

## 空間的特性を考慮した空港滑走路舗装の劣化予測とハイパーパラメタの決定に関する検討

東京都市大学 正会員 吉田 郁政  
東京都市大学 学生会員 ○田崎 陽介

## 1. はじめに

日本において、空港舗装を対象とした維持管理計画に関する既往研究の多くは舗装補修指数 PRI (Pavement Rehabilitation Index) <sup>1)</sup>に基づく検討がなされている。秋元ら <sup>2)</sup>は PRI のひとつの要素であるひびわれについて劣化進行度の算定を行っており、滑走路のひびわれが起りやすい箇所の検討と、その結果に基づきひびわれ率に対する影響が大きい要因の検討を行っている。劣化特性の空間的な特性や不確定性を考慮した研究はまだ多くない。本研究では PRI を用いて空間的な特性を考慮した劣化予測の検討を行い、その特性パラメタを最尤法から決める場合の問題点について述べる。

## 2. 対象とする空港滑走路の点検データ

本研究では熊本空港の点検データをもとに検討をおこなった。熊本空港の滑走路は縦 30m, 横 21m を 1 ユニットとし、全 100 ユニットからなり、ユニットごとに CR ひび割れ率 (%), RD わだち掘れ (mm), SV 平坦性 (mm) が測定されている。空港舗装を対象とした舗装補修指数 PRI は次式より定義される <sup>1)</sup>。

$$PRI = 10 - 0.45CR - 0.0511RD - 0.655SV \quad (1)$$

PRI の値から補修の必要性が 3 段階で評価される。

ユニットごとに最小二乗法を用いて、PRI と補修からの経過年の関係から、簡単な劣化予測式を求めた。その結果の例としてユニット 1, 50, 80 の PRI と算定された劣化予測の線を図-1 に示す。(1)式から、補修からの経過年が 0 年目の PRI の値を 10 とし、傾きだけを算定している。このように全体的にばらつきが大きく、ユニット 1 側で劣化の進行が速く、ユニット 80 付近で劣化進行が緩やかである結果となった。本研究ではユニット 1 から 85 までのデータを対象として以下の検討を行った。

## 3. 空間分布特性を考慮した劣化予測の考え方

PRI の値のばらつきは全体的に大きく、各ユニットで得られているデータはあまり多くはない。キーワード 空港舗装, 劣化予測, 維持管理, 階層ベイズ, PRI

ここで、空間方向の滑らかさを導入した最小二乗法により劣化予測式の推定を行う方法の概要を示す。詳細な考え方は文献 <sup>3)</sup>を参照されたい。

## (1) 差分を事前情報とした最小二乗法の定式化

未知パラメタベクトルについて期待値  $\bar{x}$  とその共分散行列  $M$  が事前情報として与えられるとする。次に、観測方程式  $z = Hx + v$  で与えられるとする。ここで、 $v$  は観測量誤差ベクトルを表し、その共分散行列ベクトル  $R$  を表す。未知パラメタの事前情報に関する不確定性と観測量誤差が互いに独立なガウス分布に従うと仮定し、事前情報も観測量の一部として考えて定式化して尤度関数を求め、-2 を乗じると、パラメタ推定のための次の目的関数を誘導することができる。

$$J = (x - \bar{x})^T M^{-1} (x - \bar{x}) + (z - Hx)^T R^{-1} (z - Hx) + \ln|M| + \ln|R| + (n + m)\ln(2\pi) \quad (2)$$

$x$  そのものではなく隣り合う要素の差分  $Dx$  に対して平均 0 の事前情報を与える。

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

最小化の条件より以下の式が誘導される。

$$x = \frac{1}{\sigma_R^2} PH^T z \quad (3) \quad P = \left( \frac{1}{\sigma_R^2} H^T H + \frac{1}{\sigma_M^2} D^T D \right)^{-1} \quad (4)$$

分散  $\sigma_M^2, \sigma_R^2$  の値は式(2)を最小化するように決める。

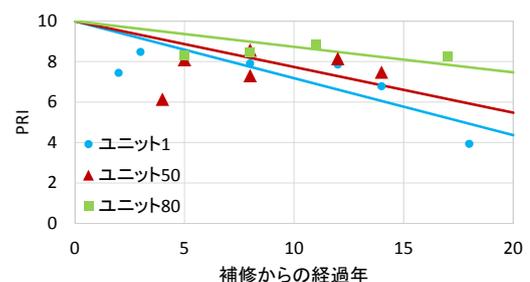


図-1 PRI と補修からの経過年の関係

## (2) 空港滑走路の各ユニットの劣化特性予測式

観測量ベクトル  $z$  が点検によって得られた各ユニット 1 から  $nu$  までの PRI の値とする。

$$z = (z_1, z_2, \dots, z_{nu})^T \quad (5)$$

空港滑走路の劣化予測式を次式のように仮定する。

$$z = 10 - ay \quad (6)$$

$y$  は補修からの経過年数である。ここで、次式のように置き換えて切片を 0 とする。

$$z' = -ay, \quad \text{ここで, } z' = z - 10 \quad (7)$$

以降  $z'$  を  $z$  と示す。以上により、観測方程式は非常に簡略化される。

$$z_A = H_A x + v \quad (8)$$

ここで、

$$H_A = \begin{bmatrix} H_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & H_{nu} \end{bmatrix}, \quad H_i = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{ni} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{nu} \end{bmatrix}$$

観測ベクトル  $z_i$  や  $H_i$  はユニットごとに定義され、その成分の大きさは  $ni$  である。誘導した方法は最小二乗法の回帰係数の確率分布を考えて場所ごとの特性を考慮していると解釈することができる。

## 4. 架空のデータを用いた検討

分散の比  $\sigma_M^2/\sigma_R^2$  によって解が決まる。分散  $\sigma_{R0}^2$  を 1.0 と固定し  $\sigma_{M0}^2$  を変化させて、ユニットごとの劣化の勾配  $a_i$  の算定した。その分布状況を図-2 に示す。 $\sigma_{M0}$  の値が小さければ小さいほど滑らかさが増し、勾配  $a_i$  はユニットによらず一定の値に漸近する。最適な比を最尤法 (式(5)の最小化) から算定しようとしたが求まらなかったため架空データを用いて検討した。

分散  $\sigma_R$  を 1.0 と仮定し、乱数を用いることで、指定したそれぞれの分散  $\sigma_M$  の架空データを作成した。分散  $\sigma_M$  を 0.01, 0.1, 1.0 と仮定した場合の架空データを用いて、それぞれの尤度関数を求めた結果を図-3 に示す。分散  $\sigma_M$  を 0.1 と 1.0 と仮定した架空データを用いた場合、尤度関数が分散  $\sigma_M$  に対して極値をもち、尤度関数を極小点がおおよそ仮定した分散と一致する結果となった。一方、分散  $\sigma_M$  を 0.01 と仮定した架空データを用いた場合、極値が現れず、最尤法を用いても分散  $\sigma_M$  の決定ができない結果となった。仮定した架空データの分散  $\sigma_M$  がある程度の値よ

り小さい場合、その尤度関数に最小値は現れず、最尤法により適切な分散  $\sigma_M$  の決定ができないということが示された。

## 5. おわりに

空間分布の滑らかさを考慮した最小二乗法によりユニットごとの劣化予測を行う方法の提案を行った。求めようとする分散がある程度小さい場合は最尤法により分散  $\sigma_M$  (空間分布の滑らかさ) が決定できない場合があることを示した。

今後は、ワイブル分布を用いた予測式を導入する予定である。さらに、最適な点検・補修計画の立案、すなわち、最適な点検の時期、場所 (ユニット) について示すことのできる方法を構築していきたい。

## 参考文献

- 1) 福手勤, 佐藤勝久, 八谷好高, 山崎英男: 路面性状による航空舗装の供用性評価, 港湾技研資料, No.414, 1982.
- 2) 秋元宏仁, 末政直晃: 滑走路舗装における劣化予測モデルの構築, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), 70th, ROMBUNNO.V-320, 2015.
- 3) 田崎陽介, 吉田郁政: 空港滑走路を対象とした劣化特性の空間分布の評価とその予測, 第 29 回信頼性シンポジウム講演論文集, pp. 20-25, 2016.

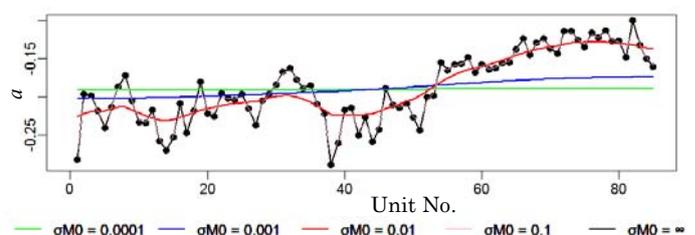


図-2 異なる  $\sigma_{M0}$  での劣化予測式の傾き  $a$  の分布

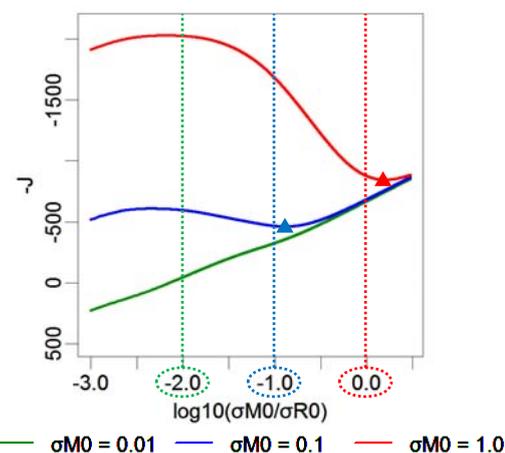


図-3 架空データごとの尤度関数と分散の関係