

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

土倉 悟¹・中山 晶一郎²・高山 純一³

¹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

²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

³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おいて交通量が確率的に変動することは交通量調査等により明らかであり、また、感覚的にもわかることである。そこで問題となるのは、交通量が確率的に変動することで旅行時間も確率的に変動してしまうことである。旅行時間が変動することで、利用者の行動原理も変わっていくことになるので、それを考慮した均衡配分を行う必要がある。

そのためには旅行時間そのものの値を計測するだけでは不十分である。自然災害、事故などによる通行止めや大幅な遅延、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しなければいけない。

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。

時間信頼性とは、所定の所要時間以内で目的地に到達できる確率を評価するもので、主に平常時での所要時間の安定性を対象にする。連結信頼性とは、リンク機能障害が確率的に発生するとしたとき、リンク障害の影響を受けずに目的地に到達できるOD間でのトリップ確率を評価するものである。

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て分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%マイル値を計算する。

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%マ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、 σ^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%マ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%マイル値は確率分布関数 $\Phi((y-\lambda)/\zeta)$ に $y = (\ln T - \lambda)/\zeta$ を代入して、 $\Phi((y-\lambda)/\zeta) = 0$ を解くことで求まる。最終的に旅行時間の95%マイル値は

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

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。本来ならば、最小パス法や最小カット法を用いて各経路の連結確率を厳密に計算する必要があるのだが、簡略化のために経路の連結確率はその経路に含まれるリンクの連結確率を直列的にかけ合わせたものとする。例えば、経路1の中に4つのリンクがあるとする。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 0.9^4 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、 θ : 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、 Ω : 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($x=0$)、 c_a : リンク a の交通容量、 α, β : BPR 関数のパラメータ
また、BPR 関数のパラメータについて $\alpha=1.0, \beta=2.0$ とする。

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。

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

ここで、 q_i : 利用者数、 π_i : OD ペア i 間が連結されている確率、 λ_i : OD ペア間の最小旅行時間、 κ : 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 κ 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。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、道路利用者の行動選択は図 1 の通りとなる。

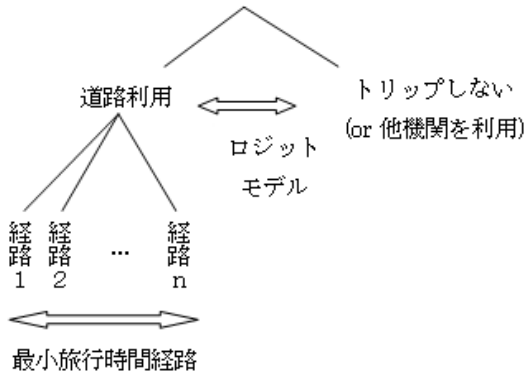


図 1 連結信頼性のための利用者選択構造

また、式(7)について、最大効用の期待値をと $\ln[e^{-\theta \lambda_i} + e^{-\theta \kappa}] / \theta$ 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、 θ : 正のパラメータ、さらに、利用者が認知できる確率要因ベクトルを Z とすると、連結性向上便益計算のための総コストは以下の式になる。

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

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比較をする。

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(15)の π_i (OD ペア i 間が連結されている確率) を 1、 κ を 0 としたものとなる式(16)も計算する。そして式(14)–式(15)により連結信頼性の分のコストを計算する。

$$\tilde{C}(Z) = -\frac{1}{\theta} \sum_{i \in I} q_i \pi_i(Z) \ln[e^{-\theta E[\lambda_i(Z)]}] \quad (16)$$

また、便宜上式(15)で算出されるコストを期待総旅行コスト①、式(16)で算出されるコストを期待総旅行コスト②とする。

5. 単純ネットワークへの適用

(1) ネットワーク概要

本研究の計算モデルを単純ネットワークに適用させる。リンク 4 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。

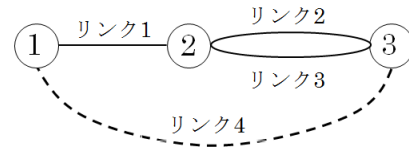


図 2 対象とする単純ネットワーク

ノード数は 3、リンク数は 3 (リンク追加後は 4)、OD 数は 2、経路数は 4 (リンク追加後は 5) である。ネットワークの各 OD 交通需要等は次の表に示すとおりである。

表 1 OD 交通需要および禁止的時間

	OD1 ノード1と3の間	OD2 ノード2と3の間
平均(台)	1600	1000
分散(台 ²)	65600	41000
禁止的時間(分)	60	30

表2 旅行時間関数についての設定

	自由走行時間(分)	交通容量(台)	連結確率
リンク1	10	2000	0.98
リンク2	10	2000	0.98
リンク3	5	1000	0.98
リンク4	20	2000	0.98

(2) 期待総旅行コストの計算

期待総旅行コストを求めるために各ネットワーク状態における各 OD 間の最小旅行時間 t_i を求め、 $E[\lambda_i(Z)]$ を算出する。その結果を表3に示す。やはり、リンク4追加後の最小旅行時間の方が追加前のものより小さい値をとった。

表3 各 OD の最短旅行時間の期待値 (上: リンク追加前, 下: リンク追加後)

	平均値	正規分布1	正規分布2	対数正規分布
$E[\lambda_1(Z)]$	30.03	37.73	37.27	38.33
$E[\lambda_2(Z)]$	12.75	17.17	16.89	17.58

	平均値	正規分布1	正規分布2	対数正規分布
$E[\lambda_1(Z)]$	21.96	25.98	25.78	26.07
$E[\lambda_2(Z)]$	9.80	12.89	12.67	13.16

算出した期待総旅行コスト及び円換算したものを表4に示す。期待総旅行コストについて、平均値では約16500(分・台)の減少、95%タイル値では約23500(分・台)の減少が見られた。これを円換算すると平均値では約460(円)の減少、95%タイル値では約650(円)の減少となる。

表4 期待総旅行コスト(分・台)とその円換算(円)

	平均値	正規分布1	正規分布2	対数正規分布
リンク追加前	63049.7	79205.9	78228.5	80534.0
リンク追加後	46560.5	55883.1	55351.1	56289.9

	平均値	正規分布1	正規分布2	対数正規分布
リンク追加前	1772.7	2241.5	2213.0	2280.8
リンク追加後	1317.1	1595.6	1579.0	1609.7

6. 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。



図3 金沢市道路ネットワーク

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。

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]×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

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
0.7936	0.7994	0.8036	0.7894	

(3) 期待総旅行コストの計算

金沢市道路ネットワークについては計算中なので学会当日に説明する。

7. 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、リンク追加による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.62No.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