

連結信頼性を考慮した道路ネットワーク評価法の開発 および金沢市道路ネットワークへの適用

土倉 悟¹・中山 晶一郎²・高山 純一³

¹学生員 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: kabuku@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。その要素の1つとして道路ネットワークのサービス提供の安定性が挙げられる。それは救急車・消防車にとっても同様にいえることで、とくに救急車・消防車は現場に到着するために細街路を通過する必要がある場合もある。そこで本研究では、道路の連結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連結信頼性の指標としてリンク毎に連結確率というものを定義する。こうすることにより道路の連結を考えた均衡配分を行う。そして連結信頼性を考慮した確率的利用者均衡配分を用いて金沢市道路ネットワークを評価する。

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

1. はじめに

近年、経済・社会活動の高度化とともに道路ネットワークのサービスの向上だけではなく、サービスの安定提供も求められるようになった。道路ネットワークのサービスには様々なものがあると思われるが、時間通りに目的地に到着できるかやOD間で移動可能な道路リンクがどれだけあるかなどは特に重要であると考えられる。

道路の信頼性については様々な考え方があるが、中山¹⁾は、それを連結信頼性、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、連結信頼性と時間信頼性の2つに着目する。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の評価指標が必要になる。

時間信頼性について、その指標としては旅行時間の分散・標準偏差・変動係数を用いることができる。しかし、旅行時間の分散や標準偏差は直感的にはどれほどのばらつきかが把握しにくく、利用者に提供する際に理解され

にくいという問題がある。そこで、時間信頼性の統計指標として%タイル値(パーセントイル値)がよく用いられている。%タイル値を用いて計算されるバッファタイム(Buffer Time: BT)やそれに類するものが代表的なものと言える。

連結信頼性の指標についての研究としては、構造関数²⁾を定義し、ノード間の連結確率として指標化しているものが非常に多い。連結確率の算出方法としては、若林・飯田³⁾は最少パス法と最少カット法を用いた。最少パス法とは、ノード間を結ぶ全てのパス(経路)が同時に通過できなくなることはない確率を求める方法である。最少カット法とは、ノード間においてリンク途絶が発生すると通過できなくなる時、リンク途絶が最小数となるリンクのカット集合を求めて発生する確率を求める方法である。また、何通りの経路で移動できるのかということの評価のために瀬戸ら⁴⁾は全ODにペアに非重複経路が最低N本存在するというN-edge-connected network

を用いている。同様の概念に冗長性というものがあり、各リンクの途絶に着目して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提案されている⁵⁾。

中山¹⁾に整理してあるように、これまでの研究で時間信頼性や連結信頼性に着目したものは非常に多くある。しかしながら、道路ネットワークの評価のためには、連結信頼性と時間信頼性という道路の信頼性だけでなく、通常のコスト便益評価の3便益を含めて、それらを統合しての評価する必要がある。連結信頼性や時間信頼性について、それぞれ単独の研究は極めて多いが、連結・時間信頼性を統合的に扱う研究は非常に少ない。そこで、本研究では、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方法を開発し、金沢市道路ネットワークに適用させ、金沢市の山側環状道路の整備便益を連結・時間信頼性を含めて算出し、開発した統合評価法の利用可能性などを評価する。

2. 道路ネットワークの信頼性

本章では、時間信頼性と連結信頼性のそれぞれについての評価方法を述べる。

(1) 時間信頼性

時間信頼性の指標は様々であるが、前章で述べたように本研究では多くの人々にとって分かりやすい%タイル値を用いることにする。%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る。その中でも95%タイル値が最もよく用いられている。何パーセントタイル値にすべきかは状況・場所など様々な要因によって異なると思われる、詳細な調査が必要であろう。本研究では、何パーセントタイル値を用いるべきかという問題は対象とせず、時間信頼性指標として何パーセントタイル値がよいのかが判明している状況下での連結・時間信頼性の統合評価方法を提案する。便宜的に、最もよく用いられる95%タイル値によって時間信頼性を評価できると仮定する。なお、別のパーセントタイル値を用いることになったとしても、以降の議論には全く影響しない。

95%タイル値(= t_{95})とは、ある確率変数 X があるとき95%の確率で $X \leq t_{95}$ になる値のことを指す。利用者は旅行時間の期待値ではなく95%タイル値を考慮して行動するとする。逆に言えば、このような利用者は残り5%の確率で想定していた時間(t_{95})より遅れることを覚悟の上で行動していることになる。つまり95%の確率で間に合い、5%の確率で遅刻するような行動を想定する。

リンク旅行時間の%タイル値については、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算出できる。一方で、評価に必要な経路旅行時間の%タイル値

については、経路旅行時間はリンク旅行時間の和であり、各リンクの旅行時間や交通量には相関があるため、その経路を構成するすべてのリンクの旅行時間の同時確率密度関数などが分からないと計算ができない。隣り合ったリンク同士で通常相関があるので、今ほど述べた1つのリンクの場合のように、各リンクの交通量の%タイル値がわかるだけでは計算できない。

そこで、本研究では、近似的に経路旅行時間の%タイル値を計算する方法を用いる。計算方法自体は今村ら⁷⁾と同じであるため、ここでは概略を説明するのみとする。各リンクの交通量の分布は後述する配分モデルから導出でき、それを用いる。配分モデルから計算する各リンクの平均と分散・共分散から、経路旅行時間の平均と分散は計算可能である。本研究では、中山ら⁸⁾・今村ら⁷⁾に従い、交通量は正規分布とするが、例えば交通量が正規分布であったとしても一般に旅行時間は正規分布に従うとは限らず、どのような分布に従うかは旅行時間関数に依存して決まる。そして、リンク旅行時間の分布形とその和である経路旅行時間の分布形とも同じとは限らない。本研究では、このような経路の旅行時間分布を正規分布もしくは対数正規分布と近似してその%タイル値を計算する。

a) 正規分布 1

旅行時間の期待値と分散の算出式はそれぞれ(1)式、(2)式の通りである。

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

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

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。旅行時間はBPR関数を用いて計算する。パラメータについては $\alpha = 1.0$ 、 $\beta = 2.0$ とする。

3章で詳述するが、交通量は正規分布と仮定する。その場合の近似的な経路旅行時間分布として、ここで正規分布を取り上げる。後述する配分モデルに(その分布形はわからないものの)経路旅行時間の平均と分散は計算可能であるため、ここでは経路旅行時間分布は配分モデルによって計算された平均と分散を持つ正規分布と近似する。経路旅行時間を正規分布と仮定すると、その95%タイル値は標準正規分布表から(3)式で算出できる。

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

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

ここで、前節で述べたものと別の経路旅行時間分布の近似を考えよう。

経路旅行時間分布の近似を考えるために、 $c_k^{rs}(\cdot)$ はODペア rs の経路 k の旅行時間を算出する関数、 \mathbf{X} はリンク交通量の確率変数ベクトル（全てのリンク交通量の確率変数を要素に持つ）とすると、 $c_k^{rs}(\mathbf{X})$ はその経路の旅行時間の確率変数となる。経路旅行時間関数を以下の式のように交通量の平均値 ($E[\mathbf{X}]$) 周りに一次のテイラー展開をする。

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

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、 $c_k^{rs}(E[\mathbf{X}])$ は交通量はその平均値である時の経路旅行時間、 $\nabla_{\mathbf{x}} c_k^{rs}(\mathbf{x}) \Big|_{\mathbf{x}=E[\mathbf{X}]}$ は交通量はその平均値である時の経路旅行時間の勾配であり、ともに確定値もしく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ため、また、正規乱数の和も正規乱数となるため、上の式によって与えられる経路旅行時間も正規分布に従うことになる。上の式によって与えられる経路旅行時間の近似的な正規分布から経路旅行時間の95%タイル値を計算することができる。

c) 対数正規分布

正規分布は取り扱いが容易ではあるものの、負の値をとることがあり、また、左右対称であるため、旅行時間としてはふさわしくない場合も考えられる。そこで、ここでは旅行時間が以下のような対数正規分布に従うと仮定する。

$$\ln C \sim N(\lambda, \zeta^2) \quad (5)$$

となる。ここで

$$\lambda = \ln(E[C]) - 1/2 \zeta^2 \quad (6)$$

$$\zeta^2 = \ln(1 + \text{Var}[C]/E[C]^2) \quad (7)$$

である。ただし、 $N(\lambda, \zeta^2)$ は平均が λ 、分散が ζ^2 の正規分布、 $E[C]$ は経路旅行時間の期待値、 $\text{Var}[C]$ はその分散である。このときの旅行時間の95%タイル値は正規分布の累積分布関数 $\Phi((y - \lambda)/\zeta)$ に

$$y = (\ln c_{95} - \lambda)/\zeta \quad (8)$$

を代入して

$$\Phi(y) = 0.95 \quad (9)$$

を解くことで求まる。最終的に旅行時間の95%タイル値は

$$c_{95} = \exp\{1.645\zeta + \lambda\} \quad (10)$$

となる。

(2) 連結信頼性

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。

本研究では、各リンクに連結確率を設けてOD間の連結確率を定義して便益算出を行う。リンクの連結確率が分かれば経路の連結確率も算出できる。例えば、ある経路の中に3つのリンクがあるとする。3つのリンクの連結確率が0.98とすると経路の連結確率は 0.98^3 となる(図-1)。

OD間の連結確率を算出するためには最少パス法や最

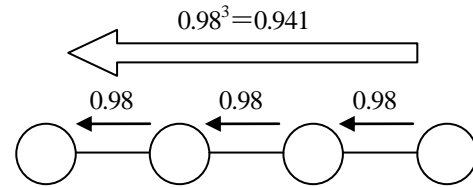


図-1 経路の連結確率の例

少カット法を用いるのが的確かと思われるが、計算の簡略化として各ODの連結確率はOD間の最小旅行時間となる経路の連結確率とする。

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、交通需要が確率的に変動すること、リンクが確率的に途絶することの2つの確率要因を考える。リンクの途絶は確率的ではあるものの、比較的長期のものを想定して、事前にその途絶を利用者は把握しているとする。しかし、交通需要については事前には把握できないとする。

リンク途絶はあらかじめ分かっているため、通過可能なリンクで構成された道路ネットワークについて均衡配分モデルを考える。上述の通り、交通需要が確率変動するため、その均衡配分は交通需要が確率変動するもとの配分となる。また、リンク途絶の状態はあらかじめ利用者はわかっているものの、確率的に生起するために通過可能なリンクで構成されたネットワークは様々な組み合わせのものとなる。

一つの通行可能なリンクで構成されたネットワークについて、中山ら⁸⁾・今村ら⁷⁾に従い、交通需要、すなわちOD交通量は互いに独立な正規分布に従うと仮定する。このように正規分布の確率分布を持ったOD交通量をネットワークに配分する。

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。

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⁹⁾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、田中ら⁹⁾の提案した考え方にに基づき、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} とすると、その平均と分散はそれぞれ $E[Q^{rs}]$, $Var[Q^{rs}]$ となる。OD交通量の分散は平均値の定数倍という考え方から、 $Var[Q^{rs}]$ は $\eta E[Q^{rs}]$ となる。ここで、 η は正のパラメータである。

ODペア rs 間の経路交通量の平均を μ_k^{rs} , 分散 $(\sigma_k^{rs})^2$ を $\eta\mu_k^{rs}$ と表記することとする。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。

$$F_k^{rs} \sim N[\mu_k^{rs}, \eta\mu_k^{rs}] \quad (11)$$

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。

次に、中山ら⁸⁾・今村ら⁷⁾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。このような仮定を置くことによって、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。

$$Q^{rs} = \sum_{k \in K^{rs}} F_k^{rs} \quad \forall r \in R, \forall s \in S \quad (12)$$

$$E[Q^{rs}] = \sum_{k \in K^{rs}} \mu_k^{rs}, Var[Q^{rs}] = \sum_{k \in K^{rs}} (\sigma_k^{rs})^2 \quad \forall r \in R, \forall s \in S \quad (13)$$

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(14)式のようにリンク 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、さらに、上述の η を用いて(15)式のようになる。

$$X_a = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \delta_{a,k}^{rs} F_k^{rs} \quad (14)$$

$$X_a \sim N \left[\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \delta_{a,k}^{rs} F_k^{rs}, \eta \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \delta_{a,k}^{rs} F_k^{rs} \right] \quad (15)$$

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。

以上の設定は中山ら⁸⁾・今村ら⁷⁾の研究と同様である。しかし、中山ら⁸⁾・今村ら⁷⁾では、最小旅行時間の経路を選択するものとなっているが、本研究では、経路を特定する必要があるため、経路選択はロジットモデルに従うとする。

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

$$P_k^{rs} = \frac{\exp(-g c_{95,k}^{rs})}{\sum_{k' \in K_{rs}} \exp(-g c_{95,k'}^{rs})} \quad (16)$$

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%タイル値、 K_{rs} はODペア rs 間の経路選択枝集合、 g : 分散パラメータである。

したがって、経路交通量は以下の式で表わされる。

$$F_k^{rs} \sim N[\mu_k^{rs}, \eta\mu_k^{rs}]$$

$$\mu_k^{rs} = q^{rs} \frac{\exp(-g \cdot c_{95,k}^{rs})}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp(-g \cdot c_{95,k}^{rs})} \quad (17)$$

ここで、 $E[f_{rs,k}]$: ODペア rs 間において経路 k の経路交通量、 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ト型均衡配分(確率的利用者均衡配分)は、平均経路交通量を求める以下の変分不等式問題として定式化される。

$$\text{Find } \boldsymbol{\mu}^* \in \boldsymbol{\Omega}$$

$$\text{such that } \sum_{rs} \sum_k c_{95,k}^{rs}(\boldsymbol{\mu}^*) \cdot (\mu_k^{rs} - \mu_k^{rs*}) \geq 0 \quad \forall \boldsymbol{\mu} \in \boldsymbol{\Omega} \quad (18)$$

ここで、 $c_{95,k}^{rs}(\cdot)$ はODペア rs 間の経路 k の旅行時間の95%タイル値を計算する関数、 μ_k^{rs} はODペア rs 間の経路 k の平均経路交通量、 $\boldsymbol{\mu}$ はそのベクトル、 $\boldsymbol{\Omega}$ は $\boldsymbol{\mu}$ のとり得る集合である。

上の問題は、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 γ と対角行列 \mathbf{B} を設定, 初期許容解(経路交通量パターン) $\boldsymbol{\mu}^{(1)}$ 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 $\boldsymbol{\mu}^{(m+1)}$ とする。

$$\min. Z(\boldsymbol{\mu}) = c_{95,k}^{rs}(\boldsymbol{\mu}^{(m)}) \cdot (\boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\mu}^{(m)})$$

$$+ \frac{1}{2\gamma} (\boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\mu}^{(m)}) \cdot \mathbf{B} (\boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\mu}^{(m)})$$

$$\text{subject to } \forall \boldsymbol{\mu} \in \boldsymbol{\Omega} \quad (19)$$

ただし、 \cdot はベクトルの内積である。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いならば、 $m = m+1$

としてStep1へ戻る。収束条件式がみなされていけば、計算を終了する。

$$\|\mu^{(m+1)} - \mu^{(m)}\| \leq \omega \quad (20)$$

ここで、 ω は収束条件値である。

4. 便益評価の式

本研究では時間信頼性と連結信頼性を統合したコスト算出式を定義して、それを基に環状道路整備による便益の向上を算出する。本章ではその統合評価式について述べる。

あるODについて、そのOD間が連結されていけば、すなわち少なくとも1つの経路でそのOD間が結ばれていけばトリップを行える。しかし、全ての経路が途絶していれば、そのOD間でトリップを行うことができない。また、ある経路について、その経路上のいずれか1つのリンクが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・他機関を利用・トリップを行わないのいずれかを選択することになる。OD間が連結しておらず、トリップを行うことができない場合のコストを κ とする。トリップを行えない不利益を意味しており、通常のトリップに要するコストよりも大きなものと想定できる。このトリップキャンセルコスト κ を算入することで、連結信頼性の便益評価が可能となる。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的な考え方は以下の式である。

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q^{rs} [\pi^{rs} \lambda^{rs} + \kappa(1 - \pi^{rs})] \quad (21)$$

ここで、 q^{rs} はODペア rs 間の交通需要（の平均値）、 π^{rs} はODペア rs 間が連結されている確率、 λ^{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し、大数の法則からそのばらつきは平均に比べて小さいと近似でき、評価の際は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。また、 λ^{rs} については、あとで詳述する。そして、この式は基本的な考え方を段階を追って示すための式であり、実際に本研究の計算等では用いない。

トリップキャンセルコスト κ について、2項ロジットモデルを用いて推定する場合、トリップを行うのか、とりにやめるのか（もしくは他の交通機関を用いるのか）の2項ロジットモデルが考えられ、道路利用者の行動選択は図-2の通りとなる。このようにして（非連結となって）トリップができない不利益を定量的に扱うことが可能である。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} を以下のように定義する。

$$U^{rs} = -\theta \lambda^{rs} + \varepsilon^{rs} \quad (22)$$

$$\bar{U}^{rs} = -\rho + \bar{\varepsilon}^{rs} \quad (23)$$

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

トリップを取り止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 ρ と

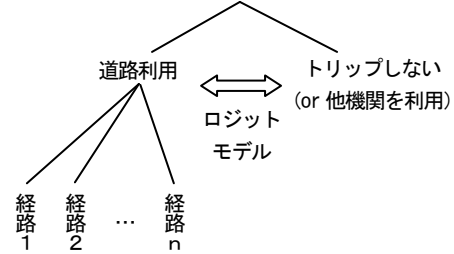


図-2 連結信頼性のための利用者選択構造

パラメータ θ から ρ/θ として、上述したトリップキャンセルコスト κ が得られる。この推定された κ を用いることによってトリップを行えないことに対する不利益を算定できる。なお、ここではODに関わらずトリップを行えない場合の不効用は一定としているが、より複雑な設定も可能である。また、震災時などを対象とする場合、震災直後の交通需要は通常時と大きく異なり、また、災害規模が大きくなると人命にも関わるような必要性の極めて高い需要も多く発生する。そのような場合も考慮するときは状況に応じて別々に推定する必要がある。推定のための調査等の手法や技術開発は今後の課題としたい。

ODペア rs 間が連結されている場合はトリップを行うのか取り止めるのかの両方を選択できる。一方で連結されていない場合はトリップを行わないしか選択できない。OD間が連結している場合、その場合でもあえてトリップを行わないこともあり得るため、その場合の便益指標としてのログサム変数、つまり最小コストの期待値は $-\ln[e^{-\theta \lambda^{rs}} + e^{-\theta \kappa}] / \theta$ として与えられる。連結されていない場合、そのOD間旅行時間は無限大と考えると最大効用の期待値は $-\ln[e^{-\infty} + e^{-\theta \kappa}] / \theta = \kappa$ である。連結されている確率が π^{rs} であることを踏まえ、(21)式にログサム変数を代入すると

$$-\frac{1}{\theta} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q^{rs} \pi^{rs} \ln[e^{-\theta \lambda^{rs}} + e^{-\theta \kappa}] + \kappa \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q^{rs} (1 - \pi^{rs}) \quad (24)$$

が得られる。2項ロジットモデルを用いた図-2の選択構造を仮定する場合、(21)式より(24)式が理論的に整合が取れている。既に述べたように、交通需要は正規分布に従って確率変動し、交通量・旅行時間も確率変動する。また、道路利用者は、既に述べたように、経路旅行時間の

95%タイル値を用いて行動している。したがって、トリップを行う場合のコストは旅行時間の95%タイル値を用いるべきである。前章で述べたように、(16)式のロジットモデルによって経路選択を行っているため、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

$$\lambda^{rs} = -\frac{1}{\theta} \ln \left[\sum_{k \in K_{rs}} e^{-\theta c_{95,k}^{rs}} \right] \quad (25)$$

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。

以上をまとめると、最終的に信頼性向上便益計算のための総コストは以下の式になる。

$$-\frac{1}{\theta} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q^{rs} \pi^{rs} \ln \left[\exp \left(\frac{\theta}{\theta} \ln \left[\sum_{k \in K_{rs}} e^{-\theta c_{95,k}^{rs}} \right] \right) + \exp(-\theta \kappa) \right] + \kappa \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} q^{rs} (1 - \pi^{rs}) \quad (26)$$

本研究では、上の式を用いて連結・時間信頼性を考慮した総旅行コストを算出する。この総旅行コストの増減によって交通施策の便益評価が可能となる。

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

前章で述べた統合評価法と配分モデルを用いて、金沢市道路ネットワークの山側環状道路建設の便益向上を算出する。

山側環状道路に属するリンクを追加する前のネットワークのノード数は140、リンク数は464である。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-3に示す。点線のノードとリンクが追加される山側環状道路に属するノード、リンクになる。

確率的要因としては、交通需要の確率変動とリンクの確率的途絶の2つである。既に述べたように交通需要の分散は平均の定数倍である。金沢の道路ネットワークのリンク交通量の分散については、実測値より $Var[X] = 42E[X]$ であった。よって、交通需要およびリンク交通量の分散はその平均の42倍とする。また、交通需要の平均は、第3回金沢都市圏PT調査における平日の朝7時台(7:00~8:00)のデータを基に設定した。

本章の配分自体も平日の朝7時台の時間配分である。各リンク途絶確率については0.98とした。リンク途絶確率は連結信頼性等に大きく影響し、丁寧に設定する必要があるものの、現実ネットワークの適用の際にどのように設定すべきは今後の課題とし、本研究では、時間信頼

性と連結信頼性の統合評価法を現実ネットワークでも適用可能かどうかの検討やその評価法の特性的考察を主目的とする。厳密な金沢ネットワークの便益評価については、途絶確率の設定方法などの確立後に再度行いたい。また、各ODのトリップキャンセルコストはOD間の最小旅行時間の3倍とした。

(2) 配分結果の妥当性

配分結果の妥当性を評価するために観測リンク交通

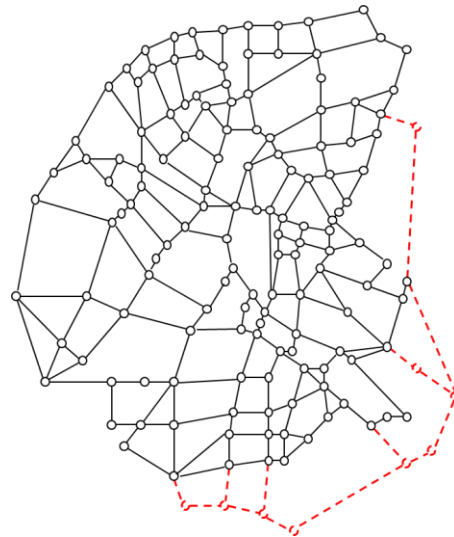


図-3 金沢市道路ネットワーク

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

量と配分リンク交通量の相関係数を算出する。計算結果を表-1に示す。計算結果より、いずれの経路旅行時間近似法であっても相関係数はおよそ0.8となり、配分結果はおおむね妥当と考えられる。また、利用者が95%タイル値を考慮して行動とした場合の配分を比較評価するために、平均値で評価した場合においても計算を行った。これは確配分において旅行コストを旅行時間の95%タイル値ではなく、その期待値を代入して計算したものである。ただし、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ないという結果になった。これは全ての人が旅行時間の期待値を基に行動すると仮定して均衡配分する場合と旅行時間の95%タイル値を基に行動すると仮定して均衡配分する場合とでは、配分結果については大きな違いがないということを示唆しているとも考えられる。なお、配分結果に大きな違いはないものの、平均値を用いた配分によっては、旅行時間の信頼性を評価することはできない。

(3) 便益計算

金沢市道路ネットワークにおける山側環状道路整備による便益算出結果を表-2、図-4に示す。結果は平均値を用いた通常の方法では山側環状道路整備により総旅行コストが約400(万円)の減少、95%タイル値では約518(万円)の減少となった。なお、これは平日の朝7:00～8:00の1時間分での便益である。

ここで、時間信頼性と連結信頼性を考慮する場合とそうでない場合とで便益計算結果がどの程度違うかを比較する。以下の4つのパターンを定義する。

- ・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
- ・パターンⅣ：時間信頼性と連結信頼性の両方を考慮しない便益計算(通常の方法)

時間信頼性の指標としては旅行時間を正規分布1に従うと仮定した場合の95%タイル値に統一する。なお、パターンⅠの結果は表-2、図-4の正規分布1の環状線と同一の計算方法で、パターンⅢは表-2、図-4の平均値の環状線と同一の計算方法である。

計算結果を表-3、図-5に示す。結果として、パターンⅠはパターンⅣの2倍ということになった。以上のように、本研究の手法を用いて、信頼性を含めて便益計算ができることを確認することができた。

6. まとめ

本研究では、道路の信頼性として代表的な時間信頼性と連結信頼性を取り上げ、それら時間信頼性と連結信頼性を含めた期待総旅行コストを定義し、時間信頼性と連結信頼性の2つの信頼性を統合した道路整備等の便益評価方法を提案した。また、信頼性を評価することができる確率的な均衡配分から得られた経路旅行時間の95%タイル値などを用いて、道路ネットワークのリンク追加による便益向上を評価する方法を構築した。そして、金沢市道路ネットワークでの山側環状道路の整備によって発生する便益の算出を時間信頼性と連結信頼性を含めて行った。金沢市道路ネットワークへの適用では、観測リンク交通量と計算平均リンク交通量との相関係数は0.8程度とおおむね良好であり、モデル適用の妥当性を確認することができた。また、山側環状道路整備の便益について、連結信頼性や時間信頼性の向上部分も計算可能であることを示すことできた。

今後の課題としては、より精密に便益を評価するための様々な推定が必要である。ネットワークのリンクの途絶確率の推定方法の確立、金沢市道路ネットワークでの

トリップキャンセルコストの推定、時間信頼性として何%タイル値が適切であるのかの決定などである。

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.

表-2 金沢市道路ネットワーク便益計算(万円)

	平均値	正規分布1	正規分布2	対数正規分布
環状線なし	4956	6280	6180	6421
環状線あり	4557	5764	5670	5891
環状線施工便益	400	516	510	530

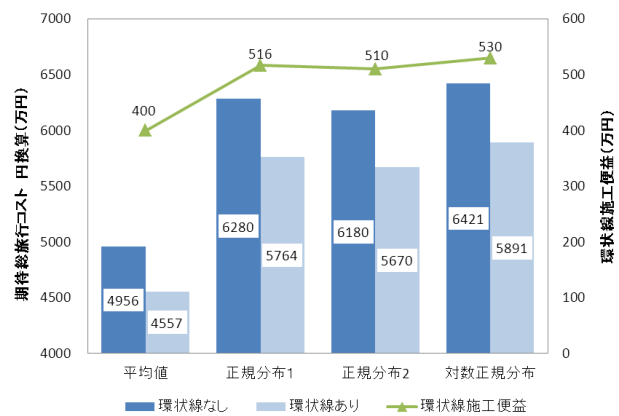


図-4 金沢市道路ネットワーク便益計算(万円)

表-3 各パターンにおける便益(万円)

パターンⅠ 時・連含む	パターンⅡ 時のみ含む	パターンⅢ 連のみ含む	パターンⅣ 時・連含まず
516	416	400	261

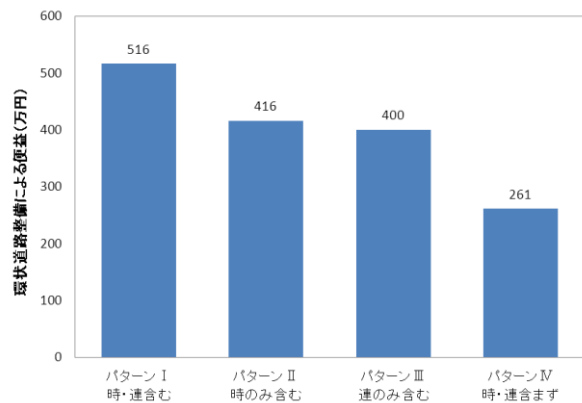


図-5 各パターンにおける便益(万円)

- 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.654/I-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ト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) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 飯田恭敬, 若林拓史: プ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.
- 13) 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.772/IV-65, 67-77, 2004.10.
- 14) 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
- 15) 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.

DEVELOPMENT OF A ROAD APPRAISAL METHOD THAT UNIFIES TRAVEL TIME RELIABILITY AND CONNECTIVITY RELIABILITY

Satoru TSUCHIKURA, Shoichiro NAKAYAMA, Jun-ichi TAKAYAMA

The reliability of road networks is becoming more and more important. There are several kinds of road network reliability. So far, the road network reliabilities have not been investigated and evaluated together. In this study, we focus on the travel time reliability and connectivity reliability, which are typically used and popular. We define an expected total cost which includes travel time and connectivity (un)reliabilities, and develop a unified evaluation method of both reliabilities. The traffic stochastic assignment that can assess the two reliabilities is incorporated into the proposed method. Then, the method is applied to Kanazawa road network and its applicability is examined.