A reliability evaluation method with a traffic assignment-model based on travel time percentile value and its application to the road network of Kanazawa City

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00009890

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.

旅行時間のパーセンタイル値に基づく交通均衡配分モデルを用いた信頼性評価法とその金沢市道路ネットワークへの適用

今村　悠太[1]・中山　晶一朗[2]・高山　純一[3]

[1]正会員　中央コンサルタンツ（〒451-0042 名古屋市西区那古野二丁目11番23号）
E-mail: y.imamura.info@gmail.com

[2]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

[3]フェロー会員　金沢大学教授　環境デザイン学系（同上）
E-mail: takayama@t.kanazawa-u.ac.jp

現実の道路ネットワークでは，様々な要因により旅行時間や交通量は変動する．旅行時間のばらつきは交通行動の主要な決定要因の一つであり，それを道路整備の便益評価，交通計画や交通政策に取り入れることは重要であろう．本研究では，旅行時間のばらつきの尺度として，直感的な理解が容易なパーセンタイル値に着目する．旅行時間のパーセンタイル値に基づき，実用的にも適用可能な信頼性の評価法を目指し，旅行時間のパーセンタイル値を出力する交通ネットワーク均衡配分モデルを構築することが本研究の目的である．さらに，そのモデルを金沢市道路ネットワークに適用し，モデルを用いた信頼性評価法の現実ネットワークへの適用可能性について考察する．

Key Words : *network equilibrium model, travel time reliability, travel time percentile value*

1.　はじめに

実際の道路ネットワークでは，様々な要因により旅行時間や交通量は変動している．特にピーク時に何らかの突発的な事象が発生すると，円滑な交通流が大きく妨げられ，目的地までの所要時間は平常時に比べ著しく増加すると考えるのが自然である．また，ピーク時の交通の多くは通勤・通学などの到着時刻に制約のあるトリップが多く，道路利用者は旅行時間のばらつきを考慮して，出発時刻を決めていると考えられる．

これまでの交通行動分析によって，交通行動を決定する重要な要因としては旅行時間のばらつきがあることが分かっている．よって，交通計画や交通政策を考える際には，単に旅行時間のみを考えるだけでなく，そのばらつきや信頼性を考慮することが重要と考えられる．

旅行時間のばらつきや信頼性を実際に道路の便益評価，交通計画や交通政策に取り入れる方法としてはいくつかの方法があるであろう．旅行時間データが豊富な場合はそれを用いることもできる．しかし，ETCデータの利用は高速道路に限られ，プローブ・カーのデータも常に利用可能とは限らない．本研究では，このようなデータが整っていない地域にも適用可能な交通ネットワーク均衡モデルを用いた方法を採用する．旅行時間の確率変動を考慮した交通ネットワーク均衡モデルを用いることによって，各リンクの旅行時間のばらつきや確率変動を把握する．

既に一般ネットワークに適用することを前提にした，旅行時間などが確率的に変動する交通ネットワーク均衡モデルはいくつか開発されている[1)–11)]．モデルの特徴などの説明については中山[12)]に譲る．本研究では，どのような指標によって旅行時間のばらつきを計測するのか，確率変動する旅行時間をどのように知覚して交通行動を行うと考えるのか，に焦点を当てる．

これまでの研究では，旅行時間のばらつきや確率変動を標準偏差もしくは分散として定量化し，経路選択などにもそれが用いられているものが多い．具体的には，旅行時間の平均値，標準偏差，標準偏差

に関するパラメータから構成され，$E[T_j^i]+\gamma\sqrt{Var[T_j^i]}$ として表される実効旅行時間と呼ばれるものが用いられている．ここで，T_j^i は OD ペア i の経路 j の経路の旅行時間の確率変数，$E[T_j^i]$は旅行時間の期待値，$Var[T_j^i]$は旅行時間の分散，γ はリスク態度パラメータである．

確率・統計理論の観点から，ばらつきの指標としての標準偏差は取り扱いが容易であるが，分散や標準偏差が必ずしも人が認知するばらつきの尺度と一致するとは限らない．例えば，Senna[13)]は，Benwell と Black（1984）の研究として，計 10 回計測された旅行時間の平均が同じである 3 つの経路の選択肢のうち，いずれを選ぶかの調査を行ったところ，分散が最も大きい選択肢の選択者が過半数で最も多かった事例について紹介している [13)].

米国交通省道路局（Federal Highway Administration, Department of Transportation）では，旅行時間信頼性の測定指標として，Buffer Time; $BT = t_{0.95} - \mu_t$，Buffer Time Index; $BTI= (t_{0.95} - \mu_t) / \mu_t$，Planning Time; $PT = t_{0.95}$, Planning Time Index; $PTI= t_{0.95} / t_f$を設定している．$t_{0.95}$ は旅行時間の 95 パーセンタイル値，t_f は自由走行時間，μ_t は旅行時間の平均値である．

ここで，旅行時間のパーセンタイル値（以下，%タイル値）とは，日々変動している旅行時間がある確率である値以下に収まるという意味を持つ．これは例えば，自宅から勤務先までの 95%タイル所要時間が 20 分であったとすれば，95%の確率で 20 分以内に勤務先まで到着できるという意味であり，旅行時間の分散や標準偏差などに比べ，その値の持つ意味は一般の人の感覚でも理解しやすい．本稿では，どのような指標が旅行時間のばらつきや確率変動を定量化するのに適しているのかの詳細な議論は避けるが（中山 [14)]が様々な指標のレビューを行っている），%タイル値は最も適している指標とは断定できないものの，重要な指標の一つであるとは言えよう．

本研究では，旅行時間のばらつきの低減を便益として算定するなど道路の信頼性評価のために，%タイル値を用いることを前提とする．繰り返しになるが，%タイル値は最も適切な指標の一つである．本研究では，実用的にも用いることができ，%タイル値に基づいた信頼性の評価法を構築することを目指し，交通量や旅行時間を確率変数として取り扱い，旅行時間のばらつきを考慮した道路利用者の交通行動を表現するモデルとして，旅行時間の%タイル値に基づく均衡配分モデルを構築する．このモデルにより，後に詳述する通り，従来のような旅行時間の期待値に基づく道路ネットワークの評価に加え，（旅行時間の分散や標準偏差も併せて）%タイル値の減少効果を計測できるようになる．そして，そのモデルを金沢市道路ネットワークに適用し，モデルを用いた信頼性評価法の現実ネットワークへの適用可能性について考察する．

2. モデル概要

前述の通り，本研究では，道路の信頼性評価のために，旅行時間の%タイル値に基づく均衡配分モデルを構築するが，著者らが既に開発したモデル [1)]を，旅行時間の%タイル値を扱うことができるように拡張する．著者らの既存モデル [1)]では，交通量が正規分布に従う確率分布に従うものとし，旅行時間のばらつきを分散として定量化し，それを考慮した配分モデルである．本章では，拡張したモデルについて詳述する．

(1) 交通量の分布

旅行時間が変動する要因としては様々なものが考えられるが，本研究では，交通需要が確率的に変動することによって旅行時間が変動するとする．つまり，旅行時間の確率変動要因を交通需要の確率変動とする．

本研究では，道路利用者は合理的であり，同じODペアの道路利用者は同質であると仮定する．合理性の仮定により，そうすることで何らかの改善がないならば，道路利用者は敢えて経路を確率的に変更し，交通量・旅行時間の不確実性を増すようなことはせず，各道路利用者は確率的に定常な均衡状態では自らの基準に従い選択する経路を一つに絞り込み，その経路を選択し続ける．言い換えると，均衡状態では，道路利用者は自分が選択する一つの経路を決めており，そのOD間を移動しなければならない場合はその経路を選択する．OD交通量の変動は道路利用者の数の変動であるが，そのOD交通量の変動はどの経路を選択するのかをあらかじめ決めた（潜在）道路利用者がトリップを行うのか，行わないのか，により生ずることを前提としている．

（潜在）道路利用者がトリップを行うのか，行わないのか，を確率的に選択することについて，確率 p で同質な（潜在）道路利用者がトリップを行い，その OD ペアについての（潜在）道路利用者数を q とすると，利用者は独立のトリップを行うのか，どうかを決定すると仮定することは自然であること，利用者はあらかじめ選択する経路を一つに絞り込んでいることを考え合わせると，経路交通量は二項分

布に従うことになる．また，そのような経路交通量の変動は経路間では独立となる．経路交通量（の平均）は小さくないことを前提とすると，中心極限定理の考え方に従い，経路交通量は独立な正規分布に従うことになる．したがって，本研究では，経路交通量は独立な正規分布に従うと仮定する．以上は，利用者は合理的であるなど妥当な仮定から導かれるものであるが，実際にも経路交通量は独立な正規分布に従うのかに関しては，経路交通量の実態調査等により詳しく検討する必要があることは言うまでもない．

このような配分を実際の道路ネットワークに適用するに際して一つの問題が生じる．現在のところ，確定的なOD交通量のデータについては各種調査から得られ，それをOD交通量の平均として捉えることができる．しかし，分散については何らかのデータから算出することは難しい場合が多いと考えられる．

交通量の分散に関してはデータを得ることが一般には困難であるが，田中ら[15]は，首都高速道路のOD交通量の平均値μと分散σ^2との関係について，非線形回帰分析により，$\sigma^2=16\mu$という関係を示した．そこで本研究では，中山ら[1]，田中ら[15]の提案した考え方に基づき，以下で示すように，OD交通量の分散は平均値の定数倍であると仮定する．

ODペアrs間の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$E[Q^{rs}]$，$Var[Q^{rs}]$とする．ここで，$Var[Q^{rs}]$は$\eta E[Q^{rs}]$とし，ηは正のパラメータである．

ODペアrsの経路交通量の平均をμ_k^{rs} $(=E[F_k^{rs}])$，分散 $(\sigma_k^{rs})^2$ を $\eta\mu_k^{rs}$ $(=Var[F_k^{rs}])$ と仮定する．なお，F_k^{rs}はODペア rs の経路 k の経路交通量の確率変数である．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．

$$F_k^{rs} \sim N\left[\mu_k^{rs}, \eta\mu_k^{rs}\right] \tag{1}$$

ここで，$N[\mu, \sigma^2]$は平均がμで分散がσ^2の正規分布である．

既に述べたように，経路交通量は互いに独立な正規分布に従う．独立な正規変数の和は正規変数になることから，共に正規分布に従うOD交通量と経路交通量の関係として，次式に示すようなフロー保存則が成立する．

$$Q^{rs} = \sum_{k\in K^{rs}} F_k^{rs} \qquad \forall r \in R, \forall s \in S \tag{2}$$

$$E\left[Q^{rs}\right] = \sum_{k\in K^{rs}} \mu_k^{rs}\ ,\ Var\left[Q^{rs}\right] = \sum_{k\in K^{rs}} \left(\sigma_k^{rs}\right)^2$$

$$\forall r \in R, \forall s \in S \tag{3}$$

また，経路交通量とリンク交通量の関係としても，独立な正規変数の和は正規変数になるため，以下の式 (4) 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}の和となり，リンク交通量も正規分布に従う．さらに，上述のηを用いて式 (5) のようになる．

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

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

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

上で述べたように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流れるため，リンク交通量は必ずしも独立ではない．

(2) 旅行時間の期待値と分散

道路リンクの走行時間がBPR関数に従うとすると，交通量が確定的な場合，リンク旅行時間t_aは$t_{a0}\{1+\alpha(x_a/C_a)^\beta\}$で表される．ただし，$t_a$はリンク$a$のリンク旅行時間，$t_{a0}$は自由旅行時間，$C_a$は交通容量，$x_a$は交通量，$\alpha$, βはBPR関数のパラメータである．本研究では，交通量は正規変数である．リンクaの期待旅行時間はX_aを交通量の確率変数として$E[t_{a0}\{1+\alpha(X_a/C_a)^\beta\}]$と表される．この計算には，$E[X^\beta]$を計算できればよく，積率母関数$M_a(s)$を用いることができる[2]．積率母関数の性質から$E[(X_a)^n]$は$d^nM_a(s)/d_s^n\,|_{s=0}$として計算される．ゆえに，期待リンク旅行時間は以下のとおりになる．

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

ただし，T_aはリンク旅行時間の確率変数である．

既に述べたとおり，交通量は正規分布に従うため，X_aは正規変数であり，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，$\mu_a$はリンク$a$の交通量の平均，$\sigma_a^2$はその交通量の分散である．よって，リンク旅行時間の分散は以下の式で算出される．

$$Var\left[T_a\right] = E\left[\left(T_a\right)^2\right] - E\left[T_a\right]^2 \tag{7}$$

経路旅行時間の期待値$E[T_k^{rs}]$は次式で表される．

$$E\left[T_k^{rs}\right] = \sum_{a\in A} \delta_{a,k}^{rs} E\left[T_a\right] \tag{8}$$

ここでAはリンクの集合である．

リンク交通量の独立性を仮定する場合，経路旅行時間の分散は以下の式で算出することができる．

$$Var\left[T_k^{rs}\right] = \sum_{a \in A} \delta_{a,k}^{rs} Var\left[T_a\right] \tag{9}$$

(3) 旅行時間の%タイル値

先述したとおり，本モデルでは%タイル値を用いた均衡配分モデルを構築する．

実際の道路ネットワークのような複雑なネットワークでは，経路の旅行時間の%タイル値を厳密に計算することは困難である．その理由は，%タイル値の計算は分布形に依存する部分があり，経路交通量は正規分布となっているが，経路旅行時間はどのような分布になるのかが明確になっていないことにある．リンク旅行時間については，正規分布のリンク交通量を上述のBPR関数に入れた分布に従う．この分布がどのような性質をもつのか，どのような分布かはBPR関数のパラメータに依存する．さらに，経路旅行時間については，このようなリンク旅行時間の和であり，一般には，（正規分布とは異なり）リンク旅行時間の和が各リンク旅行時間が従う分布に従うとは限らない．つまり，リンク旅行時間が従う分布が分かったとしても，経路旅行時間についてはどのような分布に従うのかわからない．そして，経路ごとに経路旅行時間が従う分布特性が大きく異なる可能性もある．

本研究では，実用上，近似であったとしても%タイル値を簡便に算出することを目指す．その算出法としては，旅行時間が従う分布形を仮定し計算する方法があり，本モデルでは，下記の通り，あらかじめ旅行時間が従う分布形を2種類仮定した上で，それぞれの分布形における旅行時間の%タイル値を算出する式を導出し，モデルを構築する．つまり，旅行時間が従う確率分布は分からないものの，ある分布に従うと仮定し，その仮定の下で%タイル値を算出する．仮定する分布の一つとしては，取り扱いやすさから正規分布とする．

旅行時間が従う確率分布に関しては，HermanとLam[16]はデトロイトのGM研究所への通勤のための旅行時間（26経路の経路旅行時間）の変動分析を行い，旅行時間の分布に関しては，60%タイル値以下では，正規分布と似ているとしているものの，それ以上では正規分布よりも裾が長い（long-tailed）傾向があると報告している．また，RichardsonとTaylor[17]はオーストラリアのメルボルンでのある一つの経路の旅行時間変動について，正規分布と対数正規分布への適合に対する検定を行い，正規分布ではないとともに，対数正規分布への適合が比較的良好であったとしている．これらの研究を踏まえ，もう一つの確率分布としては，対数正規分布とする．

これらの%タイル値の算出式を以下に示す．

a) 正規分布

旅行時間は通常の正規分布に従うと仮定する．%タイル値の算出式は，以下の式 (10) である．

$$T_{k,p}^{rs} = E\left[T_k^{rs}\right] + I_p \sqrt{Var\left[T_k^{rs}\right]} \tag{10}$$

ただし，$T_{k,p}^{rs}$はODペアrs間のk番目経路の旅行時間のp%タイル値，I_pは標準正規分布表などから得られるp%タイル値に相当する値である．

b) 対数正規分布

正規分布は$-\infty$まで定義されているが，実際には所要時間が負の値をとることはなく，0以上で定義された対数正規分布を仮定することで，理論上の利点もある．

$$T_{k,p}^{rs} = \exp\left(I_p \zeta + \lambda\right) \tag{11a}$$

ここで，

$$\zeta^2 = \ln\left(1 + \frac{Var\left[T_k^{rs}\right]}{E\left[T_k^{rs}\right]^2}\right) \tag{11b}$$

$$\lambda = \ln\left(E\left[T_k^{rs}\right]\right) - \frac{1}{2}\zeta^2 \tag{11c}$$

である．

(4) リンク間の独立を仮定した場合

a) 定式化

既に述べたように，本研究では，旅行時間の%タイル値を旅行時間の信頼性指標として考えている．道路利用者が合理的で，旅行時間の信頼性も考慮して経路を選択していると仮定すると，道路利用者は旅行時間の%タイル値が最小の経路を選択することになる．その際，（確定的）旅行時間を旅行時間の95%タイル値に置き換えたワードロップ均衡を定義することができる．それは，リンク旅行時間が独立の場合，以下の式 (12a) から式 (12e) で定式化できる．

$$\min . Z(x) = \sum_a \int_0^{x_a} t_p^a(w) \cdot dw \tag{12a}$$

subject to

$$x_a = \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K_{rs}} \delta_{rs,k}^a \cdot f_{rs,k} \quad \forall a \in A \tag{12b}$$

$$\sum_{k \in K_{rs,k}} f_{rs,k} - q_{rs} = 0 \quad \forall rs \in \Omega \tag{12c}$$

$$f_{rs,k} \geq 0 \quad \forall rs \in \Omega, \forall k \in K_{rs} \tag{12d}$$

$$x_a \geq 0 \quad \forall a \in A \tag{12e}$$

ただし，x_aはリンクaの交通量，$t_p{}^a$はリンクaの旅行時間のp%タイル値である．

b）解法

前節で示した通り，リンク間の独立を仮定した本研究モデルはワードロップ均衡と同様の形で定式化できるため，Frank-Wolfe法などの最もシンプルな解法により解くことができる．以下に，Frank-Wolfe法による解法を示す．

Step0：初期実行可能解の設定

初期実行可能解（リンク交通量の初期値）$x_a{}^{(1)}$を設定する．初期値はフロー保存則さえ満たしていれば良く，OD表をどのように配分して算出しても良いが，all-or-nothing配分を用いて計算する．各リンクのリンクコストを自由走行時間に設定し，全OD交通量を最短経路に配分し，得られたリンク交通量を$\{x_a{}^{(1)}\}$とする．

繰り返し計算回数のカウントをn=1とする．

Step1：リンクコストの更新

リンク交通量$\{x_a{}^{(n)}\}$に対するリンクコストを計算し，$\{t_a{}^{(n)}\}$とする．

Step2：降下方向ベクトル$\{d_a{}^{(n)}\}$の探索

リンクコスト$\{t_a{}^{(n)}\}$の状態で全OD交通量を最短経路に配分し，得られたリンク交通量を$\{y_a{}^{(n)}\}$とする．$d_a{}^{(n)} = y_a{}^{(n)} - x_a{}^{(n)}$ を計算する．

Step3：降下ステップサイズの探索

$$x_a{}^{(n+1)} = x_a{}^{(n)} + \zeta^{(n)} d_a{}^{(n)} \tag{13}$$

とおく．$\{x_a{}^{(n+1)}\}$に対応する目的関数

$$Z^{(n+1)} = \sum_{a \in A} \int_0^{x_z^{(n+1)}} t_a^{I_p}(w) \cdot dw \tag{14}$$

の値が小さくなる$\zeta^{(n)}$を探す．このとき$\{x_a{}^{(n)}\}$と$\{d_a{}^{(n)}\}$は定数で，$\zeta^{(n)}$のみ変数である．

こうして決定した降下ステップサイズ$\zeta^{(n)}$を式 (13) に代入して，リンク交通量$\{x_a{}^{(n+1)}\}$を計算する．

Step4：収束判定

以下に示す収束条件が満たされていなければ，n:=n+1としてStep1に戻る．収束条件式がみなされていれば，計算を終了しリンク交通量$\{x_a{}^{(n+1)}\}$を解として出力する．

$$\max_{a \in A} \left| \frac{\left(x_a^{(n+1)} - x_a^{(n)} \right)}{x_a^{(n)}} \right| \leq \varepsilon \tag{15}$$

ここで，εは収束条件である．

(5)　リンク間の相関を考慮した場合

a）定式化

本研究モデルは，実務への適用のため，計算量の削減やモデルの簡便化を図り，リンク間の独立を仮定し，前節，前々節において，その定式化と解法のアルゴリズムを示した．

しかし，本モデルは，リンク間の相関（共分散）を考慮したより厳密なモデルとして，定式化することもできる．その場合，経路旅行時間の%タイル値はリンク毎に分解できず，経路交通量を変数としなければならない．よって，最適化問題として定式化することはできず，以下のような変分不等式問題として定式化される．

$$\text{Find } \mathbf{f}^* \in \Omega_\mathrm{p}$$

$$\text{such that} \sum_{rs} \sum_{k} t_{k,p}^{rs}(\mathbf{f}^*) \cdot \left(f_k^{rs} - f_k^{rs*} \right) \geq 0 \quad \forall \mathbf{f} \in \Omega_\mathrm{p} \tag{16}$$

ここで，$\mathbf{f}^*$は経路交通量パターン，$t_{k,p}^{rs}$はODペアrs間の経路kの旅行時間のp%タイル値，f_k^{rs}はODペアrs間の経路kの経路交通量である．

b）解法

リンク間の相関を考慮したモデルの場合，以下で示す射影法により解くことができる．

Step0：初期許容解を求める

繰返し回数m：= 1，定数:ρ, Qを設定，初期許容解（経路交通量パターン）$\mathbf{f}^{(1)}$を設定．

Step1：射影問題を解く

以下の射影問題を解き，その解を$\mathbf{f}^{(m+1)}$とする．

$$\min. Z(\mathbf{f}) = t_{k,p}^{rs}\left(\mathbf{f}^{(m)}\right) \cdot \left(\mathbf{f} - \mathbf{f}^{(m)}\right) + \frac{1}{2\rho}\left(\mathbf{f} - \mathbf{f}^{(m)}\right) \cdot \mathrm{Q}\left(\mathbf{f} - \mathbf{f}^{(m)}\right)$$

$$\text{subject to} \quad \forall \mathbf{f} \in \Omega_\mathrm{p} \tag{17}$$

ここで，$\mathbf{f}^*$は経路交通量パターン，$t_{k,p}{}^{rs}$はODペアrs間の経路kの旅行時間のp%タイル値，f_k^{rs}はODペアrs間の経路kの経路交通量である．

この問題は，Frank-Wolfe法などにより容易に解くことができる．

Step2：収束判定

以下に示す収束条件が満たされていなければ，m=m+1としてStep1へ戻る．収束条件式がみなされていれば，計算を終了する．

$$\left\| \mathbf{x}^{(m+1)} - \mathbf{x}^{(m)} \right\| \leq \varepsilon \tag{18}$$

ここで，εは収束条件である．

(6)　旅行時間信頼性評価

既に述べたように，本研究では，旅行時間のばら

つきや信頼性の評価指標として，パーセンタイル値に注目している．パーセンタイル値は多くの人々にとってどれほどの信頼性があるのかを直感的に理解しやすい．一方，分散や標準偏差は確率的に扱いやすいが，例えば分散が100という表現はどれほどの信頼性か直感的に理解しにくい人々が多いと思われる．

旅行時間の95%タイル値である米国のプラニング・タイム（planning time）の場合，プラニング・タイムから旅行時間平均を減じたもの，つまり，バッファー・タイム（buffer time）が信頼性にかかわる部分である．本研究では，便宜的に95%タイル値（プラニング・タイム）として，金沢市の道路ネットワークにモデルを適用しているが，何パーセンタイル値にするのかは別途交通行動分析等により精緻に検討されなければならない．95%タイル値を採用する場合，上述の交通均衡配分では，95%タイル値を基準に経路選択を行うという仮定での配分となっている．つまり，モデル内の利用者は旅行時間の95%タイル値を基準に経路を決定している．これに合わせて，道路ネットワークの信頼性評価でも95%タイル値を用いて評価することが最も自然である．このとき全交通需要に対する95%タイル値（旅行時間の95%タイル値の全員分の合計）によって評価を行うことができる．これを総95%タイル値と呼ぶことにする．総95%タイル値の減少分が道路整備等の効果となる．

総95%タイル値は以下のように表される．

$$\sum_{r\in R, s\in S} q^{rs}\, t_{0.95}^{rs} \tag{19}$$

これは，

$$\sum_{r\in R, s\in S} q^{rs}\left(t_{0.95}^{rs}-\mu^{rs}\right)+\sum_{r\in R, s\in S} q^{rs}\,\mu^{rs} \tag{20}$$

と分解することができ，そのうち，第1項が信頼性部分，第2項が平均的な旅行時間部分となっている．信頼性の増減のみの評価を考える場合は，上式の第1項の道路整備等の前後の差をとることで評価可能である．

3. 1OD1Linkのネットワークへの適用

(1) 設定

図-1に示すような1OD1Linkのネットワークにおいて，旅行時間の%タイル値を算出する．BPR関数のパラメータは，$\alpha=0.15$，$\beta=2$とした．

また，交通量の分散パラメータηは42.0とした．リンクの自由走行時間は10分，交通容量は1000台である．なお，今回の計算では95%タイル値を用いて計算を行った．

(2) 旅行時間の%タイル値とその真値との誤差

図-2に交通量と各分布形を仮定した場合の旅行時間の%タイル値の真値との誤差を示す．ここで，リンクが一つのみの場合，旅行時間の%タイル値の真値は，BPR関数に交通量の%タイル値を代入することにより求めることができる．経路が一つのリンクのみの場合はこのように%タイル値の真値を求めることができる．一方，複数リンクで経路が構成される場合は，このような方法では真値を求めることはできない．

図-2から，交通量が大きくなるにつれて，旅行時間が正規分布に従うと仮定した場合，交通量の増加とともに真値との誤差が大きくなっていき，2600台から誤差は減少していくことがわかる．旅行時間が対数正規分布に従うと仮定した場合には，交通量の増加とともに真値との誤差は増加していき，交通容量を超える交通量が流れた場合，誤差は減少に転ずる．

今回の設定では，旅行時間の分布形としては正規分布よりも対数正規分布のほうがよく当てはまるという結果であった．

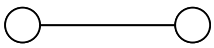

図-1 1OD1Linkのネットワーク

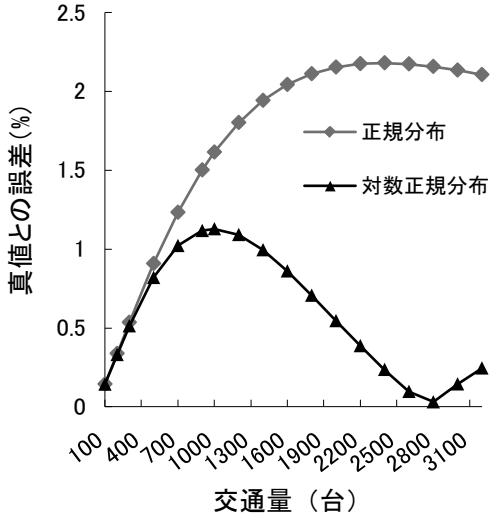

図-2 交通量と%タイル値の真値との誤差の関係

4. リンク間共分散の有無による影響

(1) 設定

図-3に示すようなネットワークにおいて，旅行時間の分散および%タイル値を算出する．交通量の設定は，Link1及びLink2の両方を通る交通量を800台，Link1のみ，Link2のみを通る交通量を200台とした．BPR関数のパラメータは，$\alpha = 0.15$，$\beta = 2$，リンクの自由走行時間は1分である．なお，今回の計算では95%タイル値を用いて計算を行った．

(2) リンク間共分散が経路旅行時間に及ぼす影響

表-1にリンク間共分散が経路旅行時間に及ぼす影響を示す．**表-1**は，交通容量を変化させて，リンク間共分散の影響を算出した．

表-1より，交通容量に対して大きな交通量が流れる場合（表中では交通容量が小さい場合），旅行時間の分散は大きくなり，交通容量に対して，同程度もしくはそれ以下の交通量が流れた場合，旅行時間の分散は小さくなる．また，リンク間共分散の有無により，経路旅行時間の分散には44.3%程度の差があり，決して小さな値とは言えない．しかしながら，交通容量に対して，同程度もしくはそれ以下の交通量が流れる場合，旅行時間の分散の値自体は0.03程度以下となり，実務上，旅行時間の分散や%タイル値を算出するにあたり，甚大な影響を及ぼす値ではないと考えられる．ただし，交通容量に対して，非常に大きな交通量が流れる場合，旅行時間の分散の値自体が大きくなるため，リンク間共分散の影響は無視しがたい．このとき，リンク間共分散が旅行時間の%タイル値に与える影響は1~3%程度である．

今回の設定では，交通容量に対して非常に大きな交通量が流れる場合を除き，リンク間共分散の有無が，旅行時間の%タイル値に与える影響は1～3%程度と比較的小さいという結果であった．

以上は，**図-3**という非常に規模が小さなネットワーク対する共分散の影響の検討であった．ネットワークが大きくなり，距離が離れたリンク間の旅行時間の共分散は相対的に小さくなると考えられる．長尾ら[18]は，金沢都市圏の道路ネットワークを対象にした場合，共分散の項を考慮した場合と共分散を考慮しない場合（リンク交通量の独立とした場合）での計算経路旅行時間の分散の相関係数は0.85と比較的高いと報告している．リンク間の共分散は考慮した方がよいのは当然であるが，計算量の問題で扱えない場合は上述のような誤差が出ることを踏まえて適用すべきであろう．

5. 金沢都市圏道路ネットワークへの適用

(1) ネットワーク概要

本研究の均衡配分モデルを金沢都市圏の道路ネットワークに適用するとともに，その適用可能性について検証する．

図-4に適用ネットワークを示す．ノード数は196，リンク数は686である．全てのノードがセントロイドを兼ねている．OD交通量の平均は，平成7年第3回金沢都市圏PT調査における平日の朝7時台のデー

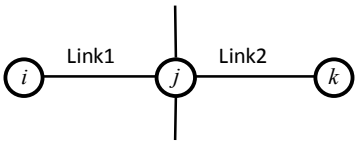

図-3 適用ネットワーク

表-1 リンク間共分散の有無が旅行時間の分散に与える影響（交通量・η=42：一定）

	リンク間共分散無し				リンク間共分散あり				差(%)			
	正規分布1		対数正規分布		正規分布1		対数正規分布		正規分布1		対数正規分布	
交通容量(台)	$Var[T^{ik}]$	$T^{ik}_{0.95}$	$Var[T^{ik}]$	$T^{ik}_{0.95}$	$Var[T^{ik}]$	$T^{ik}_{0.95}$	$Var[T^{ik}]$	$T^{ik}_{0.95}$	$Var[T^{ik}]$	$T^{ik}_{0.95}$	$Var[T^{ik}]$	$T^{ik}_{0.95}$
100	77.188	47.71	77.188	49.30	138.684	52.63	138.684	55.18	0.0	9.3	0.0	10.7
200	4.824	13.43	4.824	13.78	8.668	14.66	8.668	15.24	44.3	8.4	44.3	9.6
300	0.953	7.08	0.953	7.21	1.712	7.63	1.712	7.85	44.3	7.2	44.3	8.1
400	0.302	4.86	0.302	4.92	0.542	5.16	0.542	5.27	44.3	6.0	44.3	6.6
500	0.124	3.83	0.124	3.86	0.222	4.03	0.222	4.08	44.3	4.9	44.3	5.4
600	0.060	3.27	0.060	3.29	0.107	3.41	0.107	3.44	44.3	4.0	44.3	4.3
700	0.032	2.93	0.032	2.94	0.058	3.03	0.058	3.05	44.3	3.3	44.3	3.5
800	0.019	2.71	0.019	2.72	0.034	2.79	0.034	2.80	44.3	2.8	44.3	2.9
900	0.012	2.56	0.012	2.57	0.021	2.63	0.021	2.63	44.3	2.3	44.3	2.4
1000	0.008	2.46	0.008	2.46	0.014	2.51	0.014	2.51	44.3	2.0	44.3	2.0
1100	0.005	2.38	0.005	2.38	0.009	2.42	0.009	2.42	44.3	1.7	44.3	1.7
1200	0.004	2.32	0.004	2.32	0.007	2.35	0.007	2.35	44.3	1.5	44.3	1.5
1300	0.003	2.27	0.003	2.27	0.005	2.30	0.005	2.30	44.3	1.3	44.3	1.3
1400	0.002	2.23	0.002	2.23	0.004	2.26	0.004	2.26	44.3	1.1	44.3	1.1
1500	0.002	2.20	0.002	2.20	0.003	2.23	0.003	2.23	44.3	1.0	44.3	1.0

図-4　金沢都市圏道路ネットワーク

表-2　観測リンク交通量と配分結果の相関係数

	Wardrop均衡	正規分布	対数正規分布
相関係数	0.914	0.926	0.926

表-3　リンク旅行時間の%タイル値と真値との誤差の平均

	正規分布	対数正規分布
誤差(%)	3.7	3.9

タを基に設定した．OD交通量の分散はリンク交通量の実測値からパラメータηを推定することによって設定するが，金沢市内の交通量の実測値からη = 42.0とした．

また，旅行時間関数は通常のBPR関数に従うものとし，自由走行時間 t_{a0} 及び交通容量C_aは，制限速度，車線数や車線幅をもとに設定した．なお，今回の計算においては，旅行時間の95%タイル値を用いた配分を行っている．

(2)　適用結果

表-2は，実際のリンク交通量と配分結果の相関係数を示したものである．本研究モデルとの比較のため，交通量や旅行時間を確定値として扱ったワードロップ均衡による配分結果も合わせて示している．

旅行時間の分布形として正規分布を仮定した場合と対数正規分布を仮定した場合では，両者の観測リンク交通量と計算リンク交通量との相関係数は0.926と同じ結果となった．

また，正規分布と対数正規分布では，確定的ワードロップ均衡による配分結果よりも適合度は良いという結果となり，本研究モデルはより現実に即したモデルとなっていることを示している．

表-3は，各分布形を仮定した場合のリンク旅行時間の%タイル値とその真値との誤差の平均を示している．旅行時間の%タイル値の真値との計算誤差はどちらも4%弱と比較的小さく，実用上，甚大な影響を及ぼすほどのものではないと考えられる．

また，正規分布の誤差(3.7%)が対数正規分布の誤差(3.9%)よりも小さくなっている．これは，配分リンク交通量や交通容量との関係によっては誤差が比較的大きく計算されることがあり，今回適用したネットワークではそうしたリンクが対数正規分布を仮定した場合に多く見られたため，真値との誤差の平均値は，対数正規分布を仮定した場合に比べ，若干大きくなったと考えられる．

6.　金沢山側環状道路の整備効果

(1)　ネットワーク概要

2006年に金沢市内に環状道路（山側環状道路）が完成した．本節では，時間信頼性を考慮してこの山側環状道路の整備効果を試算する．4章で示したネットワークは山側環状道路が全線開通する前のネットワークであったため，それに山側環状道路のノード及びリンクを追加する．**図-5**が山側環状道路を追加したネットワーク図である．ノード数は202，リンク数は708である．全てのノードがセントロイドを兼ねている．山側環状道路追加の前後の配分結果を比較し，山側環状道路整備効果を試算し，そして，本モデルの信頼性評価法の適用可能性などについて考察する．

(2)　信頼性評価

表-4は，山側環状道路の整備前後のネットワーク上の総走行時間の変化を示している．

これにより，旅行時間の期待値についてみると，旅行時間の分布形として正規分布を仮定した場合には，総走行時間は約10,600分減少し，対数正規分布を仮定した場合は約11,000分減少している．このように本研究モデルでは，従来行われてきた期待値的な道路ネットワークの評価も行うことができる．

本研究モデルでは，従来の期待値的な旅行時間の評価に加え，旅行時間の分散や標準偏差，旅行時間の%タイル値を算出できるため，ネットワーク上の時間信頼性の向上も考慮に入れることができる．**表-3**の旅行時間の95%タイル値についてみると，旅行時間の分布形として通常の正規分布を仮定した場合

図-5　山側環状道路を含むネットワーク

表-4　山側環状道路整備前後の総走行時間の変化

		総走行費用		
正規分布		期待値（台・分）	分散（台・分^2）	95%タイル値（台・分）
	山環整備前	393,143	7,403	429,050
	山環整備後	382,544	6,348	415,078
	差	10,599	1,056	13,972
対数正規分布		期待値（台・分）	分散（台・分2）	95%タイル値（台・分）
	山環整備前	395,993	7,382	431,850
	山環整備後	384,663	6,517	417,101
	差	11,330	865	14,749

には，総走行費用は約14,000分減少し，対数正規分布を仮定した場合は約15,000分減少している．同様に旅行時間の分散の減少も見て取れる．このように信頼性を考慮することにより，3,400～3,800分，つまり，約30%強の便益効果を新たに計測することができている．これは便益の過剰推計ではなく，本来信頼性を考慮して交通行動は行われていると思われるため，計測できていなかった信頼性に対する便益効果を計測できるようになったことを意味している．なお，本研究では，交通量の分散は平均の42倍と設定しているため，平均旅行時間が低下した場合には旅行時間の分散もそれに付随して低下するのは必然的とも言える．どれほど低下するのかは，交通量の分散が平均の何倍に設定されたのかだけでなく，ネットワークのリンクの交通容量等にも依存する．

以上のように，本研究モデルでは，金沢市の山側環状道路整備という実際のネットワークの実際の道路整備について，旅行時間信頼性の向上効果（不確実性の減少効果）を定量的に計測できた．なお，山側環状道路整備について，確定的な配分との比較，さらに確定的な配分に対する本研究の手法の優位性については今後の課題としたい．

7.　おわりに

本研究では，旅行時間のばらつきの低減を便益として算定するなど道路の信頼性評価のために，一つの重要な指標である旅行時間の%タイル値を用いることを前提とし，それを用いた信頼性の評価法を構築することを目指している．

そのために，従来のワードロップ均衡が交通量や旅行時間を確定的な量として取り扱っていたのに対し，本研究では，交通量や旅行時間を確率変数として取り扱い，旅行時間のばらつきを考慮した道路利用者の交通行動を表現するモデルとして，旅行時間の%タイル値に基づく均衡配分モデルを構築した．その際，リンク旅行時間が従う分布が既知であるとしても，経路旅行時間についてはどのような分布に従うのかわからず，経路ごとに経路旅行時間が従う分布特性が大きく異なる可能性もある．

そこで本研究では，実用上，%タイル値を簡便に算出するために，旅行時間が従う分布形を正規分布と対数正規分布の2種類を仮定したモデルを構築している．

まず，このモデルを現実の道路ネットワークに対して適用し，配分結果を検証した．実際のリンク交通量との相関はワードロップ均衡による配分結果と比較しても高い結果になり，本研究モデルが，より現実の交通行動に近い状態を再現できていることを示した．

また，近似的に算出した旅行時間の%タイル値を，その真値と比較した結果，誤差の平均は4%弱と小さくなり，近似的な%タイル値の計算の精度を示し，実用上，甚大な影響は無いと考えられる．

次に，本研究モデルを用いて，金沢山側環状道路の便益評価を行った．従来のような旅行時間の期待値に加え，%タイル値及び分散を算出し，道路整備の前後で，これらの指標がどの程度減少するかを計測し，道路ネットワークの評価に際して本研究モデルが利用できることを示した．

参考文献

1) 中山晶一朗，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.64，pp.526-536，2006.
2) 中山晶一朗，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. 772/IV-65，pp. 67-77，2004.10.
3) Yin, Y., Lam, W. H. K. and Ieda, H.: New technology and the modeling of risk-taking behavior in congested road networks, *Transportation Research*, Vol. 12C, pp. 171-192,

2004.
4) Lo, H. K. and Tung, Y. K.: Network with degradable links: capacity analysis and design, *Transportation Research*, Vol. 37B, pp. 345-363, 2003.
5) Lo, H. K., Luo, X. W. and Siu, B. W. Y.: Degradable transport network: Travel time budget of travelers with heterogeneous risk aversion, *Transportation Research*, Vol. 40B, pp. 792-806, 2006.
6) Watling, D.: User equilibrium traffic network assignment with stochastic travel times and late arrival penalty, *European Journal of Operational Research*, Vol. 175, pp. 1539-1556, 2006.
7) Shao, H., Lam, W. H. K. and Tam, M. L.: A reliability-based stochastic traffic assignment model for network with multiple user classes under uncertainty in demand, *Network and Spatial Economics*, Vol. 6, pp. 173-204, 2006.
8) Watling, D.: Stochastic network equilibrium under stochastic demand, Patriksson, M. and Labbe, M. eds., *Transportation Planning: State of Art*, Kluwer Academic, Dordorecht, Netherlands, pp. 33-51, 2002.
9) 中山晶一朗，高山純一：交通需要と経路選択の確率変動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 D，Vol. 62，No. 4，pp. 537-547，2006.
10) Lam, W. H. K., Shao, H. and Sumalee, A.: Modeling impacts of adverse weather conditions on a road network with uncertainties in demand and supply, *Transportation Research*, Vol. 42B, pp. 792-806, 2008.
11) 内田賢悦：需要・供給・認知の確率変動を反映した利用者均衡配分，土木学会論文集 D，Vol. 65，pp. 386-398，2009.
12) 中山晶一朗：ネットワークレベルでの道路交通の信頼性研究の諸相・展望とその便益評価の一考察，土木学会論文集，Vol. 67，No.2，pp. 147-166，2011.
13) Senna, L. A. D. S.: The influence of travel time variability on the value of time, *Transportation*, Vol. 21, pp. 203-228, 1994.
14) 中山晶一朗：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.
15) 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.
16) 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.
17) 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.
18) 長尾一輝，中山晶一朗，高山純一，円山琢也：旅行時間の不確実性を考慮した分担・配分統合交通ネットワーク均衡モデルに関する研究：金沢都市圏への軌道系公共交通導入時の道路交通への影響分析を例に，土木学会論文集 D，Vol.65，No.1，pp. 12-25，2009.

（2011. 2. 25 受付）

A RELIABILITY EVALUATION METHOD WITH A TRAFFIC ASSIGNMENT MODEL BASED ON TRAVEL TIME PERCENTILE VALUE AND ITS APPLICATION TO THE ROAD NETWORK OF KANAZAWA CITY

Yuta IMAMURA, Sho-ichiro NAKAYAMA and Jun-ichi TAKAYAMA

The traffic demand and travel time change according to various factors in an actual road network. The variability of travel times is one of the main decision-making factors of travel behavior. Therefore, it is important to incorporate it in the benefit evaluation of road maintenance and improvement project and the transportation planning/policy. In this study, the travel time percentile value, which is easy to understand, is focused on as a measure of the difference of the travel time. The aim of this study is to develop a practically applicable user equilibrium assignment model, which can output the travel time percentile values, as a practically applicable reliability evaluation method. In addition, the model is applied to the road network of Kanazawa City, and its applicability and usefulness to real road networks is examined.