

## 道路劣化の状態把握のための適切な期間の推計に関する研究

山梨大学 工学部土木環境工学科 学生会員 ○平野 光洋  
山梨大学 大学院医学工学総合研究部 正会員 佐々木 邦明

## 1.はじめに

現在の日本において公共インフラ、経済活動、災害時の緊急車両の走行でも道路は不可欠な存在である。高度経済成長期に集中的に整備された道路は今後更新の時期を迎える。国民生活の安心と安全を守るうえでも、道路新設だけではなく、既存の道路の維持修繕の重要性が指摘されている。その中で、厳しい財政状況などにより維持管理、更新費用を抑える手段としてアセットマネジメントが注目されている。道路舗装の修繕問題に関して膨大な研究が蓄積されてきた。これらの個別的、要素技術的な研究の蓄積を踏まえて1970年代より道路舗装の修繕マネジメントシステムに関する研究が進展した。基本的には土木施設の劣化予測を行い、ライフサイクル費用を最小にするような補修対策と補修タイミングを検討するというものが今まで行われてきた研究の主な内容である。土木施設のアセットマネジメントでは、ライフサイクル費用評価に基づく維持管理戦略の決定が課題となる。そのためには道路劣化状態を適切に把握することが重要である。

道路劣化状態を把握するためにはベイズ型アプローチが考えられる。これは事前情報を用いた予測(事後分布)とデータ獲得後の予測(事後分布)の修正によって現象を記述するものである。特に時系列的な記述をベースとするシステム方程式と観測方程式による状態空間モデルは逐次的に状態を記述できる。

また、MCI(道路維持管理指標)の観測の頻度の問題がある。道路劣化状態を観測するには路面性状測定車等を用いる。測定車は走行することにより、ひび割れ、わだち掘れ、平坦性の同時測定が可能であり、MCI値を測定する。しかし、これらの観測はコストがかかる。観測期間を短くすればその分コストがかかってしまい、道路維持管理費用の増大につながる。そのため、可能な限り観測回数を減らす必要がある。

本研究では、状態空間モデルを用いて道路劣化状態を予測し、道路劣化に対する適切な発見ができるMCI観測期間についての検討を行う。

## 2.研究内容

## 2.1 研究方法

道路劣化に対し適切な発見ができる観測期間を推計するためにはまず時系列解析のためのMCI(道路維持管理)仮想データを作成する必要がある。そして作成した仮想データを用いて状態空間モデルにより道路劣化状態の予測を行っていく。そして仮想データについては交通量、予測に関しては観測期間を多様に変えてシミュレーションを行い、どのような交通量特性を持つ道路がどれくらいのMCI観測期間が必要なのかを示していく。

## 2.2 MCIとは

MCIとは道路維持管理指数を示しており、道路舗装面の状態を10段階で評価したもので満点は10である。ひびわれ率:C(%), 轍掘れ量:D(mm),  $\sigma$ (mm)よりMCI算出式によってMCIを求める。MCI算出式には下記の4式があり、それらの式で得た値の最も小さい値をMCI評価値とする。

$$MCI_0 = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2} \quad (1)$$

$$MCI_1 = 10 - 1.51C^{0.3} - 0.30D^{0.7} \quad (2)$$

$$MCI_2 = 10 - 2.23C^{0.3} \quad (3)$$

$$MCI_3 = 10 - 0.54D^{0.7} \quad (4)$$

MCI	内容
10	全く欠陥が認められない(良)
8	幾分欠陥があるが、良好とみなされる
6	欠陥は多いが修繕は要しない
4	簡単な維持を要する
2	大規模な修繕を要する

表-1 MCI健全度

### 2.3 仮想データの作成

先行研究「不確実性下における最適補修投資ルール」より引用した式を用いて MCI 仮想データを作成する。

$$s_{k+1} = s_k + \beta \Delta t \quad (5)$$

(5)式は毎月加算される累積交通需要を表す式となっている。\$s\_k\$は累積交通量を表しており、\$\Delta t\$を一ヶ月と設定している。\$\beta\$は交通量を表しており、この交通量の変動を多様に変えてシミュレーションを行う。

$$z_{k+1} = z_k - \rho \{s_{k+1} - s_k\} - \delta \Delta t - \eta \Delta q(t_k) \quad (6)$$

$$\Delta q(t_k) = \begin{cases} u (\text{確率} \lambda \Delta t) \\ 0 (\text{確率} 1 - \lambda \Delta t) \end{cases} \quad (7)$$

(6)式の\$z\_k\$は道路性能指標 (MCI) を表す。前の期の\$z\_k\$ (MCI) から交通量、自然的劣化、大型車や自然現象による劣化をマイナスしたものが次の期の\$z\_{k+1}\$ (MCI) となる。それぞれ右辺の第二項が交通量、第三項が自然的劣化、第四項が大型車や自然現象による劣化である。\$\Delta q(t\_k)\$はある確率で劣化が発生することを示している。\$u\$は対数正規分布に従う乱数を発生させており、「不確実性下における最適補修投資ルール」より阪神高速道路東大阪線において10年間のMCIデータからパラメータ値として\$\rho = 9.071 \times 10^{-9}, \delta = 6.250 \times 10^{-3}, \eta = 3.791 \times 10^{-2}, \lambda = 0.1\$と設定している。図1はMCIが二次曲線状になるように交通量を変動させて作成した仮想データである。

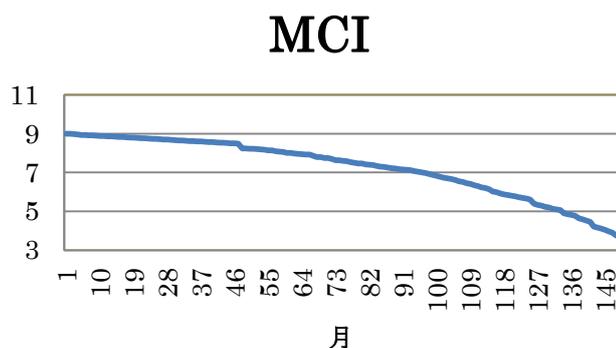


図-1 作成した MCI 仮想データ

この図は一例であるが、このようなデータを用いて道路劣化状態の予測を行っていく。

### 2.4 状態空間モデル

\$y\_n\$を1変量の時系列とする。このとき、この時系列を表現する次のようなモデルを状態空間モデルと呼ぶ。

$$x_n = Fx_{n-1} + Gv_n \quad (8)$$

$$y_n = Hx_n + w_n \quad (9)$$

ここで\$x\_n\$は直接には観測できない \$k\$ 次元のベクトルで、状態と呼ばれる。\$v\_n\$はシステムノイズ、\$w\_n\$は観測ノイズであり、平均ベクトル 0 の正規白色雑音である。\$F, G, H\$ は行列である。時系列解析で用いられる線形モデルの多くはこの状態空間モデルの形で表現し、統一的に扱うことができる。

状態空間モデルを用いることにより逐次的に状態を記述できるため、精度の高い予測が行える。本研究ではこの状態空間モデルを道路劣化状態の予測に用いる。

### 2.5 AR モデル

時系列データを分析するためには、具体的な時系列モデルを想定する必要がある。そこで得られたMCI仮想データが、前の期の道路劣化が今の期の道路劣化に影響するとして、ARモデルに従うとする。ARモデルとは、変数の動きを自分の過去の値から説明するモデルである。(10)式はARモデルを示している。

$$y_n = a_1 y_{n-1} + a_2 y_{n-2} + \dots + a_i y_{n-i} + \varepsilon_n \quad (10)$$

\$Y\_n\$の値は直前の \$i\$ 個過去の値の加重和に\$\varepsilon\_n\$で表される\$N(0, \sigma^2)\$に従うホワイトノイズを加えたものである。また\$(\alpha\_1, \alpha\_2, \dots, \alpha\_i)\$はAR係数であり、その次数 \$i\$ は AIC 最小法によって検討する。

$$\text{システムモデル} \quad x_n = Fx_{n-1} + G\varepsilon_n \quad (11)$$

$$\text{観測モデル} \quad y_n = Hx_n \quad (12)$$

ARモデルでは状態\$x\_n\$の値が観測値になるため観測誤差はない。ARモデルを状態空間表現すると

(11),(12)式のようになる. このモデルを用いて予測を行っていく. 本研究では  $X_n$  を道路劣化状態,  $Y_n$  を MCI 値 (道路維持管理指数) として予測を行っていく. ここで行列  $F, G, H$  はそれぞれ(13)式で表される.

$$F_n = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_i \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad H^t = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad G_n = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

上述の状態空間モデルに, (14),(15)式のように時系列関係を線形で表すと, カルマンフィルタのアルゴリズムが適用できる. よって一期先予測, フィルタ等を繰り返し予測を行っていく.

$$\text{一期先予測} \begin{cases} x_{k|k-1} = F_k x_{k-1|k-1} \\ V_{k|k-1} = F_k V_{k-1|k-1} F_k^t + G_k Q G_k^t \end{cases} \quad (14)$$

$$k_k = V_{k|k-1} H_k^t (H_k V_{k|k-1} H_k^t + R_n)^{-1}$$

$$\text{フィルタ} \begin{cases} x_{k|k} = x_{k|k-1} + k_k (y_k - \bar{y}_{k|k-1}) \\ V_{k|k} = V_{k|k-1} - k_k H_k V_{k|k-1} \end{cases} \quad (15)$$

上述のモデルで予測を行う際にはパラメータとしてシステムノイズの分散 $\sigma^2$ , AR 係数 ( $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ ) を与える必要がある. これらの値は得られた MCI 仮想データを用いて, 標本自己共分散の計算及びレビンソンの計算アルゴリズムによってパラメータを求めるものとする.

2.6 予測結果

作成した MCI 仮想データから AR 係数を推定した結果, AR 係数は一次となり,  $\alpha_1 = 0.9748048, \sigma^2 = 0.105135, AIC = 22$  となった. AIC とは赤池情報量基準のことでモデルの良さを示す指標であり, その値が低いほど良いモデルとなる. 図 2 が図 1 に示した仮想データを用いてフィルタリングを行った結果である.

実線が MCI 仮想データ, 点線がフィルタリング結果である. このフィルタリングの結果を用いて予測を行っていく. これは観測期間を 1 カ月とした場合であり, 毎期ごとにフィルタをかけている. MCI

の観測は実際には 1 カ月のような頻度では行われないので, 毎期ごとにフィルタをかけるのは不可能であり, 観測期間を長く変えてフィルタリングを行う必要がある.

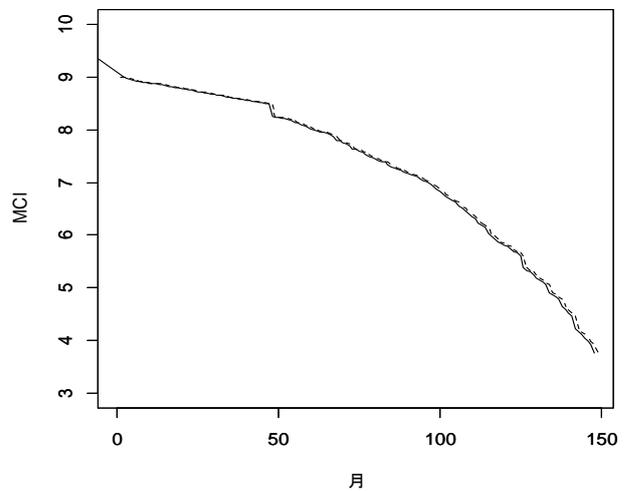


図-2 予測結果

図-3 は観測期間を 6 か月とした場合のフィルタリング結果である. 点線が実線に追従しておらず, 6 カ月ごとに観測値を得るたび実線値に近づき下降しており, ジグザグ状になっている. この原因として元の仮想データが定常性でないことが言える. 定常性とは確率過程が時間によらない分布を持つことを言う. 作成した仮想データは右下がりになっており, 下降トレンドがあることがわかる. そのため仮想データから下降トレンドを取り除くには, 定常性にするために, その階差をとることが必要である. これに関しては発表時までには修正し, 結果を報告したい.

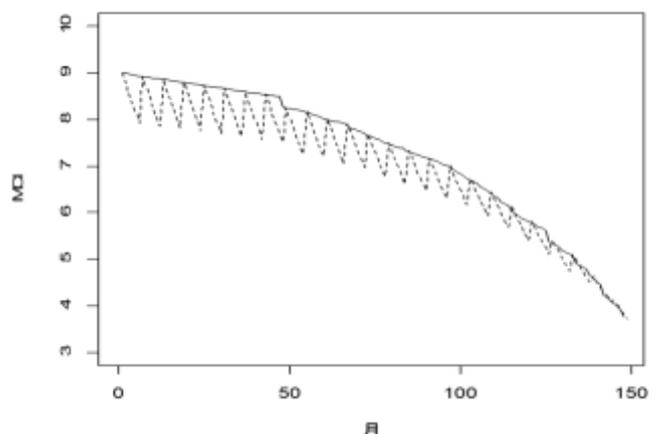


図-3 観測期間を 6 か月とした予測結果

### 3.おわりに

土木施設のアセットマネジメント、ライフサイクル費用評価に基づく維持管理戦略のために MCI 仮想データを用いて状態空間モデルを適用し、AR モデルを用いてフィルタリングを行った。また現在、仮想データの定常性を確保するためのデータの修正を行い、仮想データの交通量、観測期間を変えて予測を行うことにより、道路劣化に対して適切な発見が可能な観測期間はどの程度かを調べており、その旨を発表時に報告する予定である。また今後の課題として、仮想データが右下がりになっているので、トレンド成分等のモデルを組み込み計算を行うことでより精度の高い予測や発見ができるのではないかと考える。

### 4.参考文献

- 1) 「不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究」(土木計画学研究論文集 vol,18 no.1 2001年9月)田村謙介, 小林潔司
- 2) MCI (Maintenance Control Index) 維持管理指数調査報告書」
- 3) 時系列解析入門 北川源四朗著
- 4) R で学ぶデータサイエンスベイズ統計データ解析 姜興起著
- 5) 道路舗装に発生する劣化・損傷要因の分析 土木学会第 57 回年次学術講演会 (平成 14 年 9 月) 安田登 等
- 6) 積雪寒冷地における舗装の耐久性向上と補修に関する研究プロジェクト 新都市社会技術融合創生研究会 2008 年 1 月