空港コンクリート舗装の維持管理契約モデル*

A MAINTENANCE MANAGEMENT CONTRACT MODEL FOR AIRPORT CONCRETE PAVEMENT*

藤森裕二** ・下村泰造*** ・小濱健吾**** ・貝戸清之***** ・小林潔司*6
by Yuji FUJIMORI**, Taizo SHIMOMURA***, Kengo OBAMA****,
Kiyoyuki KAITO***** and Kiyoshi KOBAYASHI*6

1. はじめに

空港施設が埋め立て地や空港島のような人工地盤上に建設される場合，空港地盤の不同沈下が，コンクリート舗装の劣化過程に多大な影響を及ぼすことなる．さらに，舗装の劣化過程には，舗装の初期施工条件や繰り返し荷重の変動等に起因する不確実性が介在する．したがって，空港地盤の沈下過程や舗装の劣化過程を確定的に予測することは不可能であり，空港コンクリート舗装のアセットマネジメントにおいては，ライフサイクル費用の低減化を図るため，地盤沈下過程や舗装の劣化過程の不確実性を考慮した維持補修戦略を決定することが必要となる．

以上の問題意識のもと，本研究では，空港舗装PFI事業に着目し，地盤沈下や舗装劣化という２種類の不確実性を考慮したライフサイクル費用リスク評価を行うとともに，費用最小化を達成する最適な維持補修戦略を立案する．PFI事業契約では，契約期間全体を通して空港コンクリート舗装が満足すべき性能が規定されている．さらに，契約期間を通じた大規模補修予算が契約により規定されており，事業者は補修予算の中で性能規定を満足するようにコンクリート舗装を維持管理することが求められる．また，空港施設の運用段階で実際に観測された地盤沈下と舗装劣化に関するモニタリング情報に基づいて，逐次予測結果を修正することが望ましい．以下，**2**. では，基本モデルの定式化，**3**. では，モデルの計算方法について，**4**. では，補修計画の更新について説明する．

*キーワーズ：空港舗装，維持管理契約，マルコフ決定モデル，ベイズ学習

**学生会員 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C-1-2
e-mail: fujimori.yuji@student.mbox.media.kyoto-u.ac.jp)
***正会員 大成建設株式会社 土木本部土木設計部設計計画室
(〒163-0606 新宿区西新宿1-25-1
e-mail: taizo@ce.taisei.co.jp)
****学生会員 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C-1-2
e-mail: k.obama@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp)
*****正会員 大阪大学大学院工学研究科 特任講師
(〒565-0871 吹田市山田丘2-1
e-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp)
*6フェロー 京都大学経営管理大学院経営管理講座 教授
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町
e-mail: kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp)

2. 基本モデルの定式化

(1) 前提条件

空港施設を新たに建設したカレンダー時刻τ_0を初期時点$t=0$とする離散的時間軸$t=0,1,2,\cdots,\bar{T}$を導入する．$\bar{T}$は事業権契約の最終期である．離散的時間間隔として１年間を想定する．対象とする舗装区域を合計I個の平面メッシュに分割する．各平面メッシュは，コンクリート舗装版に対応しており，平面メッシュ単位で地盤沈下量と舗装劣化予測が実施される．ただし，これ以降，議論を単純化するために，平面メッシュiに着目する．

また，運用段階における空港舗装マネジメントにおいては，継続的にモニタリングし，設計段階で予測した地盤沈下過程，舗装の劣化過程を再評価し，維持補修戦略を修正することが可能となる．

(2) 地盤沈下過程

地盤の確率的沈下過程を，混合地盤沈下モデル[1)]を用いて表現する．いま，力学的手法により予測した平面メッシュiの時点tにおける地盤沈下量を表す地盤沈下パス$f_i(t,k)$が与えられたとする（力学的手法に関しても参考文献[1)]を参照されたい）．添え字kは合計K本ある地盤沈下パスのサンプル番号を表す．統計的劣化モデルである混合地盤沈下モデルは，平面メッシュiの時点tにおける地盤沈下量を，地盤沈下パスの荷重和

$$y_i^t = \sum_{k=1}^{K} \omega_i(k) f_i(t,k) + \varepsilon_i \tag{1}$$

と表現できる[1)]．式中，$\omega_i(k)$は，地盤沈下パスkに対して割り当てられた重みであり，

$$\sum_{k=1}^{K} \omega_i(k) = 1 \ (i=1,\cdots,I) \tag{2}$$

が成立する．さらに，ε_iは，測定誤差を表す確率変数であり，互いに独立な１次元正規分布$\mathcal{N}(0,\sigma_i^2)$に従うと仮定する．ここで，重み$\omega_i(k)$がディリクレ分布に，さらに分散パラメータ$\phi_i=\sigma_i^{-2}$がガンマ分布に従うと考える．メッシュ$i$の地盤沈下パス$\boldsymbol{y}_i=(y_i^0,\cdots,y_i^{\bar{T}})$が生起

する確率密度関数$\pi_i(\boldsymbol{y}_i)$は

$$\pi_i(\boldsymbol{y}_i) \propto \phi_i^{\zeta-1/2}\prod_{k=1}^{K}\omega_i(k)^{\alpha_k-1}\exp\left[-\phi_i\left\{\gamma+\frac{1}{2}\varepsilon_i^2\right\}\right] \tag{3}$$

と表される．ただし，α_kはディリクレ分布，ζ,γはガンマ分布の定数パラメータである．この確率密度関数$\pi_i(\boldsymbol{y}_i)$を解析的に求めることは困難であり，モンテカルロシミュレーションにより求める．すなわち，$\omega_i(1),\cdots,\omega_i(K-1),\phi_i$をそれぞれの事前確率密度関数であるディリクレ分布とガンマ分布よりランダム抽出するとともに，y_i^tを正規確率密度関数$N(\sum_{k=1}^{K}\omega_i(k)f_i(t,k),\phi_i^{-1})$よりランダム抽出することで地盤沈下量の確率分布を得る．

(3) 舗装の劣化過程

いま，全平面メッシュに関する地盤沈下サンプルパス$\boldsymbol{y}=(\boldsymbol{y}_1,\cdots,\boldsymbol{y}_I)$が与えられたとする．このようなサンプルパス群に対して，時間断面tにおける各平面メッシュの地盤沈下量を表した地盤沈下量ベクトル$\boldsymbol{y}^t=(y_1^t,\cdots,y_I^t)$を定義する．さらに，時点間$[t,t+1)$のマルコフ推移確率が，時点$t$における地盤沈下量ベクトル$\boldsymbol{y}^t$に依存して定義されると考える．この地盤沈下量ベクトル$\boldsymbol{y}^t$の下で定義されるマルコフ推移確率は，時点tで評価された健全度$h_i^t(\boldsymbol{y}^t)=j$を与件とし，次の時点$t+1$において健全度$h_i^{t+1}(\boldsymbol{y}^t)=l$が生起する条件付確率

$$\mathrm{Prob}[h_i^{t+1}(\boldsymbol{y}^t)=l|h_i^t(\boldsymbol{y}^t)=j]=p_i^{jl,t}(\boldsymbol{y}^t) \tag{4}$$

と定義できる．ただし，期間$[t,t+1)$中は，地盤沈下量は$\boldsymbol{y}^t$のまま一定であると仮定する．さらに，舗装劣化パス上で期間$[t,t+1)$で定義される条件付確率(4)を要素とするマルコフ推移行列を

$$\boldsymbol{p}_i^t(\boldsymbol{y}^t)=\begin{pmatrix} p_i^{11,t}(\boldsymbol{y}^t) & \cdots & p_i^{1J,t}(\boldsymbol{y}^t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & p_i^{JJ,t}(\boldsymbol{y}^t) \end{pmatrix} \tag{5}$$

と定義する．このとき，地盤沈下サンプルパス$\boldsymbol{y}=(\boldsymbol{y}^0,\cdots,\boldsymbol{y}^{\bar{T}})$を与件としたとき，平面メッシュ$i$の$t$期における健全度の確率分布$\boldsymbol{m}_i^t(\boldsymbol{y})=(m_i^{1,t}(\boldsymbol{y}),\cdots,m_i^{J,t}(\boldsymbol{y}))$は

$$\boldsymbol{m}_i^t(\boldsymbol{y})=\boldsymbol{m}_i^0\prod_{s=0}^{t-1}\boldsymbol{p}_i^s(\boldsymbol{y}^s) \tag{6}$$

と表される．ただし，$\boldsymbol{m}_i^0=(1,0,\cdots,0)$である．

(4) 補修・劣化過程

いま，ある地盤沈下サンプルパス$\boldsymbol{y}=(\boldsymbol{y}_1,\cdots,\boldsymbol{y}_I)$に着目する．$t$期の期首におけるコンクリート舗装の状態を$(l^t,\boldsymbol{y}^t)$と表す．$t$期に補修が実施される場合には，$t$期の期首に直ちに補修が実施され，コンクリート舗装の健全度がj^t $(j^t\leq l^t)$に回復する．

つぎに，t期の期首において実施されるコンクリート舗装の補修政策$d\in D$を考える．補修政策は有限個存在し，Dは補修政策の集合である．平面メッシュiの状態が$(l^t,\boldsymbol{y}^t)$のとき,補修政策$d\in D$の下でt期に実施される補修アクションξ_i^{dt}を，補修アクション実施後の劣化水準$\xi_i^{dt}(l^t,\boldsymbol{y}^t)\in\xi_i(l^t,\boldsymbol{y}^t)$を用いて

$$\xi_i^{dt}=\begin{pmatrix} \xi_i^{dt}(1,\boldsymbol{y}^t) \\ \vdots \\ \xi_i^{dt}(J,\boldsymbol{y}^t) \end{pmatrix} \tag{7}$$

と定義する．ただし，ξ_i^{dt}はt期における平面メッシュiの状態$(l^t,\boldsymbol{y}^t)$に対して定義される補修アクションの集合である．

平面メッシュiの補修政策$d\in D$を実施した場合の健全度の推移行列を定義する．補修政策dに基づくアクション内容は平面メッシュの状態$(l^t,\boldsymbol{y}^t)$に対して，アクション実施後の健全度j^tを対応させる関数$\xi_i^{dt}(l^t,\boldsymbol{y}^t)$を用いて記述される．いま，平面メッシュ$i$の状態$(l^t,\boldsymbol{y}^t)$のときに補修政策$d$を適用した場合，平面メッシュ$i$の健全度の推移確率は

$$q_i^{l^tj^t,dt}(\boldsymbol{y}^t)=\begin{cases} 1 & \xi_i^{d,t}(l^t,\boldsymbol{y}^t)=j^t\text{の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \tag{8}$$

$$(l^t=1,\cdots,J;j^t=1,\cdots,l^t)$$

と表される．すなわち，補修が実施された後の健全度(補修が実施されない場合は元の健全度)に確率1で推移する．以上の推移確率を推移確率行列$Q_i^{dt}(\boldsymbol{y}^t)$として整理することにより，

$$\boldsymbol{q}_i^{dt}(\boldsymbol{y}^t)=\begin{pmatrix} q_i^{11,dt}(\boldsymbol{y}^t) & \cdots & q_i^{1J,dt}(\boldsymbol{y}^t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_i^{J1,dt}(\boldsymbol{y}^t) & \cdots & q_i^{JJ,dt}(\boldsymbol{y}^t) \end{pmatrix} \tag{9}$$

を得る．健全度がJである場合，直ちに補修されるため常に$q_i^{JJ,dt}(\boldsymbol{y}^t)=0$が成立する．この場合，補修ルール$d$の下で，$t$期のモニタリング後の状態$(l^t,\boldsymbol{y}^t)$から，補修アクションを実施し，$t+1$期の期首におけるモニタリング実施後の状態$(l^{t+1},\boldsymbol{y}^{t+1})$に推移する確率を表す推移確率行列$P_i^{dt}(\boldsymbol{y}^t)$は

$$\boldsymbol{p}_i^{dt}(\boldsymbol{y}^t)=\boldsymbol{q}_i^{dt}(\boldsymbol{y}^t)\boldsymbol{p}_i^t(\boldsymbol{y}^t) \tag{10}$$

と表される．ただし，推移確率行列$\boldsymbol{p}_i^{dt}(\boldsymbol{y}^t)$は

$$\boldsymbol{p}_i^{dt}(\boldsymbol{y}^t)=\begin{pmatrix} p_i^{11,dt}(\boldsymbol{y}^t) & \cdots & p_i^{1J,dt}(\boldsymbol{y}^t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_i^{J1,dt}(\boldsymbol{y}^t) & \cdots & p_i^{JJ,dt}(\boldsymbol{y}^t) \end{pmatrix} \tag{11}$$

である．

(5) 維持管理契約モデル

いま，t期のモニタリングの結果，平面メッシュiのコンクリート舗装の状態が$(l^t,\boldsymbol{y}^t)$であったとする．補修政策dの下でt期における平面メッシュiの状態$(l^t,\boldsymbol{y}^t)$に対して補修アクション$\xi_i^{dt}(l^t,\boldsymbol{y}^t)$を採用した場合の補修費用を$c_i^d(l^t,\boldsymbol{y}^t)$と表す．平面メッシュ$i$の健全度が$l^t$から$\xi^{dt}(l^t,\boldsymbol{y}^t)=j^t$に改善される場合には補修費用$c_i^d(l^t,\boldsymbol{y}^t)=c_{l^tj^t}$が必要となる．ただし，補修費用には，

通常の維持管理業務に要する費用も含まれる．補修を実施しない場合 ($\xi^{dt}(l^t,\boldsymbol{y}^t)=l^t$が成立する場合) には$c_i^d(l^t,\boldsymbol{y}^t)=c_{l^t l^t}=c$となり，$c$は維持管理費用である．ただし，補修費用は条件

$$c_{j^t j^t}\leq\cdots\leq c_{l^t j^t}\leq\cdots\leq c_{Jj^t} \quad (j^t\leq l^t\leq J; l^t=1,\cdots,J) \tag{12}$$

を満足すると仮定する．条件 (12) は，舗装の劣化水準の悪い方が，同一の劣化水準に回復するための補修費用が大きくなることを意味している．

事業者は，契約期間 $[0,\bar{T}]$ において，期待ライフサイクル費用の最小化を図る．この時，初期時点において達成可能な期待ライフサイクル費用の最小値 $V_i^0(1,\boldsymbol{y}^0)$ は

$$V_i^0(1,\boldsymbol{y}^0)=\min_{d\in D}\left\{E\left[\sum_{t=0}^{\bar{T}}\gamma^t c_i^d(l^t,\boldsymbol{y}^t)\right]\right\} \tag{13}$$

と表される．ただし，γ^tはt期における割引因子である．また，$(l^t,\boldsymbol{y}^t)$ は，それぞれt期のモニタリングにより観測される健全度，および地盤沈下量を表す．ただし，記号$E[\cdot]$は，地盤沈下過程，および舗装の劣化過程に関する期待値操作を表す．したがって，維持管理契約モデルは

$$\min_{d\in D}\left\{E\left[\sum_{t=0}^{\bar{T}}\gamma^t c_i^d(l^t,\boldsymbol{y}^t)\right]\right\} \tag{14a}$$

subject to

$$j^t\leq L\ (t=1,\cdots,\bar{T})$$

と表される．ただし，j^tは補修アクション実施後の健全度，Lは性能基準を表し，式 (14b) は契約期間全体における性能水準に関する制約条件を表している．最後に，各期における健全度の相対的頻度分布は，式 (10) を用いて

$$\boldsymbol{m}_i^{dt}(\boldsymbol{y})=\boldsymbol{m}_i^0\prod_{s=0}^{t-1}\boldsymbol{p}_i^{ds}(\boldsymbol{y}^s) \tag{15}$$

と表現できる．

3. モデルの解法

(1) 最適値関数の導出・期待値操作

最適値関数 (13) は，初期時点で評価した契約期間にわたる期待ライフサイクル費用の現在価値を表している．最適値関数 $V_i^0(1,\boldsymbol{y}^0)$ を展開すれば，

$$V_i^0(1,\boldsymbol{y}^0)=\min_{\xi_i^{d0}(1,\boldsymbol{y}^0)\in\xi^i(1,\boldsymbol{y}^0)}\Big\{c_i^d(1,\boldsymbol{y}^0)+\gamma E\left[V_i^1(l^1,\boldsymbol{y}^1)\right]\Big\} \tag{16}$$

を得る．ただし，γは1期後の割引因子である．記号$E[\cdot]$は，地盤沈下過程分布と舗装の劣化過程に関する期待値操作を表す．最適値関数 (13) を求めるためには，第1期おける最適値関数 $V_i^1(l^1,\boldsymbol{y}^1)$ に関する情報が必要となる．式 (16) において，地盤沈下量及び空港コンクリート舗装の劣化過程に不確実性が介在しており，2種類のリスクが含まれている．期待値関数を求めるためには，これら2種類のリスクに関して最適値関数の期待値を評価することが必要となる．そこで，まず地盤沈下量に関するリスクに着目する．地盤沈下過程がサンプルパス fに従って推移する考えると，サンプルパス fを与件とした部分問題におけるt期の最適値関数 $V_i^{ft}(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})$ は

$$V_i^{ft}(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})=\min_{\xi_i^{dt}(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})\in\xi_i(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})}\Big\{c_i^d(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})+E^\circ\left[V_i^{f,t+1}(l^{t+1},\boldsymbol{y}^{f,t+1})\right]\Big\} \tag{17}$$

と定義できる．記号 $E^\circ[\cdot]$ は，舗装の劣化過程に関する期待値操作を表す．

つぎに，コンクリート舗装の劣化過程のリスクに着目する．

$$E^\circ\left[V_i^{f,t+1}(l^{t+1},\boldsymbol{y}^{f,t+1})\right]=\sum_{l^{t+1}=1}^{J}p_i^{l^t l^{t+1},dt}(\boldsymbol{y}^{ft})V_i^{f,t+1}(l^{t+1},\boldsymbol{y}^{f,t+1}) \tag{18}$$

と表現されることに留意すると，式 (17) は

$$V_i^{ft}(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})=\min_{\xi_i^{dt}(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})\in\xi_i(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})}\Big\{c_i^d(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})+\gamma\sum_{l^{t+1}=1}^{J}p_i^{l^t l^{t+1},dt}(\boldsymbol{y}^{ft})V_i^{f,t+1}(l^{t+1},\boldsymbol{y}^{f,t+1})\Big\} \tag{19}$$

と書き換えることができる．ここで，推移確率 $p_i^{l^t l^{t+1},dt}(\boldsymbol{y}^{ft})$ はサンプルパス f上における補修政策dの下で補修アクション$\xi^{dt}(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})$ に対応して定義される確率推移であり，式 (10) で定義される推移確率行列 $P_i^{dt}(\boldsymbol{y}^{ft})$ の第 (l^t,l^{t+1}) 要素に該当する．

(2) 解法

混合地盤沈下モデル (1),(3) を用いて，地盤沈下過程に関するサンプルパスをランダムに発生させる．地盤沈下過程に関して合計M本のサンプルパスの中で，サンプルパス fに着目すると，サンプルパス f上で定義される再帰方程式 (19) は，通常の確率動的計画問題の再帰方程式に他ならない．$\bar{T}$期における終端条件を用いて，再帰方程式 (19) を後ろ向きに解くことが出来る．契約終了期において，

$$V_i^{f\bar{T}}(l^{\bar{T}},\hat{\boldsymbol{y}}^{f\bar{T}})=\begin{cases}0 & (l^{\bar{T}}=1,\cdots,L)\\ c_{l^{\bar{T}}j^{\bar{T}}} & (l^{\bar{T}}=L+1,\cdots,J)\end{cases} \tag{20}$$

が成立する．ただし，$c_{l^{\bar{T}}j^{\bar{T}}}$は性能基準を満たすために必要な補修費用である．すなわち，$j^{\bar{T}}\leq L$が成り立つ．また，再帰方程式 (19) を終端条件 (20) を用いて最終期から第0期まで解くことによって，各期の最適補修政策を求めることができる．以上で求めた最適補修政策は，地盤沈下パス fに対して定義された最適政策である．このことを明示的に表すために，上記問題の最適政策を $\boldsymbol{\xi}_i^*(\boldsymbol{y}^f)=(\xi_i^{d^*0}(l^0,\boldsymbol{y}^{f0}),\cdots,\xi_i^{d^*\bar{T}}(l^{\bar{T}},\boldsymbol{y}^{f\bar{T}}))$ と表す．こ

のとき，地盤沈下パス f 上における第0期の最適値関数は

$$V_i^{f0}(1,\boldsymbol{y}^{f0}) = c_i^{d^*}(1,\boldsymbol{y}^{f0}) + \gamma E^\circ\left[V_i^{f1}(l^1,\boldsymbol{y}^{f1})\right] \tag{21}$$

と表すことができる．最適値関数 $V_i^{f0}(1,\boldsymbol{y}^{f0})$ は，地盤沈下パス f を既知として求めたものである．しかし，第0期の期首において，地盤沈下過程は未知であり，将来時点で起こりえる地盤沈下過程の不確実性を考慮することが必要となる，すなわち，第0期の期首で評価した期待ライフサイクル費用は

$$V_i^0(1,\boldsymbol{y}^0) = \frac{1}{M}\sum_{f=1}^{M} V_i^{f0}(1,\boldsymbol{y}^{f0}) \tag{22}$$

と表すことができる．

(3) ライフサイクル費用

つぎに，地盤沈下パスごとに得られた最適補修政策を用いてライフサイクル費用を計算する手順を説明する．いま，地盤沈下パス f に対する最適補修政策 $\boldsymbol{\xi}_i^*(\boldsymbol{y}^f) = (\xi_i^{d^*0}(l^0,\boldsymbol{y}^{f0}),\cdots,\xi_i^{d^*\bar{T}}(l^{\bar{T}},\boldsymbol{y}^{f\bar{T}}))$ は地盤沈下パス f 上で定義される再帰方程式 (19) を解くことで得ることができる．ライフサイクル費用を求めるためには，各期の健全度のデータが必要である．しかし，各期における健全度のデータは初期時点においては得ることができない．そこで，t 期の平面メッシュ i の状態が $(l^t,\boldsymbol{y}^{ft})$ のとき，$[0,1]$ の一様分布乱数 u を発生させれば，最適補修政策を実施した場合のマルコフ推移確率 (11) から $t+1$ 期の補修前の健全度のデータが得られる．これを第0期から最終期まで求めることで，各期の健全度と補修アクションから各期の補修費用が求まり，契約期間 $[0,\bar{T}]$ におけるライフサイクル費用を計算することができる．ただし，ここで得られたライフサイクル費用は，地盤沈下パス f に対して舗装劣化パス1本で定義されたものである．そこで，地盤沈下パス M 本に対して舗装劣化パスをそれぞれ N 本発生させることにより，合計 MN 本のライフサイクル費用を得ることができる．以上の操作により，地盤沈下と舗装劣化の不確実性を考慮したライフサイクル費用の分布を算出することが可能となる．さらに，ライフサイクル費用に関する各種の統計量を求めることで，ライフサイクル費用リスクを定量的に評価可能となる．

4. 補修政策の更新

(1) モニタリング情報

最適補修モデルは，地盤沈下過程，舗装劣化過程の不確実性を考慮した確率的動学モデルとして定式化できる．このうち，地盤沈下過程は，混合地盤沈下モデルを用いて地盤沈下パスの確率分布モデルとして表現される．一方，舗装劣化過程は非斉次マルコフ劣化モデルとして記述される．いま，空港供用開始後の任意の期間 t に着目し，その期までのモニタリング情報 $\bar{\boldsymbol{y}}_i^{0,T} = \{\bar{y}_i^0,\cdots,\bar{y}_i^T\}$, $\bar{\boldsymbol{h}}_i^{0,T} = \{\bar{h}_i^0,\cdots,\bar{h}_i^T\}$ に基づいて，混合地盤沈下モデル，マルコフ劣化モデルをベイズ更新し，最新のモデルが得られた場合を想定する．混合地盤沈下モデルとマルコフ劣化モデルのベイズ更新方法に関しては，紙面の都合上省略するが，詳細については参考文献[2),3)]を参照されたい．

(2) 補修政策の更新

時点 T までの地盤沈下量，舗装健全度に関するモニタリング情報ベクトル $\bar{\boldsymbol{y}}_i^{0,T}$, $\bar{\boldsymbol{h}}_i^{0,T}$ が得られ，地盤沈下過程，舗装の劣化過程がベイズ更新されたとする．終端条件 (20) を用いて最終期から T 期まで繰り返し解くとき，時点 T でベイズ更新した混合地盤沈下モデル，マルコフ劣化モデルを用いることで，T 期以降の最適補修政策を修正することができる．混合地盤沈下モデル，マルコフ劣化モデルをベイズ更新することで，地盤沈下過程，舗装の劣化過程の予測の精度を向上させることが可能となり，空港運営後の地盤沈下や舗装劣化の実態により則した最適補修政策，ライフサイクル費用を求めることができる．

5. おわりに

本研究では，海上空港における性能規定型維持補修契約を対象とした空港舗装マネジメントモデルを提案した．空港地盤の不同沈下過程がコンクリート舗装の劣化過程に影響を及ぼすため，空港地盤の不同沈下リスク，コンクリート舗装の疲労破壊という2種類のライフサイクル費用リスクに着目し，これら2種類のリスクを考慮したようような非斉次マルコフ決定モデルを定式化し，これを用いて期待ライフサイクル費用を算出，最適補修政策を策定し，ライフサイクル費用を算出した．また，空港供用後の地盤沈下や舗装劣化に関するモニタリング情報によって，地盤沈下過程，舗装の劣化過程のベイズ更新を行い，それを用いて最適補修政策の更新を試みた．なお，著者らはすでに，実際の海上空港を対象とした実証分析を実施しているが，実証分析に関しては，紙面の都合上，講演会当日に報告させて頂きたい．

参考文献

1) 下村泰造，小濱健吾，貝戸清之，小林潔司：空港舗装のアセットマネジメントのためのハイブリッド型地盤沈下モデル，土木学会論文集F（投稿中）．
2) 貝戸清之，小林潔司：マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定，土木学会論文集A，Vol.63, No.2. pp.336-355, 2007.
3) 下村泰造，小林潔司，小濱健吾，貝戸清之：空港コンクリート舗装のハイブリッド劣化モデル，第38回土木計画学研究・講演集，土木学会，2008（投稿中）．