

# 旅行時間の不確実性を考慮した確率ネットワーク均衡モデルを用いた時間信頼性評価手法： 金沢道路ネットワークを例に\*

Travel Time Reliability Evaluation with A Stochastic Network Equilibrium Model Considering Travel Time  
Uncertainly: An Analysis of Kanazawa Road Network\*

長尾一輝\*\*・中山晶一朗\*\*\*・高山純一\*\*\*\*

By Kazuki NAGAO, Shoichiro NAKAYAMA, and Jun-ichi TAKAYAMA

## 1.はじめに

道路整備に関する財政状況が厳しさを増す中、質の高い社会資本整備や効率的で透明性の高い行政サービスの提供が求められている。

国土交通省では、道路整備の効果をよりわかりやすく明確に表示することを目的に「道路行政業績計画書」を作成し、公表を行っている。具体的には「渋滞損失時間」、「死傷事故率」、「規格の高い道路を使う割合」等が指標となっている<sup>1)</sup>。

これらに加え、最近では「時間信頼性」が重要な指標として注目されている。現在、道路の評価指標として用いられている「渋滞損失時間」は各時間帯の平均旅行速度を用いて算定されている。一方で、実際の旅行速度、旅行時間は日によって、時間帯によって変動しており、道路のパフォーマンスをより適切に評価するためには、そうした変動を考慮することがより適切と考えられる。なお、道路の時間信頼性指標が交通需要予測において主要な説明要因の一つと成りうることについては加藤ら<sup>2)</sup>によって示されている。

時間信頼性の指標化は、従来から多く行われてきている。

加藤ら<sup>2)</sup>は、通勤者の遅刻に対する安全余裕時間について数量化を試み、定時性と速達性からみた道路の信頼性評価の簡便法を提案している。さらにこの簡便法の交通計画を模索する上での有効性についても、事例研究を通して検討を加えている。

井上ら<sup>3)</sup>は、確率的利用者均衡理論を用いて、道路網上の交通量、旅行時間、経路選択のランダム変動を

記述し、これをもとに道路網上の旅行時間の信頼性を指標化している。

朝倉ら<sup>4)</sup>は、リンク交通量の日々のデータを用いて道路ネットワーク交通流の日々の変動を推計できるモデルを開発し、道路網の時間信頼性評価への応用を試みている。具体的には、観測リンク交通量を用いた OD 交通量推計モデルを援用することにより開発したモデル (LITMAS) を用いてリンク交通量の日変動を推計しつつ OD ペア間の所要時間を推計することにより、道路網の時間信頼性指標を求める方法を示している。更に、一連の方法を松山都市圏道路網へ適用し、複数のデータを用いて実証性を確かめている。

また、英米等諸外国においても、近年時間信頼性が重要な指標になりつつある<sup>5)</sup>。

英国では、渋滞の指標として「移動時間の信頼性」が設定されている。これは、設定されたルートについて平日の毎日朝 6 時から夜 8 時の間で 15 分ごとに移動時間を計測し、その中の遅い方から 10% のトリップについての遅延時間の平均値を指標とするものである。

一方、米国においても渋滞の指標として「移動時間の信頼性」が設定されている。こちらは、英国とは考え方が異なり、具体的には「Planning Time (旅行時間の 95% タイル値)」、「Buffer Index (旅行時間の 95% タイル値 - 平均旅行時間)」等が用いられている。

時間信頼性指標を算出するアプローチとしては、プローブカーから旅行時間を取得する方法や日々の交通量データから旅行時間を推定する方法等、様々な方法があるが、ネットワーク全体を対象とした評価や新規道路の開通の効果予測における時間信頼性評価には、交通ネットワーク均衡モデルを用いる手法が適していると考えられる。

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として、以前著者らは OD 交通量が正規分布に従うと仮定し、正規分布に従う交通量を配分する確率的な交通ネットワーク均衡モデルを提案している<sup>6),7)</sup>。この均衡モデルは、従来までのワードロップ均衡が確定値としての OD 交通量を確定的に配分していた点を大きく拡張し、確率的な OD 交通量を確率的な交通量として配分

\*キーワード: 旅行時間信頼性, 交通ネットワーク均衡

\*\*正員, 工修, オリエンタルコンサルタンツ東北支社  
(宮城県仙台市若林区土樋 104 OC 仙台ビル,  
e-mail: nagao-kz@oriconsul.co.jp)

\*\*\*正員, 博(工), 金沢大学大学院自然科学研究科  
(金沢市角間町,  
e-mail: snakayama@t.kanazawa-u.ac.jp)

\*\*\*\*フェロー, 工博, 金沢大学大学院自然科学研究科  
(金沢市角間町,  
e-mail: takayama@t.kanazawa-u.ac.jp)

するものである。そして、アウトプットとして確率分布を持つ旅行時間を算出することが可能であり、交通ネットワークの時間信頼性評価に応用することも可能と考えられる。

そこで本稿では、以前著者らが提案した確率ネットワーク均衡モデル<sup>6),7)</sup>を用いた時間信頼性の評価を行うための指標を提案する。そして、提案した指標を用いて実際の金沢道路ネットワークにおける時間信頼性の評価を行うことを目的とする。

## 2. 旅行時間の不確実性を考慮した確率ネットワーク均衡モデル

本章では、以前著者らが提案した確率ネットワーク均衡モデル<sup>6),7)</sup>について説明する。

### (1) 交通量の分布

交通量や旅行時間が変動し、ばらつく原因には様々なものが考えられるが、事故や災害などが発生していない通常の交通では、交通需要が不確実である(確率的に変動している)ことが一つの大きな原因であろう。そこでこのモデルでは、正規分布の OD 交通量を正規分布の交通量として配分する。具体的には、以下に概説するように、道路ネットワークの経路交通量は互いに独立な正規分布に従うとともに、その分散は平均の定数倍であるという仮定を置くことによって確率的な経路交通量及び OD 交通量を与える。

OD ペア  $rs$  間における OD 交通量を確率変数  $Q^{rs}$  とし、その平均と分散をそれぞれ  $E[Q^{rs}]$ ,  $\text{Var}[Q^{rs}]$  とする。ここで、OD 交通量  $Q^{rs}$  の分散  $\text{Var}[Q^{rs}]$  は  $\eta E[Q^{rs}]$  と仮定する。つまり、OD 交通量について平均  $E[Q^{rs}]$  に比例して分散が決まると仮定する。ただし、 $\eta$  は正のパラメータである。

次に、経路交通量は互いに独立であると仮定する。また、経路交通量の分散  $(\sigma_k^{rs})^2$  を  $\eta \mu_k^{rs}$  と仮定する。ここで、 $\mu_k^{rs}$  及び  $(\sigma_k^{rs})^2$  はそれぞれ OD ペア  $rs$  間の経路  $k$  の(経路)交通量の平均及び分散、OD ペア  $rs$  間の経路  $k$  の集合を  $K^{rs}$ 、OD ペア  $rs$  の起点ノード及び終点ノードの総合をそれぞれ  $R$ ,  $S$  とする。ゆえに経路交通量は以下の確率分布で表すことができる。

$$F_k^{rs} \sim N[\mu_k^{rs}, \eta \mu_k^{rs}] \quad (1)$$

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、 $N[\mu_k^{rs}, \eta \mu_k^{rs}]$  は平均  $\mu_k^{rs}$ 、分散  $\eta \mu_k^{rs}$  を持つ正

規分布を表す。

このような仮定をおくことによって、OD 交通量と経路交通量の間には、次式に示すような(確率変数としての)フロー保存則が成立する。

$$Q^{rs} = \sum_{k \in K^{rs}} F_k^{rs} \quad \forall r \forall s \forall k \quad (2)$$

$$E[Q^{rs}] = \sum_{k \in K^{rs}} \mu_k^{rs} \quad \text{Var}[Q^{rs}] = \sum_{k \in K^{rs}} (\sigma_k^{rs})^2 \quad \forall r \forall s \forall k \quad (3)$$

次に、各リンク交通量は独立であると仮定する。このとき、独立な正規変数の和は正規変数になるため、式(4)の通り、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  $F_k^{rs}$  の和となり、それは式(5)に示す正規分布となる。

$$X_a = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K^{rs}} \delta_{a,k}^{rs} F_k^{rs} \quad (4)$$

$$X_a \sim N \left[ \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K^{rs}} \delta_{a,k}^{rs} \mu_k^{rs}, \eta \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K^{rs}} \delta_{a,k}^{rs} \mu_k^{rs} \right] \quad (5)$$

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 1 であり、そうでないときは 0 である。

### (2) 期待旅行時間の算出

リンクの走行時間が BPR 関数に従うと仮定すると、自動車のリンク旅行時間  $t_a^c$  は  $t_{a0} \{1 + \alpha(x_a / C_a)^\beta\}$  で表される。ただし、 $t_a^c$  はリンク  $a$  の自動車旅行時間、 $t_{a0}$  は自由走行時間、 $C_a$  は交通容量(固定値)、 $x_a$  は自動車交通量、 $\alpha$ ,  $\beta$  は BPR 関数のパラメータである。したがって、リンク  $a$  の期待旅行時間は  $E[t_{a0} \{1 + \alpha(X_a / C_a)^\beta\}]$  であり、それを計算するためには  $E[X^\beta]$  が計算できれば良い。ここで、 $X$  は交通量の確率変数である。  $E[X^n]$  の計算には積率母関数  $M_a(s)$  を用いることができる。積率母関数の性質から  $E[(X_a)^n]$  は  $d^n M_a(s) / ds^n \Big|_{s=0}$  として計算される<sup>8)</sup>。ゆえに期待リンク旅行時間は以下の式となる。

$$E[T_a] = t_{a0} + \alpha \cdot \frac{1}{C_a^\beta} \cdot \frac{d^\beta M_a(s)}{ds^\beta} \Big|_{s=0} \quad (6)$$

ただし、 $T_a$  はリンク  $a$  の(リンク)旅行時間の確率変数である。

前節で述べたように交通量は正規分布に従うため、 $X_a$  は正規変数である。正規分布の積率母関数  $M_a(s)$  は  $\exp(\mu_a s + \sigma_a^2 s^2 / 2)$  である。ただし、 $\mu_a (= \sum_r \sum_s \sum_k \delta_{a,k}^{rs} \mu_k^{rs})$  は

正規分布の平均,  $\sigma_a^2 (= \eta \mu_a)$  はその分散である. ゆえに期待リンク旅行時間関数  $E[T_a]$  は  $\mu_a$  の式で表される. ここで,  $\mu_a$  の関数であることを明示するために  $E[T_a]$  を  $g_a(\mu_a)$  と表記すると,  $\beta=4$  のとき,  $g_a$  は次式となる.

$$g_a(\mu_a) = t_{a0} [1 + \alpha \{3(\eta\mu_a)^2 + 6\mu_a^2(\eta\mu_a) + \mu_a^4\} / C_a^4] \quad (7)$$

リンク旅行時間の分散  $\text{Var}[T_a]$  は  $E[(T_a)^2] - E[T_a]^2$  であり,  $E[(X_a)^{2n}]$  及び  $E[(X_a)^n]$  を用いれば計算することができる. そして, それらも積率母関数を用いて計算することができる.

### (3) 定式化

このモデルは, ワードロップ均衡と同様に, 以下のよう  
に定式化でき, Frank-Wolfe 法などを用いて解くことができる.

$$\min Z = \sum_a \int_0^{\mu_a} g_a(w) dw \quad (8)$$

subject to

$$E[Q^{rs}] = \sum_{k \in K^{rs}} \mu_k^{rs} \quad \forall r \quad \forall s \quad \forall k \quad (9)$$

$$\mu_a = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K^{rs}} \delta_{a k}^{rs} \mu_k^{rs} \quad \forall r \quad \forall s \quad \forall k \quad (10)$$

$$\mu_a \geq 0 \quad \mu_k^{rs} \geq 0 \quad \forall r \quad \forall s \quad \forall k \quad (11)$$

ここで

$g_a(\cdot)$ : リンク  $a$  の期待リンク旅行時間関数

$E[Q^{rs}]$ : OD 交通量

$\mu_a$ : リンク交通量の期待値

$\mu_k^{rs}$ : 経路交通量の期待値

### 3. 時間信頼性指標の算出

以前著者らが提案した確率ネットワーク均衡モデル<sup>6),7)</sup>を用いることによって得られる確率的な旅行時間を用いて, 道路の評価指標としての時間信頼性指標を算出する.

道路の評価指標として一般的に用いられている「渋滞損失時間」は, 以下の式によって算出される<sup>9)</sup>.

$$\text{渋滞損失時間} = \left\{ \frac{\text{区間の距離}}{\text{通常時の旅行速度}} - \frac{\text{区間の距離}}{\text{基準旅行速度}} \right\} \times \text{区間交通量} \times \text{平均乗車人数}$$

そこで本稿では, 渋滞損失時間と相互比較が可能なように, 時間信頼性指標として新たに以下に示す「早発損失時間」を定義する.

$$\text{早発損失時間} = \gamma \times \frac{\text{旅行時間の標準偏差}}{\text{区間交通量}} \times \text{平均乗車人数}$$

$\gamma$ : リスク態度パラメータ

渋滞損失時間が, 渋滞が無い場合の旅行時間を基準として通常(渋滞がある場合)の旅行時間との差の損失であるのに対し, 早発損失時間は, 遅刻等のリスクを回避するために余裕を持って早めに出発する分の時間(安全余裕時間<sup>2)</sup>)の損失と位置付けられる. また, Buffer Index や旅行時間の標準偏差等を用いた信頼性評価との違いとして, 渋滞損失時間と同様に, 区間の利用者数を考慮した評価が可能となる点が挙げられる.

なお, 上式のパラメータ  $\gamma$  (リスク態度パラメータ) は道路利用者のリスク回避の度合いを表現するものである. 本稿では, 参考文献<sup>10),11)</sup>の結果を考慮し,  $\gamma=1.0$  として次章の数値計算を行った. しかし, パラメータ  $\gamma$  の適正な設定については検討が必要であり, これは今後の課題である.

### 4. 金沢道路ネットワークの時間信頼性評価

金沢道路ネットワークを対象に, 時間信頼性の評価を行う. 具体的には, 本稿にて定義した早発損失時間をリンク毎に算出し, 損失値の大きいリンクの把握, 渋滞損失時間との比較を行う.

適用するネットワークは図-1 に示すとおりである. ノード数は 140, リンク数は 456 である.

モデル適用のために使用した OD 交通量の平均は, 平成 7 年の第 3 回パーソントリップ調査をもとに作成した平日の朝 7 時から 8 時の OD 交通量とし, OD 交通量の分散はネットワーク内の交通量データにより  $\eta=42.0$  とした. また, 旅行時間関数は標準的な BPR 関数のパラメータを用いた. なお, 計算は Frank-Wolfe 法を用いている.



図-1 対象とした金沢道路ネットワーク

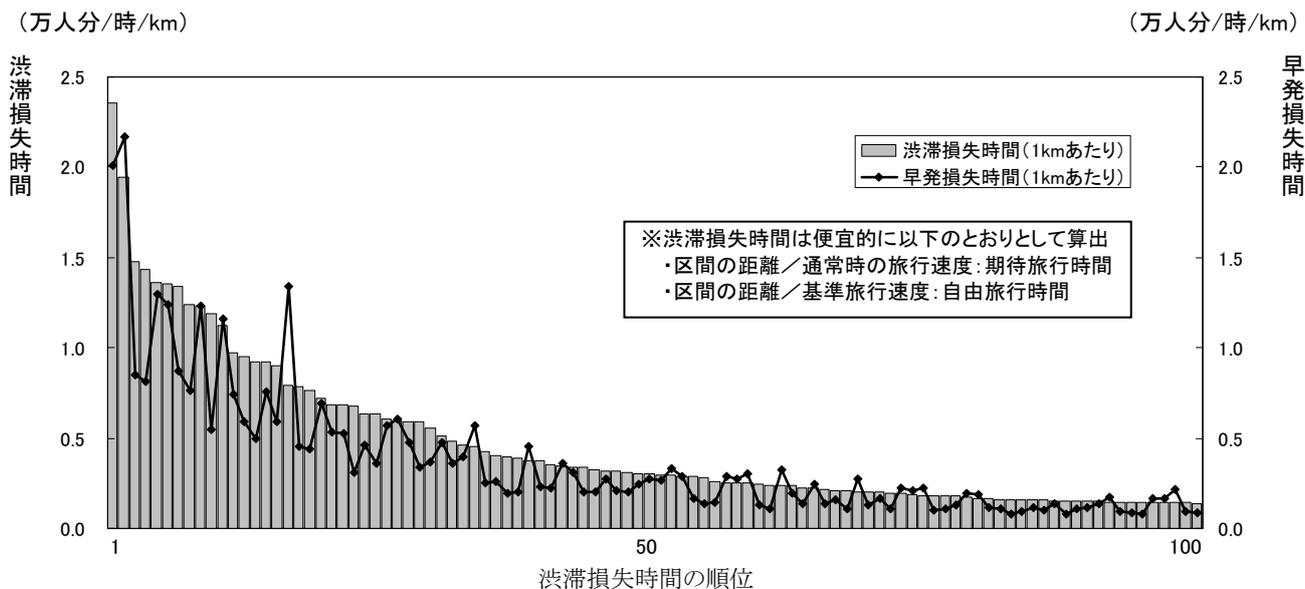


図-2 リンク渋滞損失時間及び早発損失時間(渋滞損失時間の上位100リンク, 7時台)

渋滞損失時間の上位100リンクについて、渋滞損失時間及び本稿にて定義した早発損失時間を算出すると図-2のとおりとなる。なお、前章において述べたとおり、 $\gamma$  (リスク態度パラメータ)は1.0とした。

渋滞損失時間の順位と早発損失時間の順位は必ずしも一致しないことが分かる。今後、信頼性指標を用いた分析を更に詳細に実施する必要があるが、早発損失時間を道路の評価指標として用いることによって、これまでに把握できなかった道路ネットワーク上の問題箇所等が把握できるとともに、算出した早発損失時間を渋滞損失時間と比較すること等によって、総合的に道路ネットワークを評価することが可能になると予想される。

## 5. おわりに

本稿では、交通量の変動を考慮した交通ネットワーク均衡モデルを用いて金沢道路ネットワークの時間信頼性評価を行った。具体的には、時間信頼性指標として新たに「早発損失時間」を定義し、金沢道路ネットワークにおいて損失値の算出を実施した。

金沢道路ネットワークにおける更に詳細な分析結果については講演時に発表する。また、今後は旅行時間の標準偏差について実際の値との整合性の確認、OD交通量のパラメータ $\eta$ の適切な設定、新規道路整備を対象としたケーススタディ、時間帯別の分析等を実施していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 高山純一, 中山晶一郎, 小松良幸: 交通需要の不確実性による時間信頼性指標を用いた道路整備評価に関する研究, 第41回日本都市計画学会学術論文集, pp.79-84, 2006.
- 2) 加藤文教, 門田博知, 浜田信二: 道路の信頼性評価の簡便法, 土木計画学研究・論文集, No.4, pp.181-188, 1986.
- 3) 井上博司・飯田祐三・岸野啓一: 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
- 4) 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, No482/IV-22, pp.17-25, 1994
- 5) 西尾崇: 「道路行政と業績評価」に関する国際会議の開催について, 高速道路と自動車, 第49巻, 第2号, pp.52-56, 2006.
- 6) 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.
- 7) 中山晶一郎, 高山純一, 長尾一輝: 道路利用者のリスク態度を考慮した金沢道路ネットワークの均衡分析, 第59回土木学会年次学術講演会講演概要集, on CD-ROM, 2004.
- 8) アルフレッド・アン, ウィルソン・タン: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, 1977.
- 9) 主要指標現況値算出マニュアル平成15年度版, 国土交通省道路局企画課 道路事業分析評価室, 2003.
- 10) Bates, J., Polak, J., Jones, P. and Cook, A.: The valuation of reliability for personal travel, Transportation Research, Vol. 37E, pp. 191-229, 2001.
- 11) 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.