

# リンク交通量に基づく移動時間信頼性の 評価手法の開発

峪 龍一<sup>1</sup>・内田 賢悦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail:ryuichitani@eis.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:uchida@eis.hokudai.ac.jp

本研究では、確率的交通需要を仮定した道路ネットワークにおける各リンクの移動時間の不確実性をリンク交通量に基づく指標を用いて評価する手法を提案する。確率変数としてのリンク交通量と移動時間関数との間の確実性等価を考えることによって、リンク移動時間の不確実性をリンク交通量の仮想的な増分としてとらえることができる。異なる 2 つのリンク間における移動時間の確率的相関を考慮するとき、リンク移動時間の平均と分散共分散にそれぞれ対応する、リンク交通量の仮想的な増分が与えられることを示す。したがって、道路ネットワーク全体の移動時間の不確実性を確定的なリンク交通量を指標として評価することが可能となる。数値計算例として、テストネットワークにおける交通量の配分結果を用いて、提案するモデルを適用した結果を示す。最後に、提案するモデルを用いて、道路ネットワークにおける移動時間の不確実性を評価する上での展望を示す。

**Key Words:** *stochastic travel demand, travel time reliability, risk premium, certainty equivalent*

## 1. はじめに

道路ネットワークは日々様々な不確実性にさらされており、ドライバーは移動時間が不確実に変動することを前提とした交通行動を余儀なくされている。道路ネットワークの不確実性を評価することは、道路管理者にとって、高度な道路管理を実現するためにも主要な課題の一つである。一般的に、道路ネットワークにおいて、移動時間の不確実性を考える場合、交通量予測や道路事業の費用便益分析への利用を目的とした、均衡配分モデルを対象とすることが多い。一方で、接続信頼性や接続脆弱性などの、道路ネットワークの物理的な接続性を考慮する場合には、移動時間の不確実性を扱うことは難しい。

例えば、交通流の均衡を与件として、道路ネットワーク全体の物理的な接続性を分析する場合、均衡制約付き最適化問題 (MPEC) として定式化することが考えられるが、このうち、移動時間の不確実性を考慮する場合、均衡制約において、交通需要の不確実性を考慮しなければならず、モデルの規模が大きくなることが予想される。

そこで、本研究では、確率的な移動時間を簡易的に表現することを目的として、道路ネットワーク中の不確実性をリンク交通量とその増分によって記述することを目

指す。

一般的に、交通需要の不確実性を与件とする交通量配分モデルでは、リンク交通量ならびにリンク移動時間は多変数の確率変数として表される。ここで、確率的なリンク移動時間の期待値に対応するリンク交通量の平均とその増分を定義することによって、リンク交通量の不確実性に基づくリンク移動時間の不確実性を、リンク交通量のみで表すことが可能となる。本稿で示す考え方は、金融経済学における確実性等価・リスクプレミアムの基本的な定義に基づくものである。しかし、近似精度を向上させる、あるいはリンク移動時間の分散・共分散に対応するリンク交通量の増分を求めるために、定義の拡張を行っている。

本稿の構成は以下の通りである。まず、1. において本研究の背景と概要を述べた。2. では確率的なネットワークフローと移動時間の一般的な定式化とともに、確実性等価の概念に基づいて、確率的リンク移動時間の平均および分散・共分散を求める手法を示す。3. において、2. で提案する手法を、テストネットワークにおける交通量配分の結果例に適用した結果を示す。4. において、本研究のまとめと、今後の研究の展望を述べる。

## 2. モデルの定式化

### (1) 記号

本稿で使用する記号は以下の通りである。なお、確率変数は大文字、確定値は小文字で表している。

- W**: 道路ネットワーク中の OD ペア集合  
**K<sub>w</sub>**: OD ペア  $w$  の間の経路集合  
**Q<sub>w</sub>**: OD ペア  $w$  における確率的交通需要  
**q<sub>w</sub>**: OD ペア  $w$  における確率的交通需要の平均  
**cv<sub>w</sub>**: OD ペア  $w$  における確率的交通需要の変動係数  
**δ<sub>w,k,a</sub>**: リンク  $a$  が OD ペア  $w$  における経路  $k$  にふくまれるとき 1 を、それ以外の時には 0 をとる変数  
**F<sub>w</sub><sup>k</sup>**: OD ペア  $w$  における経路  $k$  の確率的経路交通量  
**f<sub>w</sub><sup>k</sup>**: OD ペア  $w$  における経路  $k$  の確率的経路交通量の期待値  
**V<sub>a</sub>**: リンク  $a$  における確率的リンク交通量  
**v<sub>a</sub>**: リンク  $a$  における確率的リンク交通量の平均  
**c<sub>a</sub>**: リンク  $a$  における確率的リンク交通容量  
**t<sub>a</sub>**: リンク  $a$  における確率的リンク移動時間  
**t<sub>k</sub><sup>w</sup>**: OD ペア  $w$  における経路  $k$  の確率的経路移動時間

### (2) 交通量の定式化

本研究では、確率的な交通需要を扱う。ここで、以下の議論は OD 交通量の確率分布の分布形状には依存しない点に注意が必要である。ただし、OD 交通量と経路交通量、リンク交通量のそれぞれにおいて、等しい分布形状を保証する場合には、ある確率分布において加法性が要求される。OD ペア  $w$  間の確率的交通需要  $Q_w$  の平均は  $E[Q_w] = q_w$  である。分散は変動係数  $cv_w$  を用いるとき、 $var[Q_w] = (cv_w \cdot q_w)^2$  で与えられる。ここで、OD 交通量  $Q_w$  は OD ペア  $w$  における、すべての経路集合  $K_w$  の和である。

$$Q_w = \sum_{k \in K_w} F_k^w \quad (1)$$

確率的リンク交通量、 $V_a$  はリンク  $a$  を通過するすべての確率的経路交通量の和で表される。

$$V_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_{w,k,a} \cdot F_k^w \quad (2)$$

OD ペア  $w$  の OD 交通量の平均は OD ペア間を結ぶすべての経路の交通量の平均の和で表される。また、経路交通量は常に非負である。

$$q_w = \sum_{k \in K_w} f_k^w \quad (3)$$

$$f_k^w \geq 0 \quad (4)$$

リンク交通量の平均は経路交通量の和として表現される。

$$v_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_{w,k,a} \cdot f_k^w \quad (5)$$

### (3) リンク交通量の確実性等価

金融経済学において、投資家が将来価格が不確実に変動する金融商品を選択し、最適なポートフォリオの構築を目指すことは主要な問題である。ここで、確率変数  $X$  と効用関数  $u(X)$  を考える。なお、 $X$  は金融商品の将来価格に相当し、 $u(X)$  は投資家が金融商品を保有するときの効用関数に相当する。したがって、 $u(X)$  は確率変数であり、その期待値について以下の関係を得る。

$$E[u(X)] = u(x_o) \quad (6)$$

ここで、 $x_o$  は効用関数  $u(X)$  を介した金融商品の将来価格  $X$  の確実性等価である。(例えば、池田<sup>1)</sup>) つまり、確率変数  $X$  の確実性等価とは、効用関数の期待値を与える確定的な見かけ上の金融商品の価格である。ここで、確実性等価の概念を移動時間または交通量が確率的に変動する道路ネットワークに適用する。例えば、リンク交通量が確率変数として与えられるとき、リンク移動時間の期待値を与えるリンク交通量の確実性等価が求まる。ここで、確率的リンク交通量は上記の  $X$  に、リンクコスト関数は  $u(X)$  に相当している。本研究では、多くの既存研究にならない、リンクコスト関数として BPR 関数 (Bureau of Public Roads<sup>2)</sup>) を採用するものとする。

$$t_a(v_a, c_a) = t_a^o \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{v_a}{c_a}\right)^n\right) \quad (7)$$

ここで、BPR 関数は単調増加な関数である。

$$\frac{dt_a}{dv_a} > 0, \frac{d^2t_a}{dv_a^2} > 0 \quad (8)$$

通常、BPR 関数は確定的なリンク交通量・移動時間等を想定する。そこで、リンク交通量として確率的リンク交通量、 $V_a$  を BPR 関数に代入することで、リンク移動時間を確率変数として与えられるものとする。(例えば、内田, 2009)

$$t_a(V_a, c_a) = t_a^o \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{V_a}{c_a}\right)^n\right) \quad (9)$$

ドライバーにとって、移動時間は不効用である。そのため、リンクを通行する際の不効用はリンク移動時間を用いて以下のように定義できる。

$$u(v_a) = -t(v_a) \quad (10)$$

また、確率的リンク交通量  $V_a$  は、確定項  $v_a$  と確率項  $\varepsilon_a$  に分離できる (例えば、 $V_a$  が正規分布にしたがうとき。)

$$V_a = v_a + \varepsilon_a \quad (11)$$

ここで、リンク交通量の増分、 $\pi_a$  は確率的リンク交通量の平均とリンク移動時間に対する確実性等価を用いて以下のように定義できる。

$$-\pi_a = v_a^o - v_a \quad (12)$$

リンク移動時間に対応する増分を用いて、確率的リンク移動時間の平均は、以下のように書き換えられる。

$$E[t_a(v_a + \varepsilon_a)] = t_a(v_a + \pi_a) \quad (13)$$

式(13)の左辺と右辺のそれぞれについて、2次の Taylor 近似を施すと、式(14)、(15)が導かれる。

$$E[t_a(v_a + \varepsilon_a)] = E \left[ t_a(v_a) + t'_a(v_a)\varepsilon_a + \frac{t''_a(v_a)\varepsilon_a^2}{2} \right] \quad (14)$$

$$t_a(v_a + \pi_a) = t_a(v_a) + t'_a(v_a)\pi_a + \frac{t''_a(v_a)\pi_a^2}{2} \quad (15)$$

式(14)、(15)より、両辺を比較して得られる2次方程式をリンク交通量の増分、 $\pi_a$ について解くことによって、 $\pi_a$  は以下のように求まる。

$$\pi_a = -\frac{t'_a(v_a)}{t''_a(v_a)} + \sqrt{\left(\frac{t'_a(v_a)}{t''_a(v_a)}\right)^2 + \text{var}[V_a]} \quad (16)$$

したがって、確率的リンク交通量の確実性等価はリンク交通量の平均とリンク移動時間の平均に対応するリンク交通量の増分の和として以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} v_a^o &= v_a + \pi_a \\ &= v_a - \frac{t'_a(v_a)}{t''_a(v_a)} + \sqrt{\left(\frac{t'_a(v_a)}{t''_a(v_a)}\right)^2 + \text{var}[V_a]} \end{aligned} \quad (17)$$

つまり、リンク交通量の確実性等価とは、BPR 関数の形状とリンク交通量の期待値と分散によって決まる量である。ここで、リンク交通量の分散が 0 に近づくとき、すなわちリンク交通量が確定値に近づくとき、 $\pi_a$  は 0 に収束することに注意が必要である。

$$\lim_{\text{var}[V_a] \searrow 0} \pi_a = 0 \quad (18)$$

ところで、一般に金融経済学において、価格が確率的に変動する財とその効用関数の関係から、リスクプレミアムを導出するためには、(i)財の価格を示す確率分布が楕円分布族に属すること、(ii)効用関数が2次関数であることのいずれかの条件を満たす必要がある。(例えば、池田<sup>1)</sup>) 上記で示した定式化を実現するためにはそれぞれ(i)リンク交通量が楕円分布族に属する確率分布にしたがうこと、(ii)リンクコスト関数がリンク交通量に関して2次関数であることが求められる。しかし、現実の交通を考えると、リンクコスト関数が2次関数で表されることは現実的ではなく、多くの先行研究においても2次以上の多項式で表されることが多い(例えば、Lam et al.<sup>3)</sup>、内田<sup>4)</sup>)。そのため、リンク交通量が楕円分布族に属する確率変数にしたがうことを仮定することがより現実的であると考えられる。事実、交通需要が正規分布(楕円分布族に属する。)にしたがうと仮定した研究が数多く存在する。(例えば、Lametal.<sup>3)</sup>、内田<sup>4)</sup>) 正規分布は加法性を有するため、交通流の定式化を容易にさせる。なお、本研究における以下の議論では、交通需要が正規分布にしたがうものと仮定する。

確率的リンク交通量の不確実性部分はリスクプレミアムに相当する。つまり、本研究が提案するモデルではリ

ンク交通量の不確実性をリンク交通量の平均に対するリンク交通量の増分として扱えることを意味する。

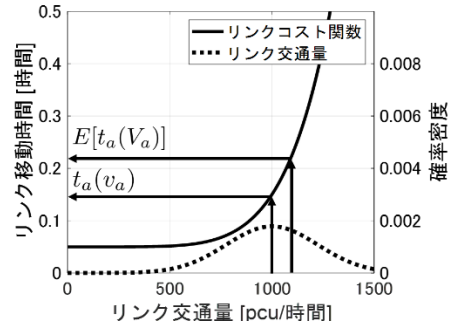


図-1 確率的リンク移動時間の平均に対応するリンク交通量の確実性等価のイメージ

上図において、確定的なリンク交通量、 $v_a=1000$  [pcu/hour]を考えると、リンク移動時間は $t_a(v_a)$ として与えられる。しかし、確率的なリンク交通量 $V_a$ を考えると、リンク移動時間の平均は $E[t_a(V_a)]$ として与えられる。ここで、 $E[t_a(V_a)] = t_a(v_a^o)$ であり、リンク移動時間の増分を与えるのがリンク移動時間の平均に関するリンク交通量の増分、 $\pi_a$ である。

なお、本研究ではリンク移動時間の平均に対応するリンク交通量の増分を求めるに当たって、リンクコスト関数を2次近似した。金融経済学においては効用関数を1次近似したリスクプレミアムに基づいた議論が多く存在する。しかし、本研究では交通量配分において、確率的リンク移動時間の近似精度を高めるため、2次近似によってリンク交通量の増分を導出している。

#### (4) 確率的リンク移動時間の分散・共分散

リンク移動時間の分散・共分散に対応するリンク交通量の増分を導出する。モデリングにおける仮定として、式(28)の両辺に対して2変数のテイラー近似を施し、リンク移動時間の分散・共分散に相当するリンク交通量の増分を定式化する。異なる2つのリンクのリンクコスト関数の積は以下のように定義される。

$$u(v_a, v_b) = t_a \left( 1 + \alpha \left( \frac{v_a}{c_a} \right)^a \right) \cdot t_b \left( 1 + \alpha \left( \frac{v_b}{c_b} \right)^b \right) \quad (19)$$

式(19)について、 $v_a, v_b$ に関してそれぞれ偏微分(1階、2階)する。

$$u_{v_a}(v_a, v_b) = t_a \cdot t_b \left( n\alpha \frac{v_a^{n-1}}{c_a^n} + n\alpha^2 \frac{v_a^{n-1} v_b^n}{c_a^n c_b^n} \right) \quad (20)$$

$$u_{v_b}(v_a, v_b) = t_a \cdot t_b \left( n\alpha \frac{v_b^{n-1}}{c_b^n} + n\alpha^2 \frac{v_b^{n-1} v_a^n}{c_b^n c_a^n} \right) \quad (21)$$

$$u_{v_a v_a}(v_a, v_b) = t_a \cdot t_b \left( n(n-1)\alpha \frac{v_a^{n-2}}{c_a^n} + n(n-1)\alpha^2 \frac{v_a^{n-2} v_b^n}{c_a^n c_b^n} \right) \quad (22)$$

$$u_{v_a v_b}(v_a, v_b) = t_a \cdot t_b \left( \begin{array}{c} n(n-1)\alpha \frac{v_b^{n-1}}{c_b^n} \\ +n(n-1)\alpha^2 \frac{v_b^{n-2} v_a^n}{c_b^n c_a^n} \end{array} \right) \quad (23)$$

$$u_{v_a v_b}(v_a, v_b) = t_a \cdot t_b \left( n^2 \alpha^2 \frac{v_a^{n-1} v_b^{n-1}}{c_a^n c_b^n} \right) \quad (24)$$

ここで、道路ネットワーク全体の各 OD 交通量が正規分布にしたがうとき、それぞれのリンク交通量は多変量正規分布にしたがう。このとき、異なる 2 つのリンクのリンク移動時間の積を確実性等価に基づいて近似する。

$$E[u(v_a + \varepsilon_a, v_b + \varepsilon_b) = u(v_a + \pi_a, v_b + \pi_b)] \quad (25)$$

上式の両辺をそれぞれ展開すると以下の通りである。

$$\begin{aligned} E[u(v_a + \varepsilon_a, v_b + \varepsilon_b)] \\ = u(v_a, v_b) + \frac{1}{2} u_{v_a v_a} \text{var}[V_a] + \frac{1}{2} u_{v_b v_b} \text{var}[V_b] \\ + u_{v_a v_b} \text{cov}[V_a, V_b] \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} u(v_a + \pi_a, v_b + \pi_b) \\ = u(v_a, v_b) + \delta\pi_a u_{v_a} + \delta\pi_b u_{v_b} \\ + \frac{1}{2} u_{v_a v_a} \delta\pi_a^2 + \frac{1}{2} u_{v_b v_b} \delta\pi_b^2 + u_{v_a v_b} \delta\pi_a \delta\pi_b \end{aligned} \quad (27)$$

したがって、リンク移動時間の共分散に対応するリンク交通量の増分の組は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} \delta\pi_a u_{v_a} + \delta\pi_b u_{v_b} + \frac{1}{2} u_{v_a v_a} \delta\pi_a^2 + \frac{1}{2} u_{v_b v_b} \delta\pi_b^2 \\ + u_{v_a v_b} \delta\pi_a \delta\pi_b - \frac{1}{2} u_{v_a v_a} \text{var}[V_a] - \frac{1}{2} u_{v_b v_b} \text{var}[V_b] \\ - u_{v_a v_b} \text{cov}[V_a, V_b] = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

ここで、リンク移動時間の共分散に対応するリンク交通量の増分の組をテイラー近似 (2 次) に基づいて決定しているため、近似解の集合は 2 次曲線によって表されることに注意が必要である。さらに、リンク交通量の増分の組を一意に代表させるため、以下のような仮定を設ける。

$$\hat{\pi}_{a,b} = \delta\pi_a = \delta\pi_b \quad (29)$$

つまり  $\delta\pi_a$  と  $\delta\pi_b$  が互いに等価となる  $\hat{\pi}_{a,b}$  を見つけることを目指す。したがって、式 (29) は  $\hat{\pi}_{a,b}$  を用いて以下のように表される。

$$\begin{aligned} \left( \frac{1}{2} u_{v_a v_a} + \frac{1}{2} u_{v_b v_b} + u_{v_a v_b} \right) \delta\pi_{a,b}^2 \\ + (u_{v_a} + u_{v_b}) \delta\pi_{a,b} - \frac{1}{2} u_{v_a v_a} \text{var}[V_a] \\ - \frac{1}{2} u_{v_b v_b} \text{var}[V_b] - u_{v_a v_b} \text{cov}[V_a, V_b] = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

上式を  $\hat{\pi}_{a,b}$  について解くことによって、 $\hat{\pi}_{a,b}$  の近似解を得る。なお、リンク間の相関を考慮した交通量配分モデルの確率的な交通流の一般的な定式化より、 $\text{cov}[V_a, V_b] \geq 0$  であることから、 $\hat{\pi}_{a,b} \geq 0$  となることに注意が必要である。

確率的道路ネットワークにおける、リンク交通量とリンク移動時間はそれぞれ多変量の確率分布で表され、具体的には以下に示す平均ベクトルと分散共分散行列によって規定される。

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}, \mathbf{\Sigma}_v = \begin{pmatrix} \sigma_{v_{11}} & \cdots & \sigma_{v_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{v_{n1}} & \cdots & \sigma_{v_{nn}} \end{pmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix}, \mathbf{\Sigma}_t = \begin{pmatrix} \sigma_{t_{11}} & \cdots & \sigma_{t_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{t_{n1}} & \cdots & \sigma_{t_{nn}} \end{pmatrix} \quad (32)$$

交通需要の確率的な変動を考慮した交通量配分モデルでは上記に示す 2 種類の多変量確率変数を用いて、道路ネットワーク中の不確実性を説明することが一般的である。しかし、リンク交通量とリンク移動時間の関係において確実性等価の概念を適用することによって、道路ネットワーク中の不確実性をリンク交通量の平均とリンク移動時間の平均と分散共分散に対応するリンク交通量の仮想的な増分を用いて表現することが可能となる。

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}, \mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} \pi_1 \\ \vdots \\ \pi_n \end{pmatrix}, \hat{\mathbf{\Pi}} = \begin{pmatrix} \hat{\pi}_{11} & \cdots & \hat{\pi}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\pi}_{n1} & \cdots & \hat{\pi}_{nn} \end{pmatrix} \quad (33)$$

つまり、リンク移動時間の平均は上における  $\mathbf{v}$  とリンク移動時間の平均を与えるリンク交通量の増分、 $\mathbf{\Pi}$  によって、リンク移動時間の分散と共分散は  $\mathbf{v}$  とリンク移動時間の分散・共分散を与えるリンク交通量の増分、 $\hat{\mathbf{\Pi}}$  によって表現することができる。

### 3. 数値計算

本研究で提案する手法を検証するため、テストネットワーク (図-3, Nguyen and Dupuis<sup>5)</sup>) における配分結果をもとにした、簡単な数値計算例を示す。

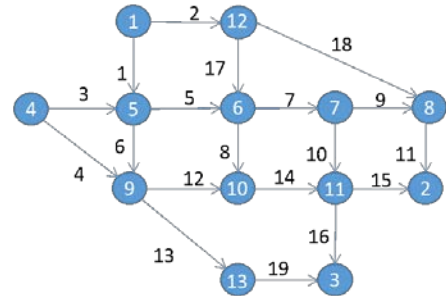


図-2 テストネットワーク

テストネットワークは 4 組の OD ペアと 19 本のリンクから構成される。各 OD ペアにおける OD 交通量の平均と変動係数を表-1 に示す。

表- 1 OD 交通量

ODペア	平均	変動係数
1,2	1000	0.2
1,3	1000	0.2
4,2	1000	0.2
4,3	1000	0.2

なお、交通需要は正規分布にしたがうものと仮定する。BPR 関数におけるパラメータ、 $\alpha$ 、 $n$  はすべてのリンクにおいてそれぞれ 2 と 6 である。すべてのリンクにおける自由走行時間は 0.05[時間]であり、リンク交通容量は 1000[pcu/時間]である。

ここで、ロジット型の確率的交通量配分を行う。リンク・経路の組み合わせは固定とし、4 組の交通需要が 25 経路に配分される。まず、ドライバーが移動時間の平均に基づいて経路選択する場合を考える。ドライバーの効用を以下のように仮定する。

$$\eta_k^w = E[T_k^w] \quad (34)$$

ドライバーの効用の分散パラメータを  $\theta$  とするとき、交通量配分問題を以下に示す不動点問題として定式化する。なお、ドライバーの認知誤差に相当するパラメータ  $\theta$  は 1 とする。逐次平均法(MSA)によって、配分計算を行った。MSAにおける繰り返し計算の回数は 100 回である。

$$\mathbf{f}_w = q_w \cdot \mathbf{p}_w(\boldsymbol{\eta}_w(\mathbf{f})) \quad (35)$$

where

$$p_k^w = \frac{\exp(-\theta \cdot \eta_k^w)}{\sum_{k \in \mathbf{K}_w} \exp(-\theta \cdot \eta_k^w)} \quad (36)$$

$$\mathbf{f}_w = (f_{w,1}, \dots, f_{w,|\mathbf{K}_w|})^T \quad (37)$$

$$\mathbf{f} = (\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_{|\mathbf{W}|})^T \quad (38)$$

$$\mathbf{p}_w = (p_{w,1}, \dots, p_{w,|\mathbf{K}_w|})^T \quad (39)$$

$$\boldsymbol{\eta}_w = (\eta_{w,1}, \dots, \eta_{w,|\mathbf{K}_w|})^T \quad (40)$$

交通量配分計算によって図-2, 3 のように、リンク交通量とリンク移動時間の分散・共分散が得られた。このとき、リンク移動時間の分散・共分散に対応するリンク交通量の増分は図-4, 5, 6 のように求められる。いずれも、各組合せにおいて、行列内の同じ位置の要素値の大小の傾向がそれぞれ対応していることがわかる。

次に、ドライバーが移動時間の平均と分散に基づいて経路選択を行うことを仮定する。経路選択基準は以下の通りである。なお、リスク回避度のパラメータである  $\gamma$  は 1 とする。ドライバーの効用関数を、Fosgerau and Engelson<sup>6)</sup>に基づき、経路移動時間の平均と分散の和と定義している。

$$\eta_k^w = E[T_k^w] + \gamma \cdot \text{var}[T_k^w] \quad (41)$$

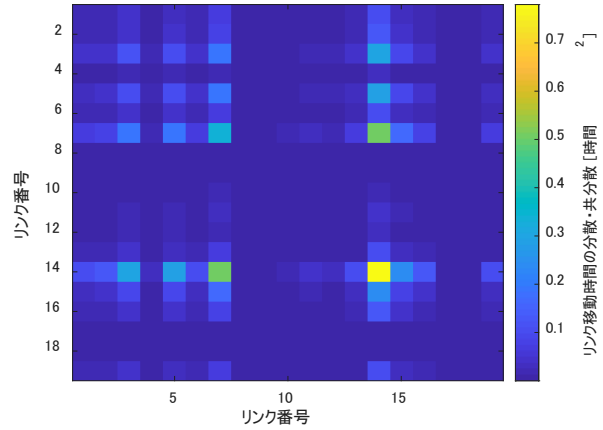


図-3 リンク移動時間の分散・共分散

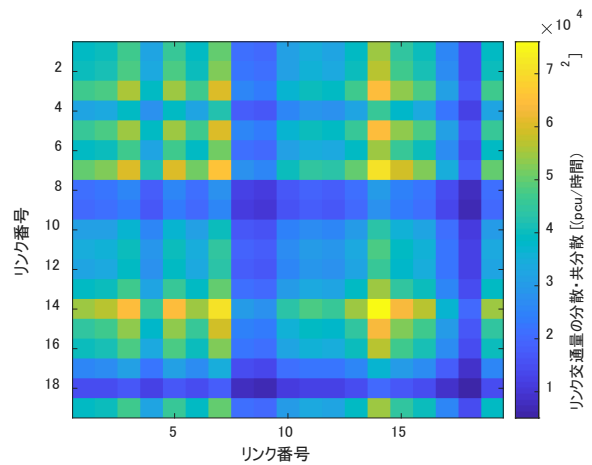


図-4 リンク交通量の分散・共分散

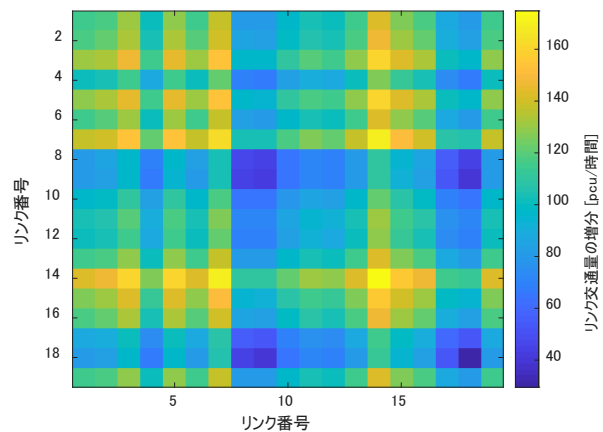


図-5 リンク移動時間の分散・共分散に対応するリンク交通量の増分

式(41)に示す経路選択基準に基づき、上記の例と同様に交通量の配分計算を行い、リンク移動時間とリンク交通量それぞれの分散・共分散、リンク移動時間の分散・共分散に対応するリンク交通量の増分を図-7, 8, 9に示す。

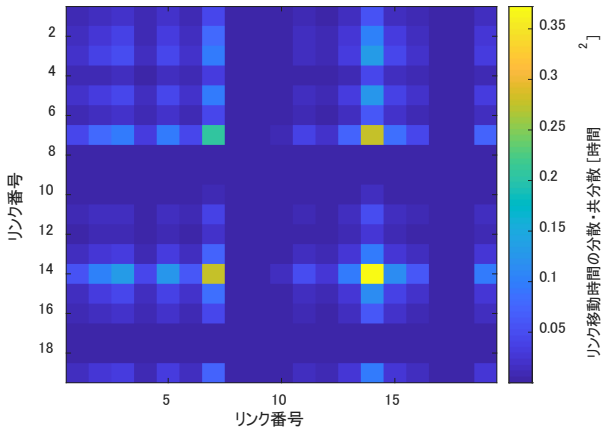


図-6 リンク移動時間の分散・共分散

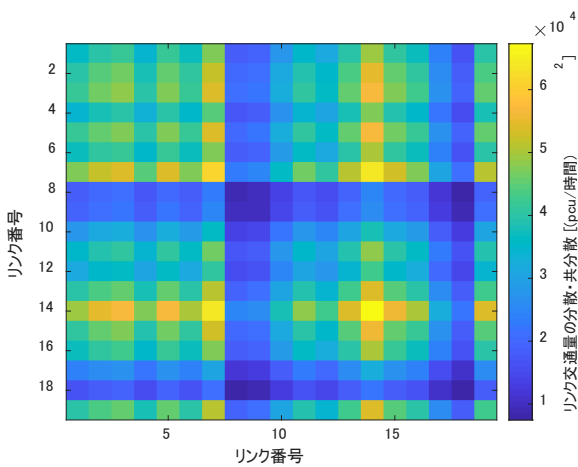


図-7 リンク交通量の分散・共分散

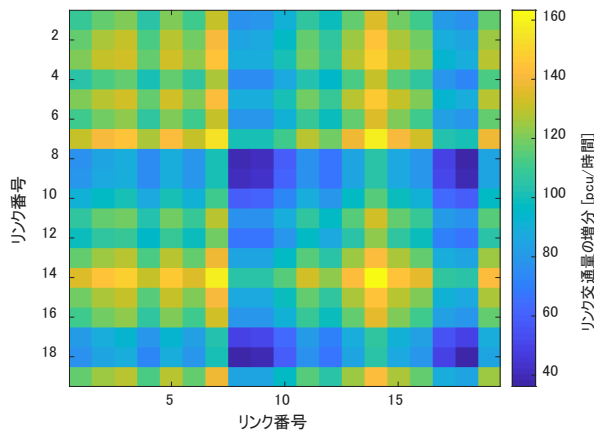


図-8 リンク移動時間の分散・共分散に対応する  
リンク交通量の増分

#### 4. おわりに

本研究では、交通量ならびに移動時間が不確実な道路ネットワークにおいて、確実性等価・リスクプレミアムの概念を用いて、道路ネットワークの不確実な状態を評価する手法を提案した。通常、道路ネットワークにおいて、交通需要の確率的な変動を考える場合、リンク交通量ならびにリンク移動時間は多変量の確率分布としてあらわされる。本研究で提案する手法では、リンク移動時間の平均、分散・共分散を、それぞれに対応するリンク交通量の増分を用いて表現できることを示した。リンク交通量の増分とは、リンクコスト関数の形状とリンク交通量の不確実性を反映した量である。つまり、本研究で導入した指標によって、道路ネットワーク中の移動時間の不確実性をリンク交通量ベースで評価することが可能となる。

今後の展望として、本研究で提案する手法を、交通量と移動時間の関係を内生化した交通ネットワーク計画問題に適用することが考えられる。また、確率的な移動時間を交通量ベースで評価することによって、各リンクにおける交通量の制約を確率的移動時間についての制約とみることができると考えられるため、確率的移動時間を制御するという問題設定も可能になると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 池田昌幸：金融経済学の基礎，朝倉書店，2000。
- 2) Bureau of Public Roads, Traffic Assignment Manual, U.S. Department of Commerce, Urban Planning Division, Washington DC, 1964.
- 3) Lam, W.H.K., Shao, H. & Sumalee, A.: Modeling impacts of adverse weather conditions on a road network with uncertainties in demand and supply, Transportation Research Part B, Vol. 42, No.10, pp. 890-910, 2008.
- 4) 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, No.3, pp.386-398, 2009.
- 5) Nguyen, S. Dupuis, C.: An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs, Transportation Science, Vol.18, No.2, pp.185-202, 1984.
- 6) Fosgerau, M., Engelson, L.: The value of travel time variance. Transportation Research Part B, Vol. 45, No.1, pp.1-8, 2011.

(2018. 4. 27 受付)

## DEVELOPMENT OF EVALUATION METHOD OF TRAVEL TIME RELIABILITY BASED ON LINK FLOWS

Ryuichi TANI and Kenetsu UCHIDA

This study proposes an evaluation method of uncertainty of link travel times in a road network under stochastic travel demand. In our proposed method, travel time variability is evaluated by link flows. Uncertainty of link travel time is represented by virtual increments of link travel time by a concept of certainty equivalent derived between a stochastic link flow and a link cost function. If a road network has statistically correlation of link travel times and link flows between two different links, increments of link flows which correspond to variance-covariance matrix of stochastic link travel time is also obtained. We apply the proposed method to results of traffic assignment problem in a test network. In the end of the article, future directions of our proposed method for evaluating uncertain travel time in a road network is shown.