUATION METHOD THAT UNIFIES TRAVEL TIME RELIABILITY AND CONNECTIVITY RELIABILITY

Shuji OSAWA, Shoichiro NAKAYAMA, Jyunichi TAKAYAMA and Makoto FUJIIU