

# 道路巡回発見事象の相関構造分析による舗装補修戦略プロファイリングに関する研究

辻野 晴哉<sup>1</sup>・松島 格也<sup>2</sup>・小林 潔司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学 大学院工学研究科 都市社会学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: tsujino.seiya.77u@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学准教授 大学院工学研究科 都市社会学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: matsushima.kakuya.7u@kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 京都大学教授 経営管理研究部 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: kobayashi.kiyoshi.6n@kyoto-u.jp

高度経済成長期に建設された土木施設の老朽化・劣化は深刻であり、維持管理費用の削減をしつつ利用者の安全を確保するための効率的な土木施設の維持管理が求められている。道路舗装に関しては舗装点検要領の改訂により、路面性状調査が原則として廃止され代わりに目視点検と日常点検を義務付けられたが、本研究では、高頻度で行われている道路巡回業務から獲得できるデータを用いて路面性状の状態を判定し適切なマネジメント戦略を立案する舗装補修戦略プロファイリング方策を提案する。そのために、道路巡回業務において発見された事象の発生構造をベイジアンネットワーク分析により推定し、変状の依存関係に基づいてポットホールの発生および補修戦略立案を決定できる方法論を提案する。

**Key Words :** *pavement management, profiling, bayesian network analysis, road patrol*

## 1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された土木施設の老朽化や劣化が進行している。例えば、国土交通省が管理する橋長 2m 以上の道路橋 73 万橋に対して、建設後 50 年以上経過した橋梁は全体の約 25 %、15 年後には約 60 % を占める<sup>1)</sup>と予測されており、老朽化が始まっていると思われる土木施設が急速に増加しているため、今後補修を行う必要のある土木施設も増加すると予想される。つまり、今後は維持管理費用が急激に増加していくと考えられる。そのため、限られた予算のもとでライフサイクルコストを低減化する最適な維持管理戦略を求めることが重要視されつつある。特に、土木施設のライフサイクルコスト費用評価を実施するためには、経年的な点検結果を施設横断的に蓄積するとともに、これらのデータを用いて将来の土木施設の劣化予測をすることが必要となる。

平成 29 年 3 月 国管理版 道路舗装点検要領<sup>2)</sup>が改定され、これまで原則 3 年に 1 回の頻度で行われていた路面性状調査が規則として廃止された。その理由としては、路面性状調査から得られたデータが実際の道路舗装補修戦略の立案に繋がっていなかったことや、調査に要する費用が高額であったことが挙げられる。路面性状調査の廃止によって舗装のひび割れ率、わだち掘れ量や平坦性の値を定期的に得られなくなり、そ

れらの値を用いて計算されていた、舗装の維持修繕の要否を判断する維持管理指数である MCI<sup>3)</sup>(維持管理指数)を定期的に獲得することが困難となっている。

さらに、5 年に 1 回程度以上の頻度を目安として舗装に関する目視点検を義務化されるようになったが、結果が十分蓄積しておらず、精度の検証も不十分である。一方、道路の保全を目的として、道路の異状や損傷等の危険要因を早期に発見・対処し、工事状況や不法使用の把握・指導をすることを目的に、定期的な道路巡回が行われている。そこでは、原則として平均交通量によって 1~3 日に 1 回程度の頻度でパトロールカーの車内より目視点検を行うこととなっている。しかしながら、近畿地方整備局が管理している一部主要道路の道路巡回によって得られたデータはサーバーに蓄積されているものの、そのデータを有効活用出来るようなモデルはまだ確立されていないのが現状である。さらに、先述したように MCI の値が定期的に獲得することが困難となった。よって、路面性状に関する情報を有効的に活用するため、道路巡回で得られたデータを用いたモデルを提案することが必要と考えられる。

ここで、近畿地方整備局が管理する主要道路の路線すべてを対象として、ライフサイクルコストに基づいた道路舗装の補修戦略を策定することは現実的ではない。むしろ舗装上に起こったクラックやポットホールといった損傷のタイプ等に基づいてグループ化し、グ

ループ間の差別化を通じた補修戦略のプロファイリングを実施することが望ましい。

以上を踏まえ、道路舗装に関する補修戦略の立案は土木施設の老朽化が急激に進行している現在において重要であり、全ての道路舗装に対して同一の戦略をとるのではなく、損傷のタイプや発生プロセスに応じて戦略を採用するプロファイリング戦略を立案したい。そこで、本研究では、道路巡回データを利用したプロファイリング戦略立案のために、道路巡回発生事象内の関係を離散確率分布の近似モデルであるベイジアンネットワークにより分析する。

## 2. 本研究の基本的な考え方

### (1) 道路舗装補修戦略プロファイリング

プロファイリングに関する既往研究において、小林らほか<sup>4)</sup>では、ライフサイクルコストの低減化に資する最適な補修戦略を求めることを重要な課題としている。そこでは、多くの地方自治体が、技術者の不足や維持管理予算の制約に直面しているのが実情であり、地方自治体が管理する膨大な橋梁すべてを対象として、劣化予測を策定することは現実的ではない。そのため、劣化速度に基づいて橋梁をグループ化し、そのグループ内におけるライフサイクル費用評価による橋梁群の差別化とグループにおける標準化補修戦略を求めるプロファイリング手法を用いている。

道路舗装補修戦略プロファイリングにおいては、ライフサイクル費用評価等の基準に基づいた補修戦略のグループ化だけでなく、管理組織の予算的・人力的制約、交通規制等による社会的費用、第三者被害リスクなどを考慮し、総合的に検討することが必要となる。

本研究では、道路巡回発生事象とその事象に対していつ、どういった処置を行うかについての処置方法の組み合わせからなるプロファイリング戦略に焦点を絞る。

実際に現場では、ポットホールを例にとると、事後修繕を実施したものと応急処置を実施したものの2パターンに分類できる。ここにおける事後修繕とは、ポットホールを発見次第、常温合材により補修し、さらに巡回班の方々が当該区間の舗装状況を深刻と判断し、出張所での話し合いにより、後日舗装版切断工等の工事を行うと判断したものを指している。また、応急処置とは、ポットホールを発見次第、常温合材により補修したのみのものを指している。

ここで、道路巡回発生事象と、いつどういった補修を行うかについての処置方法間の依存関係について求めるために、ベイジアンネットワーク分析を行う。

さらに、プロファイリングを行うことの意義としては以下の3点が挙げられる。

まず、実際に道路巡回に関わっている出張所、委託業者の方々へのヒアリングを通して、特定の事象を発見した場合、次に起こりうる事象は大体予測できており、変状間のある程度知識として蓄積されていた。本研究の分析により、クラックやポットホールなどの道路巡回発生事象の依存関係を求めることで、現場知識の見える化を行うことが出来る。

次に、例えば道路巡回の最中に発見したポットホールに関して、どういった補修を行うかの選択は巡回を行っている方々が行う場合もあるが、舗装状態が深刻な場合、一度出張所に現場の写真等を持ち帰り、ミーティングを行いどういった補修を行うか選択される。ここで、本研究で発生した事象とその事象に実施した処置方法間についての依存関係を求めれば、ある事象を発見した際、どういった補修を行うのかについての意思決定を迅速化することが出来る。

最後に、想定した発生プロセスとは異なったパターンで発生した事象について分析を行うことで、現場の経験から得られなかった情報についての示唆を与え、今後の業務に役立てることが出来る可能性がある。

### (2) 依存関係視覚化のグラフィカルモデリング

道路巡回発生事象とその処置方法間の依存関係の分析には、複数の変数間の構造を視覚的に表すことの出来るグラフィカルモデルを用いる。

近年において、複数の変数間における依存関係をグラフを用いて表し、変数間の構造を視覚的に把握するための手法が多数出現してきた。この手法のことを先述したグラフィカルモデリングと呼ぶ。依存関係は、該当する変数をノードとして、リンクを有向、無向グラフとして表現している。変数間の依存関係は、説明変数と被説明変数との関係、または条件付き確率の関係で捉えられる。代表的なものをいくつか挙げて説明し、本研究でベイジアンネットワークを用いた理由を述べる。

構造方程式モデリング<sup>5)</sup>では、グラフ構造(パスダイアグラム)により統計モデルを表現する。一般的には、仮説に基づき、因子分析などにより、潜在変数を含めたグラフ構造を構築した後、適合度指標などから、モデル説明力などの検証を行う。構造方程式モデリングでは、既存知識から手動により依存関係をモデル化するため、データから任意のグラフ構造に対して、網羅的に最適なモデルを探索することには向かない。また、多くの構造方程式モデリングでは、変数間関係に線形性を仮定する。非線形関係性を仮定した構造方程式モデリング手法も提案されているが、まだ一般的に用いられるまでには至っていない。

グラフィカルガウシアンモデル(離散変数の場合、グラフィカル対数線形モデル)では、データが多変量正規

分布に従うという仮定の下、変数間の条件付き独立性を探索し、無向グラフにより表現する方法である。具体的には、偏相関係数が 0 となるモデルを仮定し、その制約の下、標本相関係数行列とのズレが最も小さくなるように母相関係数行列を推定する。ズレの評価基準を母相関係数行列と標本相関係数行列に依存した逸脱度とし、これを用いて適合度検定を行う。しかしながら、前述の通り、相関関係を無向グラフとして表現するため、依存関係を表現することはできない。

ベイジアンネットワークでは、複数変数間の依存関係を条件付き確率で表現したネットワークモデルである。グラフ構造は既存の知識により事前に作成されることが多く、このグラフ構造に基づき、確率推論を行う。確率推論では、確率変数間の条件付き確率の積から、全ての確率変数の生起確率を計算することができる。変数間の依存関係を条件付き確率で表現することにより、柔軟なモデルを作成することが可能である。ただし、グラフ構造は、非閉路有向グラフ、すなわち、任意のノードから出発してリンクをたどっても、出発ノードに戻ることはないものに限定される。近年は、グラフ構造の推定法も提案され、依存関係の抽出法として有力視されている。

上記のうちから、本研究では変状と変状の処置状況との間の依存関係を抽出することができ、より自由な表現が可能である条件付き確率に基づくベイジアンネットワークを用いて分析を行う。

### 3. ベイジアンネットワークモデル

#### (1) ベイジアンネットワーク

舗装補修戦略プロファイリングを行うために、ベイジアンネットワーク分析により道路巡回発見事象間の相関構造を検討する。巡回における発見事象を確率変数ベクトル  $\mathbf{X} = x_1, x_2, \dots, x_n$  として定義する。ここに下付添字  $i$  は事象の種類を表す。

$N$  個の離散変数を持つベイジアンネットワークの同次確率分布は、条件付き確率と確率の連鎖法則(チェーンルール)によって以下のように表される。

$$p(x_1, x_2, \dots, x_N) = \prod_{i=1}^N p(x_i | x_1, x_2, \dots, x_{i-1}) \quad (1)$$

$N$  個のノードで構成される DAG(有向非巡回グラフ)を仮定し、その確率構造  $G$  が定められているとする。DAG 内においてノード  $V_i$  からノード  $V_j$  への直接のエッジ  $V_i \rightarrow V_j$  が存在するとき、 $V_i$  を  $V_j$  の親ノードと呼び、 $V_j$  を  $V_i$  の子ノードと呼ぶ。このとき、次のように確率構造  $G$  を所与としたときの同次確率分布を導

出できる。

$$p(x_1, x_2, \dots, x_N) = \prod_{i=1}^N p(x_i | \Pi_i, G) \quad (2)$$

ただし、 $\Pi_i \subseteq \{x_1, x_2, \dots, x_{q_i}\}$  は変数  $i$  の親ノード集合を示している。

#### (2) ネットワークの統計的学習

親変数集合が  $j$  番目のパターンをとったとき ( $\Pi_i = j$ )、変数  $x_i$  が値  $k$  をとる条件付きパラメータを  $\theta_{ijk}$  とし、条件付き確率パラメータ集合  $\theta = \{\theta_{ijk}\}$  とする。このとき、データ  $\mathbf{x}$  を所与としたときのパラメータ集合  $\theta$  についての尤度は、以下のような多項分布にしたがう。

$$p(\mathbf{x} | \theta, G) \propto \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^{q_i} \prod_{k=1}^{r_i} \theta_{ijk}^{n_{ijk}} \quad (3)$$

ここで、 $n_{ijk}$  は、変数  $i$  の親ノード変数集合に  $j$  番目のパターンをとり、変数  $i$  に対して  $k$  番目の値をとったデータ数を示している。

次に、ベイズアプローチに従い、パラメータ  $\theta$  についての事前分布  $p(\theta | G)$  を考えたい。最も合理的な形としての事前分布を考えるには、事前分布と事後分布の分布系が同一であるような事前分布、つまり、自然共益事前分布を考えるとよい。式 (3) の尤度は多項分布に従うため、その自然共益事前分布として、以下のディリクレ分布 (Dirichlet distribution) が知られている。

$$p(\theta | G) = \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^{q_i} \frac{\Gamma\left(\sum_{k=1}^{r_i} \alpha_{ijk}\right)}{\prod_{k=1}^{r_i} \Gamma(\alpha_{ijk})} \prod_{k=1}^{r_i} \theta_{ijk}^{\alpha_{ijk}-1} \quad (4)$$

ここで、 $\Gamma$  は  $\Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$  を満たすガンマ関数を示し、 $\alpha_{ijk}$  は  $n_{ijk}$  に対応する事前の知識を表現する、ユーザーによって決定される、疑似サンプルとしてのハイパーパラメータを示す。

尤度と事前分布を掛け合わせることで、以下に示す事後分布の関係性を得ることが出来る。

$$p(\mathbf{x}, \theta | G) \propto \prod_{i=1}^N \prod_{j=1}^{q_i} \prod_{k=1}^{r_i} \theta_{ijk}^{\alpha_{ijk} + n_{ijk} - 1} \quad (5)$$

事後分布を最大化する MAP 推定値は式 (5) の対数関数を考えることにより、以下の MAP 推定値を得ることが出来る。

$$\hat{\theta}_{ijk} = \frac{\alpha_{ijk} + n_{ijk} - 1}{\alpha_{ij} + n_{ij} - r_i} \quad (6)$$

MAP 推定値において、すべてのハイパーパラメータを  $\alpha_{ijk} = 1$  として一様分布を仮定すると、最尤推定値  $\hat{\theta}_{ijk} = \frac{n_{ijk}}{n_{ij}}$  に一致する。



(3) 構造学習とアルゴリズム

ここまでは、ネットワーク構造  $G$  が与えられた状況における確率分布を検討した。しかしながら、ベイジアンネットワーク分析によるプロファイリング立案のためには、変数間の因果構造を探索的に求める必要がある。ベイジアンネットワークの構造を決定するために用いられるアルゴリズムは、情報量規準に注目することで構築されていることが主である。情報量規準とは、現在構築されているモデルの当てはまりの良さを評価するための指標である。ここで、扱う確率変数が離散型確率変数である場合、ベイジアン情報量規準 BIC 等が利用されている。本研究では、尤度  $L$ 、パラメータ数  $k$ 、データサイズ  $n$  を用いて定義した  $BIC = -\log L + 2k \log n$  に基づいて、最適な構造を探索する。

上記のスコアを最適化するために、greedy hill-climbing アルゴリズム<sup>6)</sup> と呼ばれる現在のグラフ構造のスコアと、その近いグラフ構造のスコアを比較し、優れた方のグラフを保存し、選択することで、逐次的に最適なグラフ構造を求める手法を用いる。

具体的には、まず空グラフ、つまり何のエッジも張られていないグラフを初期値としてアルゴリズムを開始する。そして乱数で巡回するノードを決める。巡回したノードに対してスコアが最も良くなる操作を1つ探す。ここでの操作とは、親を1つ追加する、もし既にそのノードに対して親がついていたら取る、あるいは親から接続されているエッジを逆向きにする。そして最もスコアが良くなる操作を1つ選び、実際にそれを採用する。そして次の巡回先のノードに行く。これをスコアが改善しなくなるまで繰り返す。

この方法によって得られる構造は局所解であり、解の良さに保証はない。それを補うために、上記のプロセスを  $T$  回繰り返し実行する。実行ごとに巡回するノードの順番が異なるため、異なる局所解が得られる。 $T$  個の局所最適解の中で最もスコアの良かったグラフ構造を最終的な推定結果とする。

図-1 には、 $n$  個のサンプルに対して  $p$  個の要素からなる  $n \times p$  データ行列に対してベイジアンネットワークを求める際の greedy hill-climbing アルゴリズムの流れを示した。

4. 適用事例

(1) データベースの概要

上記で提案した道路舗装の変状間の因果関係を可視化するモデルを用いて、国土交通省近畿地方整備局大阪国道事務所管内における道路巡回データに関する分析を行う。道路巡回データの概要を表-1 に示す。

大阪国道事務所では、パトロールカーを用いる道路

No.	Event
0	入力: $X: n \times p$ データ行列, $T$ : 繰り返し数, $X_a$ : ノード ( $1 \leq a \leq p$ ) 出力: $G$ : ベイジアンネットワーク
1	{構造の探索} 1: for $t = 1$ to $T$ do 2: $G' \leftarrow G$ 3: $G \leftarrow$ 空グラフ 4: repeat 5: $P \leftarrow (P_1, \dots, P_p)$ : 乱数による順列 6: for $j = 1$ to $p$ do 7: $C_{P_j} \leftarrow \{X_t   t \neq j, 1 \leq t \leq p\}$ 8: 1)もし $X_{P_j}$ に親がある場合、それを取り除いた場合と逆転した場合のスコアを計算する。 9: 2) $C_{P_j}$ を1つずつ親としてつけてみて、スコアを計算する。 10: 上記1),2)のうち最もスコアが向上した操作を実際に $G$ に適用する。ただし $G$ に巡回路が出来ないようにする。 11: end for 12: until $s(G) < s(G')$ ( $s(\cdot)$ はスコア関数とし、ここではスコアが大きい方が優れたグラフであるとする) 13: $s(G) < s(G)$ ならば $G \leftarrow G'$ 14: end for

図-1 greedy hill-climbing アルゴリズム

表-1 道路巡回データの概要

巡回期間	2016年4月1日~2018年3月31日
路線数	15路線
分析路線長	238.29km
変状種類数	132種類(その他を除く)
変状数	39579個

巡回によって得られたデータはタブレット型端末を用いて収集され、データベース化されている。当該データベースには多くの項目が含まれているが、本研究ではそのうち分析に用いるデータ項目として、「巡回日」、「天気」、「路線名」、「距離標」、その変状が発生した「施設」(道路、構造物、排水等)、さらにその施設を細分化した「分類」(車道、歩道、地下道等)、実際に起こった変状が記述されている「状況」、また発見した変状に対してどういった処置を施したかについて記述されている「処置状況」等を取りあげる。

(2) 一次分析

次に、基礎集計を行い、132種類ある変状のうち、どの変状を取り上げて分析するかを決定する。「施設」には、変状の起こった施設について、道路・構造物・排水・工事・安全施設・その他の6種類に分けて記録されている。本研究では道路舗装に関する分析を行うため、6種類の項目のうち、道路でより多く発見されている変状を取り上げる。以下に抽出した変状を列挙し、道路で発見された変状の路線ごとの集計結果を表-2 に示した。

- がたつき、くぼみ、クラック、ポットホール、わだ

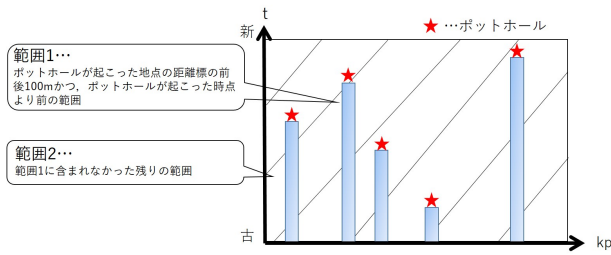


図-2 ポットホール発生前に何が起こっていたか

ち掘れ、雑草繁茂、塵埃、水たまり、段差、破損、剥離

さらに、道路舗装の維持管理において、ポットホールの発見およびその補修は道路利用者の安全性に大きな影響を与える要因であり、その発生はただちに交通事故へ繋がる危険性を孕んでおり、道路舗装補修戦略案を考えるうえでの最重要事項と考えたため、本研究ではポットホールに焦点をあてて分析を行う。

まず、ポットホールが発生した周辺では、過去にどういった変状が起こっていたかについて調べるため、最も変状数の多い国道 26 号線のデータを用い、ポットホールが起こった距離標の前後 100m 以内かつ過去に発見された変状と、それに当てはまらなかった範囲で起こった変状とを集計し、発生密度の比較を行った。つまり、図-2 に示したように、2つの範囲に分類し、式(7)によって当該変状の発生密度を計算した。図-2 については、縦軸を時刻、横軸を距離標として、新しく起こった変状ほどグラフの縦軸正の方向に来るようにプロットがされている。

$$\text{発生密度} = \frac{\text{各範囲で起きた変状の発生個数}}{\div (\text{各範囲の面積}) \times 1000} \quad (7)$$

その結果、表-3 に示した結果が得られた。有意水準を 0.05 としたとき、がたつき、クラック、雑草繁茂、水たまり、破損、剥離に対して、範囲 1 と範囲 2 での発生密度に有意な差がある。つまり、ポットホールが発生した地点の周辺では、がたつき、クラック、雑草繁茂、水たまり、破損、剥離が比較的起こりやすいという傾向があることが分かった。

次に、ポットホールの処置方法とその他の変状との関係性について、2016 年度の全路線についてのデータを用いて分析を行う。先述したように、道路巡回データには発見された変状に対してどういった処置を施したかについて、「処置状況」の項目に記録されている。例えば、ポットホールの場合、事後修繕を実施したものと応急処置を実施したものの 2 パターンに分類できる。ここにおける事後修繕とは、ポットホールを発見次第、

常温合材により補修し、さらに道路巡回班が当該区間の舗装状況を深刻と判断し、出張所での話し合いにより、後日舗装版切断工等の工事を行うと判断したものを指している。また、応急処置とは、ポットホールを発見次第、常温合材により補修したのみものを指している。ここで、事後修繕を実施したポットホールが発生した区間と応急処置を実施したポットホールが発生した区間では、過去に発見されたどういった変状に有意な差があるかどうかを確認するため、同様の方法で分析を行った。具体的には、図-3 に示したように、ポットホールの処置状況によって 2つの範囲に分類し、ポットホールの有無によって発生密度に有意な差が出た変状に対して、式(7)を用いて発生密度を計算した。

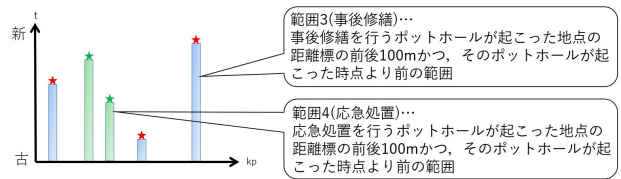


図-3 処置方法による違い

その結果、表-4 に示した結果が得られた。同様に有意水準を 0.05 としたとき、がたつき、クラック、雑草繁茂、水たまり、破損、剥離に対して、範囲 3 と範囲 4 での発生密度に有意な差があることが分かった。つまり、事後修繕を実施したポットホールの周辺の方が、応急処置を実施したポットホールの周辺よりも、がたつき、クラック、雑草繁茂、水たまり、破損、剥離が比較的起こりやすいという傾向にあることが分かった。

### (3) ベイジアンネットワークの構築と考察

次に、ポットホールの処置状況と、発生密度に有意な差が見られた変状との関係を分析するために、ポットホールの処置状況と各変状の有無をそれぞれ確率変数としたベイジアンネットワーク分析を行う。対象区間で発生した全てのポットホールをサンプルとする。ポットホールとその処置状況にまず焦点を当て、事後修繕が行われたサンプルには 1 を、応急処置が行われたサンプルには 0 を記入する。さらにそのポットホールが発見された地点の距離標の前後 100m 以内かつ過去に発生した変状の有無に関する情報を追記して、図-4 に示したデータセットを作成した。

ポットホールの処置状況と各変状の有無をそれぞれ確率変数とし、それらの確率変数の関係性を表すグラフ構造は、対数尤度を式(3)を用いて計算し、BIC スコアに基づき greedy hill-climbing アルゴリズムを用いて決定する。ベイジアンネットワーク分析を行った結果を図-5 に示した。

表-2 基礎集計

路線名	がたつき	くぼみ	クラック	ポットホール	轍掘れ	雑草繁茂	塵埃	水たまり	段差	破損	剥離	総計
1号	101	19	56	9	9	229	18	18	43	183	116	801
1号BP	8	7	43	1	1	367	55	11	18	62	80	653
2号	91	4	36	1	6	52	3	4	22	55	115	389
25号	33	18	46	27	25	42		6	24	58	27	306
25号BP	1	1		1	3	20			1	3		30
26号	265	34	75	147	14	128	56	34	79	163	101	1096
26号(移管)	1	10	4	7	1	14		2	6	11	10	66
26号(前BP)		1	7	6		34	1	1	2	19	12	83
43号	313	7	36	119	4	64	63	10	17	135	134	902
163号	29	13	22	5	18	149	8	13	21	76	14	368
165号	1	4	10	3	3	22			1	3	4	51
170号						4		1		7		12
171号	31	35	47	19	5	92	6	18	67	99	107	526
171号旧道		2		1		2		3	3	5	2	18
176号	4	14	3	3		18		4	23	40	34	143
481号	15	4	1	1		4	1		9	3	6	44
総計	893	173	386	350	89	1241	211	125	336	922	762	5488

表-3 分析結果

変状	がたつき	くぼみ	クラック	わだち掘れ	雑草繁茂	塵埃	水たまり	段差	破損	剥離
発生個数(範囲1)	31	3	13	1	49	1	7	7	26	27
発生個数(範囲2)	92	19	53	11	180	21	13	56	118	112
発生密度(範囲1)	1.824	0.176	0.765	0.059	2.882	0.059	0.412	0.412	1.529	1.588
発生密度(範囲2)	0.508	0.105	0.293	0.061	0.993	0.116	0.072	0.309	0.651	0.618
t値	6.372	0.847	3.227	0.03	6.933	0.675	4.22	0.718	4.063	4.569
P(T<=t)片側	9.32E-11	0.198	6.27E-04	0.488	2.07E-12	0.25	1.22E-05	0.236	2.42E-05	2.46E-06
有意水準	0.05									

表-4 分析結果

変状	がたつき	クラック	雑草繁茂	水たまり	破損	剥離
発生密度(事後修繕)	3.405	3.405	11.066	3.405	4.682	5.107
発生密度(応急処置)	1.765	1.677	5.693	1.765	2.471	2.339
t値	2.264	2.429	4.136	2.264	2.587	3.261
P(T<=t)片側	0.012	0.008	0.001	0.012	0.005	0.001
有意水準	0.05					

これより、クラックが事前に発見されていたポットホールの場合、事後修繕を行っている確率が相対的に高いことや、剥離と、それぞれクラック、がたつき、破損などの相関が見られることが分かった。この分析を行うことでポットホールの処置状況とその区間で発生した変状間での依存関係について、現場知識の見える化を行うことが出来た。

さらに、導かれた図-5のベイジアンネットワークと実際のデータとの当てはまりについて分析した。表-5は図-5からポットホールの処置状況と依存関係がある

とされる剥離とクラックに関して、ポットホールが起こる前にそれらの変状が観測されたものと観測されなかったものについて、事後修繕を実施したものの割合を計算したものである。観測された350個のポットホールのうち事後修繕を行ったポットホールの割合は24.9%であったが、事前にクラックが発生していた93個のポットホールのうち事後修繕を行った割合は36.6%、さらに事前に剥離とクラックが発生していた74個のポットホールのうち事後修繕を行ったものの割合は39.2%となっている。図-5に示されたようにクラックや剥離の

サンプル	ポットホールの処置状況	がたつき	クラック	雑草繁茂	水たまり	破損	剥離
	1	0	0	0	1	1	1
	1	0	0	0	1	1	0
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	0	1	1	1	1	0	0

着目したポットホールが事後修繕されていた場合... 1  
着目したポットホールが応急処置されていた場合... 0

着目したポットホールの距離標の前後100m以内にこれらの変状が見つかった場合... 1  
見つからなかった場合... 0

図-4 入力するデータセット

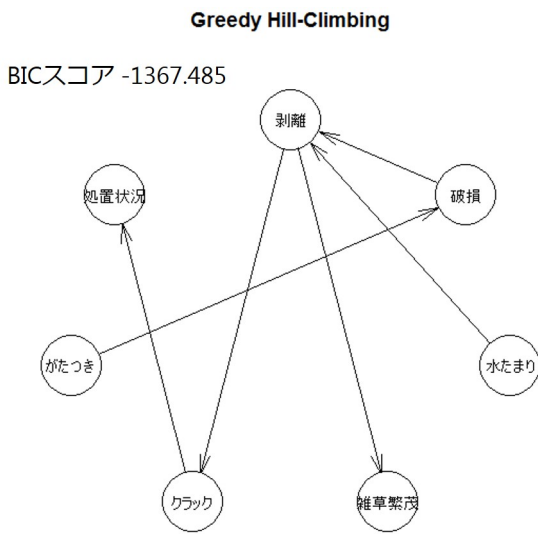


図-5 分析結果

有無がポットホールの処置状況に対して実際に相関があることが確認できる。

表-5 事後修繕を行ったポットホールの割合

	事後修繕を実施したポットホールの割合
ポットホールが発生した区間 (N=350)	24.9 %
うち事前にクラックが発生した区間 (N=93)	36.6 %
うち事前に剥離とクラックが発生した区間 (N=74)	39.2 %

次に、図-5 に当てはまらなかったデータについて考察する。2. に記述したように、想定から外れたデータについてさらに分析を行うことで、現場での経験からは得られなかった情報についての、新たな示唆を与えることが出来る。

また、ポットホールの発生要因としては、日常巡回で発見される変状にのみならず、道路構造や交通量といった情報が効くことが予想される。そこで、そういったハード面での情報をデータセットに組み込んで、より精度の高い分析による実用性の高い補修戦略案の立案を検討する。新たに加えるハード面に関する情報としては、大型車交通量や各地点での道路構造などが考えられる。

ここでは、事後修繕を行ったポットホールが発生した区間について、当該区間の 24 時間交通量に着目して分析した。クラックが事前に発生していたポットホールに対して、事後修繕を実施したものと応急処置を実施したものの 2 つのグループに分類し、その地点での 24 時間交通量の各グループでの平均値を比較する。その結果を表-6 に示す。示した通り、事前にクラックが発生し事後修繕を行った 35 個のポットホールの方が、事前にクラックが発生していないのにも関わらず事後修繕を行った 49 個のポットホールに対して平均 24 時間交通量が多いという結果が得られた。これから、交通量の少ない区間では長時間交通に支障をきたしても、交通量の多い区間に比べて社会に与える障害が小さいため、舗装上のダメージが少ないときでも事後修繕を行う傾向にあることが分かった。

表-6 交通量と発生状況の関連

	平均 24 時間交通量 (台)
事後修繕 (クラックあり)(N=35)	59062
事後修繕 (クラックなし)(N=49)	47182

以上の結果を考慮して、図-4 に示したデータセットに交通量に関する変数を加え、再度ベイジアンネットワークを構築する。表-6 に示した通り、図-5 のモデルでは想定されていなかった発生プロセスをたどったポッ



トホール(事後補修)については、24 時間交通量 50000 台を境界として、異なったプロセスを辿っていると予想できる。ここでは、当該ポットホールが発生した地点における 24 時間交通量が 50000 台以上のサンプルに 1 を割り当てるダミー変数を導入した。作成したデータセットを入力データとして、同様のベイジアンネットワーク分析を行った結果を図-6 に示す。

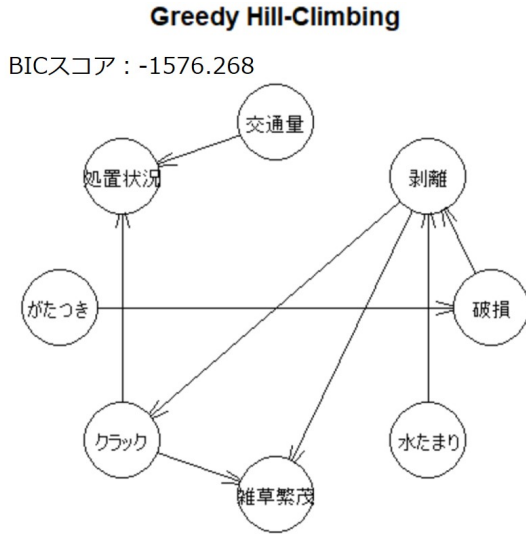


図-6 分析結果

これより、ポットホールの処置状況には、そのポットホールが発生した地点の周辺でのクラックの有無や、その地点での 24 時間交通量が関わっていることが分かった。

さらに、同様に導かれた 図-6 のベイジアンネットワークと実際のデータの当てはまりについて分析した。

表-7 は 図-6 からポットホールに対する処置方法と相関があるとされるクラックと交通量に関して分類し、事後修繕に至ったものの割合について集計、計算したものである。観測された 350 個のポットホールのうち事後修繕を行ったポットホールの割合は 表-7 にも示したように 24.9%であったが、24 時間交通量が 50000 台以上の地点で観測された 98 個のポットホールのうち事後修繕を行った割合は 34.7%、事前にクラックが発生しており、なおかつ 24 時間交通量が 50000 台以上の地点で観測された 38 個のポットホールのうち事後修繕を行った割合は 42.1%となっている。

## 5. おわりに

本研究では、国土交通省近畿地方整備局が管理する道路の道路巡回データを用いることで、舗装についての変状とその処置状況との間の依存関係を示した。本研究で得られたベイジアンネットワークモデルを現実

表-7 事後修繕を行ったポットホールの割合

	事後修繕を実施したポットホールの割合
ポットホールが発生した区間 (N=350)	24.9 %
うち 24 時間交通量が 50000 台以上の区間 (N=98)	34.7 %
うち事前にクラックが発生かつ 24 時間交通量が 50000 台以上の区間 (N=38)	42.1 %

のアセットマネジメントに適用するためには今後改善していかなければならない課題がいくつも存在する。

まず、本研究で用いたデータセットはポットホールに着目しその距離標の前後 100m 以内かつ事前に起こった変状の有無について 0 または 1 で入力を行っているが、ポットホールの中には二年間のデータのうち、一年目の序盤に起こったものや二年目の終盤に起こったものが存在する。どちらのポットホールに対しても同じ条件で他の変状の有無についてデータセットを入力したが、モデルに不確実性が生じるため、例えばポットホールが発生した時点から半年前まで等の期間を限定して集計を行うことでモデルの信頼度を増すことが出来る。

次に、本研究では依存関係について定性的な関係が得られただけであるが、今後の研究ではより効率的なプロファイリングを行うために定量的な関係を得るための分析が必要となる。

さらに、本研究では舗装上の変状の有無とその処置方法、さらに交通量を用いてモデルを導いたが、現実の世界では降水量、大型車混入率等の様々な要素が絡み合っ変状が発生する。今後の研究ではさらにあらゆる要素を取り入れてプロファイリングに資するベイジアンネットワーク分析を行う必要がある。

また、本研究で求められたベイジアンネットワークモデルは、道路巡回の記録から得られたものであるが、実際に現場で行われた補修工事が最適であるとは言いつけない。よって、最適性を担保するためには LCC 等の評価基準を実際に導入する必要がある。しかし、現場で行われた補修工事がある程度の最適性を担保していると仮定すると、本研究で求められたモデルから、ポットホールを発見した際にどういった補修をするべきかについての意思決定を迅速化することが出来る。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：インフラ長寿命化とデータ利活用に向けた取組，国土交通省，2018 年 11 月 2 日，<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/sankankyougikai/infrastructure/>



- dail/siryoun2.pdf (最終閲覧日 2019 年 1 月 31 日).
- 2) 国土交通省：舗装点検要領 国土交通省 道路局 国道・防災課, 2018 年 3 月, [http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo3\\_1\\_10.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo3_1_10.pdf) (最終閲覧日 2019 年 1 月 31 日).
  - 3) 吉岡正樹, 森田光, 伊藤晃一, 伊藤裕行, 盛田泰史: 路面性状測定車によるアスファルト舗装の劣化調査及びその評価 (公認社団法人地盤工学会 第 21 回調査・設計・施工技術報告会資料), 2012, [http://jgs-chubu.org/wp-content/uploads/pdfupload/download/syn4/pdf/21/21\\_2\\_1.pdf](http://jgs-chubu.org/wp-content/uploads/pdfupload/download/syn4/pdf/21/21_2_1.pdf) (最終閲覧日 2019 年 1 月 31 日).
  - 4) 小林潔司, 中谷昌一, 大迫湧歩, 安部倉完: 橋梁の劣化速度の異質性を考慮した補修戦略プロファイリング, 土木学会論文集 D3, Vol73, No.4, pp201-218, 2017.
  - 5) 細野真臣: ベイジアンネットワーク, コロナ社, 2013.
  - 6) 鈴木讓, 植野真臣, 黒木学, 清水昌平, 湊真一, 石島正和, 樺島祥介, 田中和之, 本村陽一, 玉田嘉紀: 確率的グラフィカルモデル, 共立出版, 2016.
  - 7) 田中和之: ベイジアンネットワークの統計的推論の数理, コロナ社, 2009.
  - 8) 布施孝志, 渡邊拓也: ベイジアンネットワークに基づく OD データの地域間依存関係の視覚化, 土木学会論文集 D3, Vol70, No.5, I55-I61, 2014.
  - 9) 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司, 平川恵士: 気象状況を考慮したポットホール管理重点化ルール, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント), Vol70, No.3, 63-80, 2014.
- (2018. 3. 10 受付)

## PAVEMENT MANAGEMENT PROFILING WITH CORRELATION BETWEEN EVENTS OF ROAD PATROL SERVICE

Seiya TSUJINO Kakuya MATSUSHIMA and Kiyoshi KOBAYASHI

The aging and deterioration of infrastructure constructed during the period of high economic growth are serious, and the maintenance and management strategies for efficient infrastructure are required to secure the safety of users while reducing its expenses. Regarding the road pavement, due to the revision of pavement inspection procedure, road surface property survey was abolished in principle and the obligation for visual inspection and daily inspection was conducted instead. In this research, we propose a pavement repairment profiling policy to judge the state of road surface condition using data that can be acquired from frequent road patrol service. For that purpose, we propose a methodology to estimate the occurrence structure of events discovered in the road patrol service by bayesian network analysis and to decide the generation of pot holes and the repair strategy planning based on the transformation dependency.