

大阪大学大学院工学研究科 学生員 ○福田 泰樹  
 非会員 韓 大錫  
 正会員 貝戸 清之  
 正会員 吉田 幸信

## 1. はじめに

道路巡回の目的の1つは、道路利用者の安全に支障をきたす可能性があるポットホールの発生を未然に防止することである。ポットホールの発生に関しては、晴天時に比べ、降雨後に多発することが経験的に知られている（暗黙知）。効率的な道路巡回間隔を決定するためには、ポットホール発生に関するこのような特性を分析し、発生頻度の相違を形式知化していくことが重要である。

そこで本研究では、高速道路の舗装のポットホールに着目し、マルコフスイッチングポアソンモデルを定式化するとともに、適用事例を通してポットホール発生と降雨量の関係を把握する。

## 2. マルコフスイッチングポアソン発生モデル

いま、ある道路区間に関して分析期間  $T$  を設定し分析を行う。さらに分析期間  $T$  内の局所時点  $t$  ( $t=1, \dots, T$ ) を設定する。同区間では局所時点毎（ここでは1日）に数回道路巡回が実施され、 $t$  ( $t=1, \dots, T$ ) 時点のポットホール発生数  $n_t$  が記録されている。このとき局所時点  $t$  においてポットホールが  $n_t$  個発生する確率はポアソン発生モデルを用いて、

$$Po(n(t) = n_t | \lambda) = \frac{\lambda^{n_t}}{n_t!} \exp(-\lambda) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで  $\lambda$  はポットホール発生の到着率を示す。さらに、到着率は構造条件、環境条件を表す特性変数ベクトル  $\mathbf{x}$  と未知パラメータベクトル  $\boldsymbol{\beta}$  を用いて、

$$\lambda = \exp(\mathbf{x}\boldsymbol{\beta}) \quad (2)$$

と定義する。このとき、ポットホールの発生確率が降雨後とそれ以外で異なることを考慮するために、ポットホール発生に対して低確率状態、高確率状態の2つの到着率  $\lambda(t) (= \lambda_{low} \text{ or } \lambda_{high})$  を考える。以上の2種類の到着率を同時考慮する到着率  $\lambda(t)$  は

$$\lambda(t) = (1 - S_t)\lambda_{low} + S_t\lambda_{high} \quad (3)$$

として定義できる。ここで  $S_t$  ( $t=1, \dots, T$ ) は 0 か 1 の値をとる確率変数であり、期毎にマルコフ過程に従い変化するものとする。またその推移確率は

$$\Pr[S_t = j | S_{t-1} = i] = \begin{bmatrix} p & 1-p \\ 1-q & q \end{bmatrix} \quad (4)$$

とする。したがって  $S_t=0$  のとき低確率状態  $\lambda(t) = \lambda_{low}$ 、 $S_t=1$  のとき高確率状態  $\lambda(t) = \lambda_{high}$  というようにマルコフ過程に従い変化する。またパラメータの識別性を保つため、 $\lambda_{low} < \lambda_{high}$  と仮定する。以上により  $S_t$  を既知としたときのマルコフスイッチングポアソンモデルの対数尤度は

$$\begin{aligned} & \ln L(\boldsymbol{\beta}_{low}, \boldsymbol{\beta}_{high} | \bar{S}_t) \\ & = \sum_{t=1}^T [n_t \ln\{(1 - S_t)\lambda_{low} + S_t\lambda_{high}\} - \ln n_t! - \{(1 - S_t)\lambda_{low} + S_t\lambda_{high}\}] \end{aligned} \quad (5)$$

と表せる。ここで  $\boldsymbol{\beta}_{low}, \boldsymbol{\beta}_{high}$  は、 $\lambda_{low}, \lambda_{high}$  のそれぞれの到着率を表す未知パラメータベクトルである。しかし、 $S_t$  ( $t=1, \dots, T$ ) に関しては直接観測できない変数（潜在変数）である。そこで本研究ではマルチームーバサンプラーを用いた MCMC 法により  $S_t$  とその推移確率  $p, q$ 、未知パラメータベクトル  $\boldsymbol{\beta}_{low}, \boldsymbol{\beta}_{high}$  のサンプリングを行う。

## 3. 適用事例

マルコフスイッチングポアソンモデルを西日本高速道路株式会社が管理するポットホール目視点検データに適用する。表-1 に適用事例を示す。適用した道路区間の総延長は 19.01km であり、ポットホールの観測データは 2007 年 8 月 1 日から 2011 年 10 月 1 日まで存在する。すなわち分析に用いた期間は 1,522 日である。1. で述べたように、ポットホールの発生過程には水分の量が影響する。ここでは1つの目視点検データに対して、過去3日間の累

表-1 目視点検データの概要

適用区間(km)	19.01		
観測期間	2007/8/1~2011/10/1		
3日間降水量(Rf <sub>3</sub> )	Rf <sub>3</sub> =0	Rf <sub>3</sub> >0	総数
日数(日)	534	988	1,522
ポットホール発生数(個)	16	208	224
平均ポットホール発生数(個/日)	0.03	0.21	0.15

表-2 パラメータ推計結果

	定数項	定数項	降水量	推移確率	
	$\beta_{low}$	$\beta_{high}$		$p$	$q$
推計値	-5.325	0.161	1.682	0.934	0.330
下限5%	-6.222	-0.098	1.107	0.918	0.243
上限5%	-4.548	0.403	2.287	0.949	0.425
geweke検定量	-0.081	0.041	-0.063	-0.002	0.041

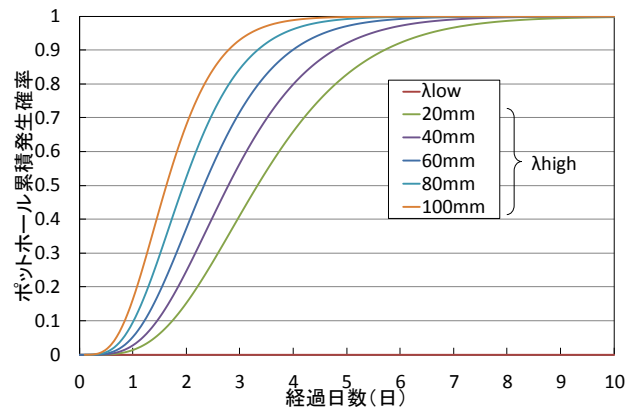


図-1 ポットホール累積発生確率 (発生数5個)

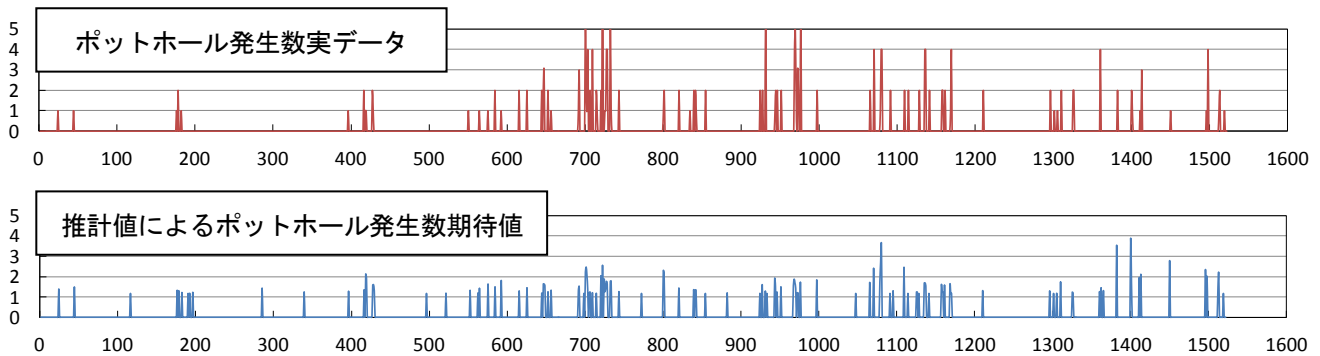


図-2 ポットホール発生数に関する実データと期待値の比較

積降水量  $Rf_3$  を算出し分析を行った. 分析期間 1,522 日のうち  $Rf_3=0$  となる日数は 534 日, また  $Rf_3>0$  となる日数は 988 日であり, さらにポットホール発生数の総数 224 個のうち 208 個が  $Rf_3>0$  となる日に発生していることが分かる. また, 平均ポットホール発生数を比較しても  $Rf_3>0$  の場合が約 7 倍と高頻度で発生している. 以上のことからポットホールの発生には水分の影響が大きいと考えられる. 以上の一次分析を踏まえ, 目視点検データよりマルコフスイッチングポアソンモデルの未知パラメータ  $\beta_{low}, \beta_{high}$ , 潜在変数  $S_i$  とその推移確率  $p, q$  を MCMC 法により推計した. 表-2 に推計結果を示すが,  $\beta_{high}$  では降水量のパラメータが正の値をとっており, 降水量が増加するほどポットホールの発生確率は増加する. さらに推移確率は  $p=0.934, q=0.330$  となっており, ポットホールの発生は  $S_i=0$ , つまり低確率状態に留まることが多いと考えられる. 図-1 には,  $\lambda_{low}, \lambda_{high}$  それぞれの場合で発生数を 5 個とした時のポットホール累積発生確率を示す.  $\lambda_{low}$  ではポットホールが 5 個発生する確率は極めて低いが,  $\lambda_{high}$  では降水量の増加とともに

に発生確率は増加し, 4 日もたてばポットホールが 5 個発生する確率は 50% を超えることが分かる. さらに図-2 に横軸に観測時点をとり, 日ごとのポットホール発生数を示し, 実データと推計値の比較を行う. 赤色の棒グラフが実データ, 青色の棒グラフが推計値による期待値を示す. 図のようにポットホールの発生は時間に均一ではなく, ある期間に集中的に発生しているように読み取れるが, 青色の期待値に着目するとそれらに対しても発生過程を総合的に評価可能となることが理解できる.

#### 4. おわりに

本研究では, マルコフスイッチングポアソンモデルを定式化し, ポットホール発生過程を降雨量の観点から分析した. 今後の課題として, 適用範囲の拡大と最適巡回頻度等の設定などがあげられる.

#### 【参考文献】

- 1) 貝戸清之, 起塚亮輔, 伊藤哲男, 橋爪謙治, 出口宗浩: 床版かぶりコンクリートの剥離・剥落発生リスクと最適点検政策, 土木学会論文集 F4, Vol.68, No.1, pp.11-27, 2012.1
- 2) 里吉清隆: マルコフ・スイッチングを含む確率的ポラリティ変動モデル, ベイズ計量経済分析: pp.355-379, 2005