

# 時間信頼性と連結信頼性に基づく道路ネットワーク 評価法の開発：金沢道路ネットワークへの適用

土倉 悟<sup>1</sup>・中山 晶一郎<sup>2</sup>・高山 純一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)  
E-mail: doken-y@stu.kanazawa-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 金沢大学准教授 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: snakayama@t.kanazawa-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 金沢大学教授 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@t.kanazawa-u.ac.jp

道路交通は確定的なものではなく、時間帯・時期・アクシデント等により変動する確率的なものなので、交通量配分を行う際には、道路ネットワーク上にある交通に影響を及ぼす様々な不確実性要素を考慮する必要がある。また、近年では単に道路ネットワークのサービスの向上だけではなく、安定的に提供することも求められるようになった。そこで、本研究では、道路の信頼性を評価することにより道路の不確実性および道路ネットワークのサービスを考慮した配分を行う。具体的には、確率的利用者均衡配分で配分する際に時間信頼性と連結信頼性を取り入れて配分する。さらに、適用する道路ネットワークに対してリンクを追加することによりどの程度便益が変化するかを比較する。そして最終的には、金沢市道路ネットワークに適用することで構築した配分モデルが利用できるものなのかを評価する。

**Key Words :** *traffic assignment, connectivity reliability, travel time reliability*

## 1. はじめに

道路ネットワークに関して、旅行時間そのものの値だけ計測しても不十分である。自然災害、事故などによる通行止めや大幅な遅延だけでなく、交通システムにとまなう規制や需要の変動を原因とする旅行時間の不確実な変動、つまりばらつきもしくは分散がどれほどであるかを把握すること。そしてそういったものを考慮して交通量配分を行うことが重要となる。

研究の目的としては、まず、信頼性についてどのように評価していくかを確立していく必要がある。また、道路交通の信頼性の分析では、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ため、ネットワーク全体で評価することが必要となる。信頼性を定量化していくため、信頼性の評価の際には、人がどのように捉えているのか、信頼性や変動がどのように人の行動に影響を与えているのかを考慮していく。

そうして信頼性を評価した後は、信頼性を考慮したモデルを確立する。そして連結の向上に対して道路の便益を評価する。最終的には、金沢道路ネットワークへ適用していく。

## 2. 信頼性について

道路交通の信頼性とは、道路交通のサービスを安定的に提供する能力のことである。本研究では、道路交通の信頼性として分類される時間信頼性と連結信頼性について評価したモデルを形成していく。

時間信頼性については、%タイル値を利用する。%タイル値は道路の時間信頼性を評価する際によく利用される指標であり、分散や標準偏差によるばらつきとして評価するよりも目で見分ける方がわかりやすい評価となる。本研究では、旅行時間を以下の3つの分布形と仮定して%タイル値を計算する。

### i) 正規分布 1

旅行時間が正規分布に従うと仮定した場合。

旅行時間とその分散の算出式はそれぞれ以下のとおりである。

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

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

このとき、旅行時間の95%タイル値は標準正規分布表から以下の式で算出できる。

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

## ii) 正規分布 2

BPR 関数を1次のテイラー展開することで旅行時間が正規分布に従うと仮定した場合、旅行時間が従う正規分布は以下のようになる。

$$t_a(X_a) \sim N \left( t_a(\bar{x}_a), \left( \frac{dt_a}{dx_a} \Big|_{x_a=\bar{x}_a} \right)^2 \sigma^2 \right) \quad (4)$$

(ここで、 $\sigma^2$ はリンク交通量の分散)

旅行時間が従う確率分布が特定できたので、その95%タイル値は標準正規分布の性質から、以下の式で求まる。

$$z_{95} = 1.65 \sqrt{\left( \frac{dt_a}{dx_a} \Big|_{x_a=\bar{x}_a} \right)^2 \sigma^2 + t_a(\bar{x}_a)} \quad (5)$$

## iii) 対数正規分布

旅行時間が対数正規分布に従うと仮定した場合、旅行時間が対数正規分布に従うということを式で表せば、 $\ln T \sim N(\lambda, \zeta^2)$ となる。ここで、 $\lambda = \ln(E[T]) - 1/2 \zeta^2$ 、 $\zeta^2 = \ln(1 + \text{Var}[T]/E[T])$ である。ただし、 $E[T]$ : 旅行時間の期待値、 $\text{Var}[T]$ : 旅行時間の分散。

このときの旅行時間の95%タイル値は確率分布関数  $\Phi\left(\frac{y-\lambda}{\zeta}\right)$  に、 $y = \frac{\ln T - \lambda}{\zeta}$  を代入し、 $\Phi\left(\frac{y-\lambda}{\zeta}\right) = 0.95$  を解くことで求まる。

旅行時間の95%タイル値は

$$T_{95} = \exp\{1.645\zeta^2 + (1 + \zeta)\lambda\} \quad (6)$$

となる。

また、連結信頼性については、後に説明する便益計算の式に対して経路の連結確率を導入して評価する。経路の連結確率については各リンクに連結確率を設けることで設定する。例えば、経路1の中に4つのリンクがあるとすると、4つのリンクの連結確率が0.9とすると経路1の連結確率は0.9<sup>4</sup>となる

## 3. 確率的利用者均衡配分モデル

### (1) モデルの概要

確率的利用者均衡配分において、道路利用者が認識している旅行コストに誤差項を導入するという考え方は、ランダム効用理論に基づく離散選択モデル(いわゆる非集計選択モデル)と同様のものである。すなわち、道路利用者の経路選択ルールに非集計選択行動モデルを適用したものが、確率的利用者均衡配分であると考えてよい。

OD ペア  $rs$  間の経路選択肢集合  $K_{rs}$  から経路  $k$  が選ばれる確率は、

$$P_{rs,k} = \frac{\exp(-\theta \cdot c_{rs,k})}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta \cdot c_{rs,k})} \quad (7)$$

ここで、 $P_{rs,k}$ : OD ペア  $rs$  間において経路  $k$  が選

択される確率、 $c_{rs,k}$ : OD ペア  $rs$  間の経路  $k$  の旅行コスト(道路料金の時間換算分を含む)、 $K_{rs}$ : OD ペア  $rs$  間の経路選択肢集合、 $\theta$ : 分散パラメータ  
したがって、経路交通量は以下の式で表わされる。

$$f_{rs,k} = q_{rs} \cdot P_{rs,k} = q_{rs} \cdot \frac{\exp(-\theta \cdot c_{rs,k})}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta \cdot c_{rs,k})} \quad (8)$$

ここで、 $f_{rs,k}$ : OD ペア  $rs$  間において経路  $k$  の経路交通量、 $q_{rs}$ : OD ペア  $rs$  間の OD 交通量

また、交通量保存則は

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_{rs,k} - q_{rs} = 0 \quad \forall rs \in \Omega \quad (9)$$

ここで、 $\Omega$  : OD ペアの集合である。

なお、式(3)から常に  $f_{rs,k} > 0$  であるから、経路交

通量の非負条件は自明である。

経路交通量とリンク交通量の関係は、

$$x_a = \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K_{rs}} \delta_{rs,k}^a \cdot f_{rs,k} \quad \forall a \in A \quad (10)$$

ここで、 $x_a$  : リンク  $a$  の交通量、 $\delta_{rs,k}^a$  : OD ペア

$rs$  間の経路  $k$  にリンク  $a$  が含まれるとき 1, 含まれないとき 0 となる変数、 $A$  : リンク  $a$  の集合

OD ペア  $rs$  間の経路  $k$  の旅行コスト  $c_{rs,k}$  は、経路を構成するリンクの旅行コストの和を用いて、以下のように表わされる。

$$c_{rs,k} = \sum_{a \in A} \delta_{rs,k}^a \cdot t_a \quad \forall rs \in \Omega, k \in K_{rs} \quad (11)$$

ここで、 $t_a$  : リンク  $a$  の旅行コスト(道路料金の時間換算分を含む)である。

## (2) リンクパフォーマンス関数

本研究では、リンク旅行時間の計算式として式(12)で与えられる BPR 関数を用いることにする。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \cdot \left\{ 1 + \alpha \cdot \left( \frac{x_a}{c_a} \right)^\beta \right\} \quad (12)$$

ここで、 $t_a(x_a)$  : リンク  $a$  の旅行時間、 $t_{a0}$  : リンク  $a$  の自由旅行時間( $x_a = 0$ )、 $c_a$  : リンク  $a$  の交通容量、 $\alpha, \beta$  : BPR 関数のパラメータ

## 4. 便益評価の式

トリップを行えない場合のコストを含んだ期待最小コストは以下のように与えることができる。

$$\sum_{i \in I} q_i \pi_i \lambda_i + \kappa \sum_{i \in I} q_i (1 - \pi_i) \quad (13)$$

ここで、 $q_i$  : 利用者数、 $\pi_i$  : OD ペア  $i$  間が連結

されている確率、 $\lambda_i$  : OD ペア間の最小旅行時間、 $\kappa$  : 禁止的時間

禁止的時間とは、連結していない場合のノード間の旅行時間を十分に大きな時間として設定したものである。この推定された  $\kappa$  を用いることでトリップを行えないことに対する不便益を算定できる。

また、式(7)について、最大効用の期待値を  $\ln[e^{-\theta \lambda_i} + e^{-\theta \kappa}] / \theta$  と与えて変形させると以下の式(14)となる。

$$\tilde{C}(\pi) = -\frac{1}{\theta} \sum_{i \in I} q_i \pi_i \ln[e^{-\theta \lambda_i} + e^{-\theta \kappa}] + \kappa \sum_{i \in I} q_i (1 - \pi_i) \quad (14)$$

ここで、 $\theta$  : 正のパラメータ、本研究では、式(14)を利用して連結性向上前と後とでコストの計算をして便益を比較する。

さらに、連結信頼性を考慮することで便益計算の結果にどの程度影響が出るかを知るために式(14)の  $\pi_i$  (OD ペア  $i$  間が連結されている確率) を 1 としたものとなる式(15)も計算して式(14)の結果と比較する。

$$\tilde{C}(\pi) = -\frac{1}{\theta} \sum_{i \in I} q_i \pi_i \ln[e^{-\theta \lambda_i} + e^{-\theta \kappa}] \quad (15)$$

また、便宜上式(14)で算出されるコストを期待最小コスト①、式(15)で算出されるコストを期待最小コスト②とする。

## 5. 金沢市道路ネットワークへの適用

### (1) ネットワーク概要

本研究では、金沢市道路ネットワークに対して、リンクを追加する前と後で交通量配分することでリンク追加による便益向上を算出する。追加するリンクは主に山側環状道路に属するリンクとする。リンクを追加する前のノード数は 140, リンク数は 464. リンクを追加した後のノード数は 149, リンク数は 494 である。対象とするネットワークを図 1 に示す。赤いノードとリンクが追加される山側環状道路の属するノード、リンクになる。

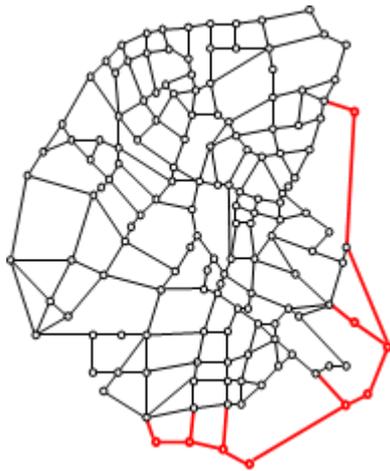


図1 ネットワーク概要

リンクパフォーマンス関数の BPR 関数のパラメータについて  $\alpha=1.0, \beta=2.0$  とする. 交通量の分散値は実測値より  $Var[X]=\eta E[X]=42E[X]$  とする. また, 式(8), (9)において, 各リンクの連結確率を 0.98, 各 OD の禁止的時間を [OD の最小旅行時間]  $\times 3$  とする.

## (2) 配分結果の妥当性

計算結果を表 1 に示す. 計算結果より相関係数はおおよそ 0.8 となり配分結果は妥当とする. 相関係数は正規分布 2 のものがわずかながら最も高い値となった. また, 配分した平均交通量での相関係数は 0.7936 となり 95% タイル値で評価した相関係数と大差がないという結果になった.

表 1 相関係数

	平均	%タイル値		
		正規分布1	正規分布2	対数正規分布
相関係数	0.7936	0.7994	0.8036	0.7894

## (3) 便益計算結果

式(14), (15)で算出した期待最小コスト①および②の計算結果を表 2, 3 に示す. 期待総旅行コスト①について山側環状道路を追加する前後でのコストの差は平均値で 99929, 95% タイル値で 129663 (これは 3 つの分布形で算出したものの平均) となり, この値分の減少効果が得られたことになる. このことからリンクを追加することで確かにコストが減少することが確認できた.

期待最小コスト②について山側環状道路を追加する前後でのコストの差は平均値で 65120, 95% タイル値で 104002 となった.

表 2 期待最小コスト①

①	平均値	正規分布1	正規分布2	対数
山環なし	1239076	1570076	1545077	1605203
山環あり	1139147	1441019	1417546	1472803

表 3 期待最小コスト②

②	平均値	正規分布1	正規分布2	対数
山環なし	930006	1326868	1296909	1368953
山環あり	864886	1223612	1195767	1261344

期待最小コスト①-②について, この値が連結確率を導入して得られる連結信頼性の分のコストとなる.

## 6. まとめ

%タイル値や道路連結確率を導入することで信頼性を評価することで, 旅行時間の不確実性を表すことができ, 金沢道路ネットワークに対して山側環状道路の建設の前と後の道路ネットワークを比較することで, 山川環状道路の建設における道路の便益向上を評価することができた. 今後の課題としては, より精密に便益を評価するため旅行時間の%タイル値を旅行時間が正規分布等になると仮定して計算するのではなく, 実際の確率密度関数を割り出して計算する, また, 連結確率についてもリンクごとの相関も考慮したもので計算することが必要である.

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 今村悠太: 旅行時間信頼性を考慮した利用者均衡配分モデルの構築及びその金沢市道路ネットワークへの適用, 平成 22 年度 修士学位論文