

水害時の移動時間信頼性を考慮した 均衡配分モデル構築に関する研究

加藤 宏祐¹・内田賢悦²

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院（〒060-8628 札幌市北区13条西8丁目）
E-mail:instinct@ec.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学大学院 工学研究院（〒060-8628 札幌市北区13条西8丁目）
E-mail:uchida@eng.hokudai.ac.jp

近年、大規模な降雨による水災害が頻発している。道路交通への影響に焦点を当てると、水災害時等の悪天候時にはドライバーの移動時間は低下し、さらには移動時間の信頼性もまた低下する¹⁾。

さらには、大雨により道路が冠水するような場合には、通行止め等の措置が取られることになる。

本稿では、移動時間と道路の復旧に要する時間の不確実性を考慮し、リスク回避的なドライバーの経路選択行動²⁾の観点から、水災害時の交通量配分モデルの構築とその検証を行った。

Key Words: *travel time, travel time reliability, road network, Gaussian mixture distribution, n-years rain, traffic assignment problem*

1. 背景と目的

道路が冠水するような大規模な降雨が発生した際には、通行止めの措置が取られるが、このような規模の降雨の状況下で道路機能を正常に保つ、または被害を軽減するには河川や道路の改修工事を行う必要がある。

しかし、限られた予算制約の中で効果的な改修を行うためには、その地域の中で重要度の高い道路に着目して河川/道路の改修を行う必要がある。また重要度の高い道路とドライバーの経路選択行動は深い関係があると考えられる。道路ネットワーク上ではある起終点 (O-D) 間を移動する際、移動時間が日々変動していることが知られている。移動時間の信頼性とはその確率的に変動する移動時間のばらつき (不確実性) のことを指すが、ドライバーはそうした不確実性下での経路選択行動をとることになる。

本稿では、1年間で最大降雨が観測される日を解析対象とする問題を考える。ある強度を有する降雨発生の不確実性と移動時間の不確実性を考慮し、リンクの移動時間をガウス混合分布によって表現する。さらに、確率的移動時間を指標化した均衡配分モデルの構築を行う。ガウス混合分布を適用することで、降雨によりリンクが途絶する状態と連結されている2つの状態を考慮することができる。以上のような方法で表した確率的移動時間の

平均と分散を用いて各経路の評価値を推計し、経路選択問題を定式化している。この配分モデルは利用者均衡配分モデルとして定式化される。本稿では最後に数値計算例を示し、モデルの検証を行う。

2. ネットワーク上の変数

(1) 記号

A	リンクの集合
I	O-Dペアの集合
J_i	O-Dペア <i>i</i> の経路集合
δ_{ij}^a	リンク <i>a</i> がO-Dペア <i>i</i> の経路 <i>j</i> の一部であれば1、それ以外ならば0を取る変数
$x_{a,n}$	<i>n</i> 年確率降雨がある場合のリンク <i>a</i> の交通量
l_a	リンク <i>a</i> の延長
$c_{a,n}$	<i>n</i> 年確率降雨がある場合のリンク <i>a</i> の交通容量
$v_{a,n}^f$	リンク <i>a</i> の自由走行速度
$T_{a,n}^c$	<i>n</i> 年降雨があったときにリンク <i>a</i> が通行可能な場合の確率的移動時間
cv_a	確率的移動時間の変動係数
T_a^d	<i>n</i> 年降雨があったときにリンク <i>a</i> が通行止めとなった場合の確率的移動時間
p_n	<i>n</i> 年降雨の発生確率

$p_{a,n}^d$	n 年降雨があったときのリンク a が通行止めとなる確率
T_a	すべての降雨発生確率を考慮したリンク a の確率的移動時間
r_{ab}	リンク a と b の移動時間に関する相関係数
c_{ij}	O-Dペア i の経路 j の評価値
q_i	O-Dペア i のフロー
p_{ij}	ドライバーがO-Dペア i の経路 j を選択する確率
f_{ij}	O-Dペア i の経路 j のフロー

(2) リンクの確率的移動時間

はじめに、 n 年降雨が発生した時のリンク移動時間を考える。この場合、道路ネットワーク上のリンクは通行可能と通行止めの2つの状態をとり得ると考えられる。 n 年降雨が発生したとき、リンク a が通行可能な場合の確率的移動時間は正規分布に従うものと仮定して式(1)で表現し、その平均と分散はそれぞれ式(2)、(3)で表現されるものと仮定する。

$$T_{a,n}^c \sim N(E[T_{a,n}^c], \text{var}[T_{a,n}^c]) \forall a \in A \quad (1)$$

$$E[T_{a,n}^c] = \frac{l_a}{v_{a,n}^f} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_{a,n}}{c_{a,n}} \right)^\beta \right\} \forall a \in A \quad (2)$$

$$\text{var}[T_{a,n}^c] = (cv_a \cdot E[T_{a,n}^c])^2 \forall a \in A \quad (3)$$

ここでリンク a の自由走行速度および交通容量は、それぞれ式(4)、(5)に示す関係を満たすものとする。

$$\frac{\partial v_{a,n}^f}{\partial n} \leq 0, v_{a,n}^f \geq 0 \forall a \in A \quad (4)$$

$$\frac{\partial c_{a,n}}{\partial n} \leq 0, c_{a,n} \geq 0 \forall a \in A \quad (5)$$

一方、リンク a が降雨により通行止めになった場合を考え、通行止めが解除されるまでの確率的時間を式(6)に示す正規分布で表現する。

$$T_a^d \sim N(E[T_a^d], \text{var}[T_a^d]) \forall a \in A \quad (6)$$

次に、以上で述べた2つの状態の移動時間の確率分布を1つの混合分布で表現することにより、 n 年降雨時のリンク移動時間を考えることにする。ここでは、リンクが通行止めとなった場合、ドライバーは通行止めが解除されるまで待つと仮定し、その待ち時間を移動時間として扱う。 n 年降雨の発生確率 p_n 、および n 年降雨が発生した場合にリンクが通行止めとなる確率 $p_{a,n}^d$ は、それぞれ式(7)、式(8)で表現する。

$$p_n = \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} = \frac{1}{n \cdot (n+1)} \quad (7)$$

$$p_{a,n}^d = \frac{1}{1 + \exp(\gamma_{0,a} + \gamma_1 \cdot n)} \forall a \in A \quad (8)$$

この場合、 n 年降雨が発生した場合のリンクが途絶している状態を考慮したリンク移動時間は式(9)で与えられる。

$$T_{a,n} \sim GMD(T_{a,n}^c, T_a^d, p_{a,n}^c, p_{a,n}^d) \forall a \in A \quad (9)$$

where

$$p_{a,n}^c = 1 - p_{a,n}^d \forall a \in A \quad (10)$$

式(7)は1年間で最大雨量を観測した日を対象とした確率を示している。式(8)のリンクが通行止めとなる確率はロジスティック曲線で表しており、 $\gamma_{0,a}$ 、 γ_1 をパラメータとし、 n によって変化すると仮定している。式(9)右辺は、正規分布に従う $T_{a,n}^c$ 、 T_a^d の混合率をそれぞれ $p_{a,n}^c$ 、 $p_{a,n}^d$ とした混合分布³⁾を表している。 $T_{a,n}$ の平均、分散はそれぞれ式(11)、(12)で与えられる。

$$E[T_{a,n}] = p_{a,n}^c \cdot E[T_{a,n}^c] + p_{a,n}^d \cdot E[T_a^d] \forall a \in A \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{var}[T_{a,n}] = & p_{a,n}^c \cdot \left((\text{var}[T_{a,n}^c])^2 + (E[T_{a,n}^c])^2 \right) \\ & + p_{a,n}^d \cdot \left((\text{var}[T_a^d])^2 + (E[T_a^d])^2 \right) - (E[T_{a,n}])^2 \end{aligned} \quad (12)$$

n が1から ∞ までとる降雨の発生確率を考慮したリンク a の確率的移動時間は、式(13)で表され、その平均、分散はそれぞれ式(14)、(15)で与えられる。

$$T_a \sim MD(T_{a,1}^c, \dots, T_{a,\infty}^c, p_1, \dots, p_\infty) \forall a \in A \quad (13)$$

$$E[T_a] = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \cdot E[T_{a,n}] \forall a \in A \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{var}[T_a] = & \sum_{n=1}^{\infty} p_n \cdot \left(p_{a,n}^c \cdot \left((\text{var}[T_{a,n}^c])^2 + (E[T_{a,n}^c])^2 \right) \right. \\ & \left. + p_{a,n}^d \cdot \left((\text{var}[T_a^d])^2 + (E[T_a^d])^2 \right) \right) \\ & - (E[T_a])^2 \end{aligned} \quad (15)$$

数値計算的に ∞ を n_{\max} と置くと、式(11)–(15)に示した n 年降雨の発生確率を考慮したリンク a の確率的移動時間は、式(17)に示す確率的移動時間と式(18)に示す混合率を用いて式(16)に示すガウス混合分布として表現される。

$$T_a = \sum_{n=1}^{n_{\max}+1} p_{a,n}^{cd} \cdot T_{a,n} \forall a \in A \quad (16)$$

where

$$T_{a,n} = \begin{cases} T_{a,n}^c & \text{for } n = 1, \dots, n_{\max} \\ T_a^d & \text{for } n = n_{\max} + 1 \end{cases} \forall a \in A \quad (17)$$

$$p_{a,n}^{cd} = \begin{cases} p_n \cdot p_{a,n}^c & \text{for } n = 1, \dots, n_{\max} \\ \sum_{n=1}^{n_{\max}} p_n \cdot p_{a,n}^d & \text{for } n = n_{\max} + 1 \end{cases} \forall a \in A \quad (18)$$

以上より、年最大降雨の発生確率と、その被害により道路が途絶する確率を考慮したあるリンク a の平均移動時間と移動時間の分散を定式化する。

3. リスク回避的なドライバーの経路選択行動

前節でリンクの平均移動時間、移動時間の分散は求め

られた。移動時間に関して完全情報下であってもリスク回避的なドライバーはランダムに生起する移動時間を予測することは不可能なため、移動時間の不確実性が高い経路を回避する行動をとると考えられる。

本節ではそのようなドライバーの経路選択行動を定式化する。ドライバーの経路選択行動をその経路がそれぞれ持つ経路評価値に従うが、経路評価値を考えるうえでリンク a の平均移動時間と移動時間の分散のみならず経路を構成するリンクの共分散を求める必要がある。リンク a, b の共分散 $\text{cov}[T_a, T_b]$ は、式(19)のように表される⁴⁾。

$$\begin{aligned} & \text{cov}[T_a, T_b] \\ &= r_{ab} \cdot \left(\sum_{n_a=1}^{n_{\max}+1} \sum_{n_b=1}^{n_{\max}+1} P_{a,n_a}^{cd} \cdot P_{a,n_b}^{cd} \cdot \left(\frac{\sqrt{\text{var}[T_{a,n_a}]} \cdot \sqrt{\text{var}[T_{b,n_b}]}}{\sqrt{\text{var}[T_{a,n_a}] \cdot \text{var}[T_{b,n_b}]}} \right) \right) \\ &+ \sum_{n_a=1}^{n_{\max}+1} \sum_{n_b=1}^{n_{\max}+1} P_{a,n_a}^{cd} \cdot P_{a,n_b}^{cd} \cdot \left((E[T_{a,n_a}] - E[T_a]) \cdot (E[T_{b,n_b}] - E[T_b]) \right) \end{aligned} \quad (19)$$

ここで r_{ab} は2つのリンク移動時間の相関係数であるが、本研究では式(20)で定義する。

$$r_{ab} = v_{ab}^2 / (v_a \cdot v_b) \quad (20)$$

where

$$v_{ab} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \delta_{ij}^a \cdot \delta_{ij}^b \cdot f_{ij} \quad (21)$$

$$v_a = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \delta_{ij}^a \cdot f_{ij} \quad (22)$$

式(20)で表される相関係数はリンク a, b 両方を通る交通量の2乗値をリンク a, b それぞれの交通量で割ったものであることを示している。

以上のリンクの平均移動時間、移動時間の分散、共分散を用いて、経路 j の評価値は式(23)で定義する。

$$\begin{aligned} c_{ij} &= \sum_{a \in A} \delta_{ij}^a \cdot E[T_a] \\ &+ \alpha \sum_{a \in A} \left(\delta_{aj} \cdot \text{var}[T_a] + 2 \sum_{b \neq a} \text{cov}[T_a, T_b] \right) \forall i \in I, j \in J_i \end{aligned} \quad (23)$$

α はパラメータを表している。ここで、ロジット型の選択率を仮定すると、非負のパラメータ θ (本研究では1と仮定)を用いて経路選択確率は式(24)で与えられる。

$$p_{ij}(\mathbf{f}) = \frac{\exp(-\theta \cdot c_{ij})}{\sum_{j \in J} \exp(-\theta \cdot c_{ij})} \forall i \in I, j \in J_i \quad (24)$$

式(24)において、 \mathbf{f} は経路フローベクトルを示しており、経路選択確率は経路フローベクトルの関数となることを示している。確率的利用者均衡は式(25)に示す不動点問題として定式化可能である。

$$f_{ij} = p_{ij}(\mathbf{f}) \cdot q_i \forall i \in I, j \in J_i \quad (25)$$

4. 数値計算

(1) 概要

ここでは以上に示したモデルの数値シミュレーションを行う。この検証では図1に示すように1つのO-Dペアに3つの経路が存在するテストネットワークを対象にする。テストネットワークには4本のリンクがあり、経路をリンク番号で表現すると、経路1:1→2、経路2:1→3、経路3:4となる。このテストネットワーク上で n 年降雨と道路に及ぼす影響を考慮に入れたドライバーの経路選択行動の数値計算を行う。なお、OD交通量は150 (pcu/h)とし、雨による水害で道路が通行止めとなった時のドライバーの待ち時間はリンクによらず $E[T_a^d]=10h$ とし、 $\text{var}[T_a^d]=1$ とした。

また、計算を行うにあたり設定したパラメータを表-1も合わせ、以下に紹介する。

式(2)中のパラメータは

$$v_{a,n}^f = \frac{50}{1 + \exp(0.1 \cdot n - 5)} + 10$$

$$c_{a,n} = \frac{w_a}{1 + \exp(0.1 \cdot n - 5)} + w_a \forall a \in A$$

$$\alpha = 0.48, \beta = 2.82$$

式(3)中のパラメータは、

$$cv_a = 0.3 \forall a \in A$$

式(8)中のパラメータは、

$$\gamma_1 = 0.1$$

式(23)中のパラメータは、

$$\alpha = 0.8$$

表-1 リンク a の設定値

	Link	1	2	3	4
式(1)	l_a	7	5	3	5
	w_a	1000	500	500	700
式(8)	γ_{0a}	5	6	4	5

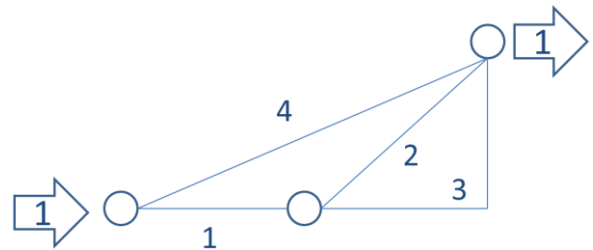


図-1 テストネットワーク

(2) 結果

数値シミュレーションを行った結果を以下の表-2,3に示す。表-2はリンクの移動時間の平均と分散を表しており、表-3はその移動時間をもとに計算された経路の評価値とフローの結果である。

以上より n 年降雨の発生確率と道路の途絶の要素を考慮した経路選択行動を決定するモデル、つまり年最大降雨発生時の経路選択行動をモデル化することができた。

表-2 リンク a の平均移動時間・分散

Link	1	2	3	4
$E[T_d] (h)$	0.3285	0.2003	0.4644	0.2957
$var[T_d]$	2.0663	1.152	3.9944	2.0799

表-3 経路評価値、経路フロー

OD	1		
Route	1→2	1→3	4
c_{ij}	0.6897	1.0959	0.3997
$f_{ij}(pcu/h)$	49.958	33.28	66.763

5. 今後の課題と展望

本研究では n 年降雨発生時に、水害が道路、または道路を利用するドライバーに与える影響を移動時間の要素として組み込んだ交通解析モデルを構築した。混合分布の概念を利用することによって、道路の2つの状態とそれぞれの状態の移動時間に関する不確実性を考慮することができた。

しかしながら同時にこの研究はまだ改善の余地が残されているとも認識している。例えばこのモデルの定式化には多くのパラメータが用いられているが、水害時には通常の状態とは違った値になることが予想される。より精度の高いモデルにするためにも過去の統計から n 年降雨と被害の関連などの検証も行う必要がある。

参考文献

- 1) Sumalee, A., Uchida, K. and Lam, W. H. K., Stochastic multi-modal transport network under demand uncertainties and adverse weather condition, *Transportation Research Part C*, Vo. 19, pp. 338-350 (2011)
- 2) Uchida, K., Estimating the value of travel time and of travel time reliability in road networks, *Transportation Research Part B*, forthcoming, DOI: 10.1016/j.trb.2014.01.002
- 3) Lidija, T and Lucy, Y, Pao, Variance Estimation and Ranking of Gaussian Mixture Distributions in Target Tracking Applications, *Decision and Control, 2002, Proceedings of the 41st IEEE Conference on (Volume 2)*, DOI:10.1109/CDC.2002.1184857
- 4) Jin, W, Generating daily changes in market variables using a multivariate mixture of normal distribution, *WSC'01 Proceedings of the 33rd conference on winter simulation*, pp.283-289

A Model of Traffic Assignment Considering Travel Time Reliability in a case of the Flood

Kosuke Kato, Kenetsu Uchida

Focusing on an influence of flood including inundation to road network, the flood causes decline of travel time and travel time reliability in the network. In addition, when a road is flooded, a car cannot pass through it. In this study, by considering uncertainty of the travel time and recovery time of road, a model of traffic assignment considering the effect of flood on the driver's route choice behavior was developed.