

局所的豪雨による水害時の移動時間信頼性を考慮した 河川構造物の最適改修計画

A study on an optimal update plan of river structure considering travel time reliability in a case of flood

北海道大学大学院 ○学生員 加藤宏祐 (Kosuke Kato)
北海道大学大学院 学生員 加藤哲平 (Teppei Kato)
北海道大学大学院 正会員 木村一郎 (Ichiro Kimura)
北海道大学大学院 正会員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

1. はじめに

近年、局所的な豪雨による水災害が頻発している。水災害による道路の冠水や破壊により、道路が一時的に途絶されてしまう場合が発生、途絶に至らない程度の豪雨でもドライバーの交通行動や道路の路面状況に影響を与える。このように道路ネットワークに影響を与える豪雨は確率的事象であるため、道路の状況を確率的に変化させ、移動時間の不確実性をもたらす¹⁾。移動時間の不確実性は、人々の移動や物流に影響を与え得るため、災害に強いネットワークが求められる。これに対し、水災害による被害を軽減し、災害発生時でも道路機能を正常に保つために河川の改修工事を行う必要があるが、限られた財源の中での工事を行う際には効率的な改修計画の立案が求められる。

本稿では、降雨被害リスクを抱える道路ネットワークを対象とする改修費用最適配分決定モデルを提案する。モデルの定式化に際して、河川改修がネットワーク上のドライバーの経路選択行動に与える影響を明らかにする必要がある。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した問題を考え、確率的移動時間を考慮した均衡配分モデルを構築する。ある強度を有する降雨の発生確率と、降雨発生時の移動時間の確率的変動を考慮し、リンクの確率的移動時間をガウス混合分布²⁾によって表現する。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つの状態を考慮できる。また、河川の改修は降雨がネットワーク中の道路に与える影響を変化させるものとし、河川改修の規模に対応した確率的移動時間を想定する。以上のような方法で表した確率的移動時間を用いて経路移動時間の平均と分散を推計し、それらで表される各経路の移動時間費用を指標とした確率的利用者均衡配分モデルを定式化する。改修費用最適配分決定モデルは、河川の改修費用とドライバーの移動時間費用の和で表現される総費用を最小にする改修費用配分を決定する。つまり、このモデルは確率的利用者均衡問題を制約条件とした均衡制約付き総費用最小化問題として定式化される。

本稿の構成を以下に示す。2,3章で交通量を所与とした総費用最小化問題と、改修費用を所与とした確率的利用者均衡問題の定式化をそれぞれ行う。4章では感度分

析に基づく解法を示し、5章でまとめを行う。

2. 総費用最小化問題の定式化

(1) 記号

本稿で使用する主な記号を以下に示す。

A	リンクの集合
S	改修箇所s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_j^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0を取る変数
y_s	改修箇所 <i>s</i> への改修費用
v_{a,y_s}	改修箇所 ($s \in S$) に y_s の改修を行った場合のリンク <i>a</i> の確率的交通量
l_a	リンク <i>a</i> の延長
c_{a,n,y_s}	改修箇所 ($s \in S$) に y_s の改修を行った場合に、 <i>n</i> 年確率降雨が発生したときのリンク <i>a</i> の交通容量
v_{a,n,y_s}^f	改修箇所 ($s \in S$) に y_s の改修を行った場合に、 <i>n</i> 年確率降雨が発生したときのリンク <i>a</i> の自由走行速度
$T_{a,n,y_s}^c(v_{a,y_s})$	改修箇所 ($s \in S$) に y_s の改修を行った場合に、 <i>n</i> 年確率降雨が発生したとき、リンク <i>a</i> の通行可能時確率的移動時間
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> が通行止めとなる場合の確率的移動時間
x_n	<i>n</i> 年降雨の発生確率
p_{a,n,y_s}^d	改修箇所 ($s \in S$) に y_s の改修を行った場合に、 <i>n</i> 年確率降雨が発生したとき、リンク <i>a</i> が通行止めとなる確率
$T_{a,y_s}(v_{a,y_s})$	改修箇所 ($s \in S$) に y_s の改修を行った場合のリンク <i>a</i> の確率的移動時間
c_{ij,y_s}	O-Dペア <i>i</i> の経路 <i>j</i> の一般化費用
p_{ij,y_s}	ドライバーがO-Dペア <i>i</i> の経路 <i>j</i> を選択する確率
r_{a,b,y_s}	リンク <i>a</i> と <i>b</i> の移動時間に関する相関係数
q_i	O-Dペア <i>i</i> の確率的交通量

f_{j,y_s}	O-Dペア <i>i</i> の経路 <i>j</i> の確率的交通量
τ	時間価値 (円/分)
G	改修の予算

(2) 最適改修計画

まず、 n 年に一度発生する規模の降雨を n 年降雨とする。 n 年降雨の発生確率は1年間で最大雨量を計測した日を対象とした確率を表しており、以下の式で表される。

$$x_n = \frac{1}{n(n+1)} \quad (1)$$

次に、河川構造物の改修が道路ネットワークに与える影響を考える。 n 年降雨が発生した際、道路の交通容量、自由走行速度、途絶確率が変化すると想定する。河川構造物の改修はこれらの影響を緩和するものである。したがって、降雨による被害のリスクを抱える道路ネットワーク上において、交通容量、自由走行速度、途絶確率は以下の関係を満たす。改修費用と緩和の関連についての定量的な評価は、降雨に対する氾濫シミュレーション技術により行う事ができると考える。本稿の範囲を超えるため、ここでは特に議論しない。

$$\frac{\partial v_{a,n,y_s}^f}{\partial n} \leq 0, \frac{\partial v_{a,n,y_s}^f}{\partial y_s} \geq 0, \quad v_{a,n,y}^f \geq 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial c_{a,n,y_s}}{\partial n} \leq 0, \frac{\partial c_{a,n,y_s}}{\partial y_s} \geq 0, \quad C_{a,n,y} \geq 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_{a,n,y_s}^d}{\partial n} \geq 0, \frac{\partial p_{a,n,y_s}^d}{\partial y_s} \leq 0, \quad 0 \leq p_{a,n,y_s}^d \leq 1 \quad (4)$$

次に河川の改修箇所*s*に対し、改修費用 y_s で表される規模の改修を行った後に、 n 年降雨が発生した時のリンク移動時間を考える。ここで、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る。 n 年降雨発生時において、リンク*a*が通行可能である場合の確率的移動時間は以下のような正規分布に従うものと仮定する。

$$T_{a,n,y_s}^c(v_{a,y_s}) \sim N(E[T_{a,n,y_s}^c(v_{a,y_s})], \text{var}[T_{a,n,y_s}^c(v_{a,y_s})]) \quad (5)$$

where

$$E[T_{a,n,y_s}^c(v_{a,y_s})] = \frac{l_a}{v_{a,n,y_s}^f} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{v_{a,y_s}}{c_{a,n,y_s}} \right)^\beta \right\} \quad (6)$$

$$\text{var}[T_{a,n,y_s}^c(v_{a,y_s})] = (c v_a \cdot E[T_{a,n,y_s}^c(v_{a,y_s})])^2 \quad (7)$$

式(6)-(7)で示されるように、リンク移動時間の平均はBPR関数で与え、分散はその平均に変動係数を乗じたもので与える。ここで、 α 、 β はBPR関数のパラメータを表す。このように、リンク*a*の確率的移動時間は y_s をパラメータとするリンク交通量 v_{a,y_s} の関数として表される。次に、リンク*a*が降雨により通行止めになった場合を考える。この時、通行止めが解除されるまでの確率的時間を想定し、式(8)に示す正規分布で表現する。この確率分布は降雨や改修費用に影響を受けないものと仮定する。

$$T_a^d \sim N(E[T_a^d], \text{var}[T_a^d]) \quad (8)$$

以上で述べた2つの状態における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 年降雨発生時のリンク移動時間を考える。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。この場合、 n 年降雨発生時におけるリンクの確率的移動時間は式(9)で与えられる。

$$T_{a,n,y_s}(v_{a,y_s}) \sim GMD(T_{a,n,y_s}^c(v_{a,y_s}), T_a^d, p_{a,n,y_s}^c, p_{a,n,y_s}^d) \quad (9)$$

where

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

式(9)の右辺は正規分布に従う移動時間の混合率をそれぞれの状態の生起確率とした混合分布を表す。

$T_{a,n,y_s}(v_{a,y_s})$ の平均、分散は式(11)-(12)で計算される。

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

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

全ての n 年降雨に対して、そ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。

$$T_{a,y_s}(v_{a,y_s}) \sim MD(T_{a,1,y_s}(v_{a,y_s}), \dots, T_{a,\infty,y_s}(v_{a,y_s}), x_1, \dots, x_\infty) \quad (13)$$

where

$$E[T_{a,y_s}(v_{a,y_s})] = \sum_{n=1}^{\infty} x_n \cdot E[T_{a,n,y_s}(v_{a,y_s})] \quad (14)$$

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

数値計算的に ∞ を $n_{\max}$ と置くと、式(9)-(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。

$$T_{a,y_s}(v_{a,y_s}) = \sum_{n=1}^{n_{\max}+1} p_{a,n,y_s}^{cd} \cdot T_{a,n,y_s}(v_{a,y_s}) \quad (16)$$

where

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

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

以上で、 n 年降雨による移動時間の確率変動と、その被害により道路が途絶する確率を考慮したリンク*a*の確率的移動時間が求められた。ここでは改修費用を所与としている点に注意が必要である。本稿ではこの移動時間から与えられるドライバーの移動時間費用と改修費用から

成る総費用を最小化する河川構造物の改修費用配分を求める。改修費用配分問題は以下に示す最小化問題で定式化される。

$$\min Z_{y_s} = \tau \cdot E[T_{a,y_s}(v_{a,y_s})] \cdot v_{a,y_s} + \sum_s y_s \quad (19)$$

where

$$y_s \geq 0 \quad (20)$$

$$\sum_s y_s \leq G \quad (21)$$

式(19)に示される目的関数は、OD ペア内の全てのドライバーの移動時間費用と、河川改修費用の和で表される総費用である。これを式(21)に示される総改修費用の制約下で最小化する問題となっている。また、式中の v_{a,y_s} はリンク交通量を表し、次節で定式化されるロジット型確率的利用者均衡問題で与えられる。

3. リスク回避的なドライバーの経路選択の定式化

移動時間に関して完全情報下であってもドライバーが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、リスク回避的なドライバーは移動時間の不確実性が高い経路を回避する行動をとる。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は、経路の移動時間の平均と分散に基づくものと仮定する。一般的に経路の平均移動時間は、経路を構成するリンクの平均移動時間の和で表すことが出来る。それに対し経路の移動時間の分散は、経路を構成するリンクの移動時間の分散と共分散によって表される。前章で述べた通り、正規分布に従うリンク移動時間を仮定しているため、任意のリンク a, b の共分散 $\text{cov}[T_a, T_b]$ は、式(22)のように表される³⁾。

$$\begin{aligned} \text{cov}[T_{a,y_s}, T_{b,y_s}] &= r_{ab,y_s} \cdot \left(\sum_{n_a=1}^{\eta_{\max}+1} \sum_{n_b=1}^{\eta_{\max}+1} p_{a,n_a,y_s}^{cd} \cdot p_{a,n_b,y_s}^{cd} \cdot \left(\sqrt{\text{var}[T_{a,n_a}]} \cdot \sqrt{\text{var}[T_{b,n_b}]} \right) \right) \\ &+ \sum_{n_a=1}^{\eta_{\max}+1} \sum_{n_b=1}^{\eta_{\max}+1} p_{a,n_a,y_s}^{cd} \cdot p_{a,n_b,y_s}^{cd} \cdot \left((E[T_{a,n_a}] - E[T_a]) \cdot (E[T_{b,n_b}] - E[T_b]) \right) \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、 r_{ab} は2つのリンク移動時間の相関係数を表し、式(19)で定義する。

$$r_{ab,y_s} = v_{ab,y_s}^2 / (v_{a,y_s} \cdot v_{b,y_s}) \quad (23)$$

where

$$v_{ab,y_s} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \delta_{ij}^a \cdot \delta_{ij}^b \cdot f_{ij,y_s} \quad (24)$$

$$v_{a,y_s} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \delta_{ij}^a \cdot f_{ij,y_s} \quad (25)$$

式(14)-(15),(22)で与えられたリンクの移動時間の平均、分散、共分散を用いて、経路 j の一般化費用は式(26)で定義する。

$$\begin{aligned} c_{ij}(\mathbf{f}_y, \mathbf{y}) &= \sum_{a \in A} \delta_{ij}^a \cdot E[T_{a,y_s}] \\ &+ r \sum_{a \in A} \left(\delta_{aj} \cdot \text{var}[T_{a,y_s}] + 2 \sum_{b \neq a} \text{cov}[T_{a,y_s}, T_{b,y_s}] \right) \end{aligned} \quad (26)$$

where

$$\mathbf{f}_y = (f_{i1,y}, \dots, f_{i|J|,y})^T, \mathbf{y} = (y_1, \dots, y_{|J|})^T \quad (27)$$

r はドライバーのリスク回避度を表す非負のパラメータである。式(26)の右辺第 1, 2 項はそれぞれ、経路移動時間の平均と分散を表す。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 を用いて経路選択確率は式(28)で与えられる。

$$p_{ij,y_s}(\mathbf{f}_y, \mathbf{y}) = \frac{\exp(-\theta \cdot c_{ij,y_s})}{\sum_{j \in J} \exp(-\theta \cdot c_{ij,y_s})} \quad (28)$$

ここで、経路評価値と経路選択確率は、経路フローベクトルと改修費用ベクトルの関数になっていることに注意したい。

確率的利用者均衡問題は以下の不動点問題で定式化される。

$$\mathbf{f}_{i,y} = \mathbf{p}_{i,y}(\mathbf{c}_{i,y}(\mathbf{f}_y, \mathbf{y})) \cdot \mathbf{q}_i \quad (29)$$

where

$$\mathbf{p}_{i,y} = (p_{i1,y_s}, \dots, p_{i|J|,y})^T, \mathbf{c}_{i,y} = (c_{i1,y_s}, \dots, c_{i|J|,y})^T \quad (30)$$

4. 解法

(1)感度分析

最適改修費用配分問題は、確率的利用者均衡問題 (第 3 章)の均衡条件を制約に持った総費用最小化問題(第 2 章)で表現される。このような均衡制約付きの最適化問題に対して、ロジット型確率的利用者均衡の感度分析法に基づく解法を示す。任意の改修費用ベクトルを $\mathbf{y}$ とし、それを所与として得られる均衡フローベクトルを $\mathbf{v}^*(\mathbf{y})$ とする。このとき、以下の関係が成立する。

$$\mathbf{v}^*(\mathbf{y}) - \mathbf{p}(\mathbf{c}(\mathbf{v}^*(\mathbf{y}), \mathbf{y})) \mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (31)$$

where

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= (y_1, \dots, y_{|J|})^T, \mathbf{c} = (c_{1,y}, \dots, c_{|I|,y})^T \\ \mathbf{q} &= (q_1, \dots, q_{|I|})^T \end{aligned} \quad (32)$$

$$\mathbf{p}_i = \Delta_i \cdot \mathbf{P}_i \quad (33)$$

ここで $\mathbf{p}$ はリンク選択確率行列($A \times I$)である。 Δ_i と $\mathbf{P}_i$ はそれぞれ、リンク-経路インシデント行列、OD ペア i に関する経路選択比率を表す、ここで、以下のようなベクトル関数を考える。

$$\Psi(\mathbf{v}, \mathbf{y}) = \mathbf{v} - \mathbf{p}(\mathbf{c}(\mathbf{v}, \mathbf{y})) \mathbf{q} \quad (34)$$

この関数が $\mathbf{y}$ に関して微分可能と仮定する。この時、 $(\mathbf{v}, \mathbf{y}) = (\mathbf{v}^*(\mathbf{y}_0), \mathbf{y}_0)$ の近傍における 1 次のテーラー展開は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \Psi(\mathbf{v}, \mathbf{y}) &\approx \Psi(\mathbf{v}^*(\mathbf{y}_0), \mathbf{y}_0) + \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{v}} \Big|_{(\mathbf{v}^*(\mathbf{y}_0), \mathbf{y}_0)} (\mathbf{v} - \mathbf{v}^*(\mathbf{y}_0)) \\ &+ \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{y}} \Big|_{(\mathbf{v}^*(\mathbf{y}_0), \mathbf{y}_0)} (\mathbf{y} - \mathbf{y}_0) \end{aligned} \quad (35)$$

式(35)の 2 つの微分項はそれぞれ、 $(\mathbf{v}, \mathbf{y}) = (\mathbf{v}^*(\mathbf{y}_0), \mathbf{y}_0)$ で評価される $\mathbf{v}$ と $\mathbf{y}$ に関するヤコビアン行列を表し、以下で

はそれぞれ $\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2$ で表す。 $\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2$ は式(36)で表される。

($\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2$ の詳しい導出過程は Bell and Iida⁴⁾を参照されたい。)

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_1 &= \mathbf{I} - \sum_i q_i \cdot \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{c}(\mathbf{v}^*(\mathbf{y}), \mathbf{y})} \cdot \frac{\mathbf{c}(\mathbf{v}^*(\mathbf{y}), \mathbf{y})}{\partial \mathbf{v}(\mathbf{y})} \\ \mathbf{J}_2 &= - \sum_i q_i \cdot \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{c}(\mathbf{v}^*(\mathbf{y}), \mathbf{y})} \cdot \frac{\mathbf{c}(\mathbf{v}^*(\mathbf{y}), \mathbf{y})}{\partial \mathbf{y}} \end{aligned} \quad (36)$$

where

$$\Psi(\mathbf{v}^*(\mathbf{y})) = 0 \quad (37)$$

$$\mathbf{dv}/\mathbf{dy} = \frac{(\partial \Psi(\mathbf{v}^*(\mathbf{y}))/\partial \mathbf{y})}{(\partial \Psi(\mathbf{v}^*(\mathbf{y}))/\partial \mathbf{v})} \quad (38)$$

$\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2$ より $\mathbf{v}^*(\mathbf{y})$ は式(39)のように近似でき、均衡フローベクトル $\mathbf{v}^*(\mathbf{y})$ は式(40)に示す関係を満たす。

$$\mathbf{v}^*(\mathbf{y}) \approx \mathbf{V}^*(\mathbf{y}_0) - (\mathbf{J}_1)^{-1} \mathbf{J}_2 (\mathbf{y} - \mathbf{y}_0) \quad (39)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}^*}{\partial \mathbf{y}} \approx \frac{\mathbf{v}^*(\mathbf{y}) - \mathbf{v}^*(\mathbf{y}_0)}{\mathbf{y} - \mathbf{y}_0} = -(\mathbf{J}_1)^{-1} \mathbf{J}_2 \quad (40)$$

(2) アルゴリズム

前節で示された目的関数の勾配情報を用いて最適解を推計する。本稿では計算負荷を減少させるために式(19)で表される目的関数を直接解く方法ではなく、式(39)で表される補助問題を繰り返し計算することで最適解を探すアルゴリズムを取る。以下にそのアルゴリズムを示す。

Step 0

$k=0$ として $\mathbf{y}_k$ の初期実行可能解を設定する。

Step 1

$\mathbf{y}_k$ に基づきロジット型確率的利用者均衡問題を解き、 $\mathbf{v}^*(\mathbf{y}_k)$ を求める。この問題は逐次平均化法⁵⁾によって解くことが可能である。

Step 2

現在の均衡フローと改修費用ベクトルを所与として、式(36)を用いてヤコビアン行列 $\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2$ を求める。得られた $\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2$ を用いて式(39)からリンクフローベクトルの近似ベクトルを求める。

Step 3

近似ベクトルを式(19)-(21)に代入して補助問題を解いて得られた解を $\mathbf{y}_{k+1}$ とする。ここでは SQP (逐次二次計画法) などの非線形最適化問題のアルゴリズムを適用する⁵⁾。ただし、ここでは $\mathbf{v}^*(\mathbf{y}_k)$ の非負条件が加わる。

Step 4

$\max_k |\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_{k+1}| \leq \lambda$ が満たされたら終了。 λ は収束半径を示す微小な値を取る正の定数である。条件を満たさない場合は Step1 へ。

5. おわりに

(1) 数値実験

2-4 章で示した改修費用最適配分決定モデルを検証す

るためにテストネットワークを用いて数値実験を行う。テストネットワークでは河川沿いに立地するような降雨被害リスクを抱えている道路ネットワークを想定する。計算結果は当日に発表する。

(2) まとめ

本研究では降雨被害リスクを抱えている道路ネットワークを対象に改修費用最適配分決定モデルを提案した。モデル化においては降雨確率と降雨時の移動時間の信頼性を考慮し、ロジット型確率的利用者均衡によって得られるリンク交通量を制約として総費用の最小化問題の定式化を行った。モデル化においては仮定の下で多くのパラメータを用いており、このモデルを実問題に適用させる際にはその推計は避けられない、と考えられる。この課題は降雨量のドライバーの移動時間信頼性への影響や、その影響の緩和と改修量との関連を明らかにすることで対応可能であり、本研究の今後の指針であると捉えている。

6. 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) Lidiya, 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
- 3) 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
- 4) Bell, M., and Y. Iida. *Transportation Network Analysis*. John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom, 1997.
- 5) Connors, R. D., Sumalee, A., and Watling, D. P. Variable demand probit-based network design problem: Implicit programming approach: *10th world conference on transport research* (CD-ROM), 2004