

2010.06.23

SCOPE
平成22年度研究開発助成成果報告会
@ 尚友会館

**ハイブリッド劣化予測モデルに基づく
空港コンクリート舗装の最適補修戦略**

大阪大学大学院 貝戸清之
kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

アセットマネジメント

マネジメントとは、
サイエンスではなく、
エンジニアリングでもなく、
アートである。

科学：一定領域の対象を客観的な方法で系統的に研究する活動。また、その成果の内容。
工学：役に立つ生産物を得るために、計画・設計・製造・検査の段階に基礎的科学を応用する技術の総称。
芸術：独特の表現様式によって美を創作・表現する活動。
岩波 国語辞典

2

万人が認めるアート

カントやロールズなどの近代の思想家たちは、「善」や「美德」といった倫理的な問題は、今日、人々が意見の一致を見ることはなく、権利や義務という、人々が合意できる領域で議論を構成していくべきだと考えてきた。
NHKハーバード白熱教室 ウェブサイト

現実
インプット

理想
アウトプット

工学
科学

点検データを用いた意思決定モデル
確率論、数理統計学

3

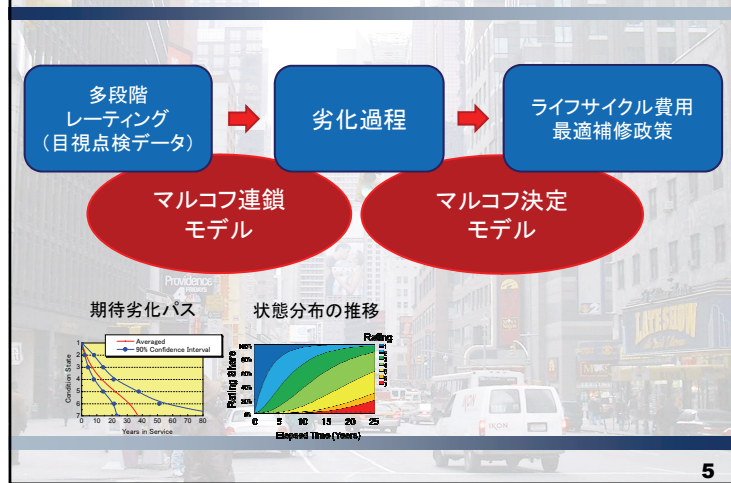
アセットマネジメントの本質（私見）

経験に基づく知識（暗黙知）のモデル化

一般的に言って、論理的な推論は、そのひとつひとつを取り出してみると、確実ではあるのだけれど、なんだかあたりまえで有難みのないものになっています。ところが、そんなふうにひとつひとつはあほらしいぐらいあたりまえのステップが積み重ねられていくことによって、最初は思ってもみなかったような結論へと到達するということがあるのです。
野矢茂樹：入門！論理学、中公新書、2006.

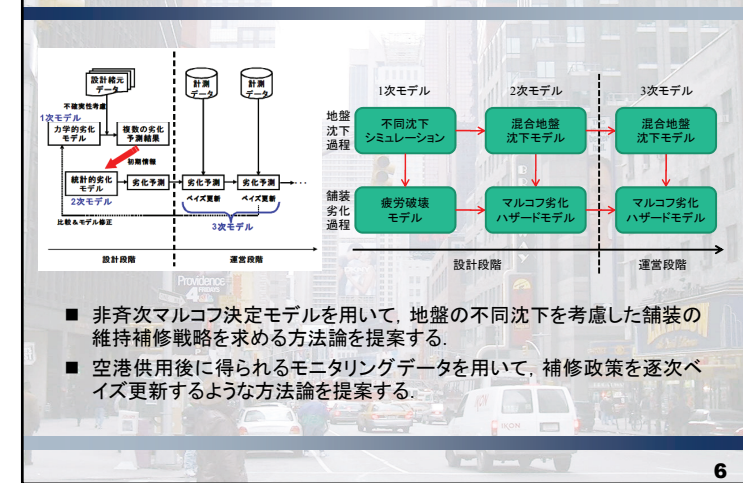
4

Visual Inspection Based Asset Management



5

ハイブリッド劣化モデル



6

地盤沈下過程 (2次モデル)

メッシュ $i (i=1, \dots, I)$

対象とする粘性土層土質定数: $X_i (i=1, \dots, I)$

経過年数(年)

沈下量(mm)

混合地盤沈下モデル 地盤沈下パス (1次モデル)

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

測定誤差を表す確率変数 ϵ_i 1次元正規分布 $N(0, \sigma^2)$ に従うと仮定

重みパラメータ $\omega_i(k)$ がディリクレ分布に従うと仮定

$$D(\omega_i | \alpha) = \Psi(\alpha) \prod_{k=1}^K \{\omega_i(k)\}^{\alpha_k - 1}$$

$$\Psi(\alpha) = \frac{\Gamma(\sum_{k=1}^K \alpha_k)}{\prod_{k=1}^K \Gamma(\alpha_k)}$$

分散パラメータ $\phi_i (= \sigma_i^2)$ がガンマ分布に従うと仮定

$$g(\phi_i | \zeta, \gamma) = \frac{\gamma^\zeta}{\Gamma(\zeta)} \phi_i^{\zeta-1} \exp(-\gamma \phi_i)$$

メッシュ i の地盤沈下サンプルパス $\hat{y}_i$ が生じる確率密度関数

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

7

舗装劣化過程 (2次モデル)

健全度	区分	凹凸深さ (mm)
1	A	1.1 未満
2	B1	1.1 ~ 4.4
3	B2	4.4 ~ 7.8
4	B3	7.8 ~ 11.1
5	C	11.1 以上

注: 空車補修(保守)策においては、A: 補修の必要なし、B: 軽微な補修が望ましい、C: できるだけ早急に補修の必要があるという3段階のレーティングによって管理しているが、本研究においては、上記Bランクを更に3段階に等分し、5段階のレーティング指標とした。

経過年数(年)

凹凸深さ(mm)

マルコフ劣化ハザードモデル

$$p_i^{l,d}(\hat{y}^t) = \text{Prob}[h_i^{l+1}(\hat{y}^t) = j | h_i^l(\hat{y}^t) = i]$$

ハザード率

$$\lambda_i^{j,d}(\hat{y}^t) = \frac{\lambda_i^{j,d}}{\lambda_i^{i,d} - \lambda_i^{i,d} \prod_{s=i}^{j-1} \lambda_i^{s,d} \exp(-\lambda_i^{s,d})}$$

マルコフ推移確率行列

$$P_i^l(\hat{y}^t) = \begin{pmatrix} p_i^{11,d}(\hat{y}^t) & \dots & p_i^{1J,d}(\hat{y}^t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & p_i^{JJ,d}(\hat{y}^t) \end{pmatrix}$$

ハザード率

$$\lambda_i^{j,d}(\hat{y}^t) = \lambda_i^{j,d} + \lambda_i^{j,d} \lambda_i^{j+1,d} + \dots$$

未知パラメータ

未知パラメータの事後分布

$$\psi(\beta | \mathcal{D}) \propto \prod_{j=1}^{J-1} \prod_{l=1}^L \prod_{i=1}^I \left\{ \sum_{s=i}^{j-1} \frac{\lambda_i^{s,d}(r)}{\lambda_i^{i,d}(r)} \exp(-\lambda_i^{s,d}(r)) \right\}^{\hat{y}_i^{j,d}(r)}$$

1次モデルの推計結果

8

バイズ更新(3次モデル)

✓ 地盤沈下過程

$$\psi(\omega_i, \phi_i | \mathbf{y}_i^{0:T}) \propto \mathcal{L}(\mathbf{y}_i^{0:T} | \omega_i, \phi_i) D(\omega_i | \alpha) g(\phi_i | \zeta, \gamma) \\ \propto \phi_i^{\zeta + (T-1)/2} \exp \left[-\gamma + \frac{1}{2} \sum_{t=0}^T \left(\bar{y}_i^t - \sum_{k=1}^K \omega_i(k) f_i(t, k) \right)^2 \right] \prod_{k=1}^K \omega_i(k)^{\alpha_k - 1}$$

✓ 誤差項

$$\tilde{\varepsilon}_i^T(n) = \bar{y}_i^T - \sum_{k=1}^K \bar{\omega}_i^n(k) f_i(T, k)$$

✓ 混合地盤沈下モデル(3次モデル)

$$\bar{y}_i^{t,n}(T) = \sum_{k=1}^K \bar{\omega}_i^n(k) f_i(t, k) + \tilde{\varepsilon}_i^T(n)$$

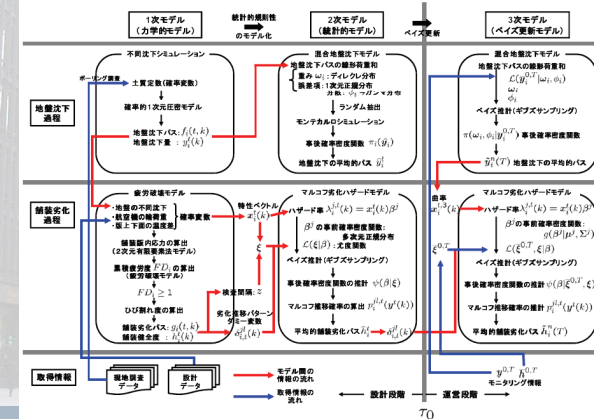
✓ 舗装劣化過程

✓ 事後分布

$$\psi(\beta^T | \bar{x}^{0:T}, x) \propto \prod_{j=1}^{J-1} \prod_{l=1}^J \prod_{i=1}^J \left[\prod_{r=1}^T \left\{ \sum_{v=j}^l \prod_{s=j, s \neq v}^{l-1} \frac{\bar{\lambda}_i^s(r)}{\bar{\lambda}_i^s(r) - \bar{\lambda}_i^v(r)} \exp(-\bar{\lambda}_i^v(r)) \right\}^{\delta_i^j(r)} \right] \\ \cdot \prod_{j=1}^{J-1} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\beta^{j,T} - \mu^j) (\Sigma^j)^{-1} (\beta^{j,T} - \mu^j)^T \right\}$$

9

ハイブリッド劣化モデルの構造



10

ライフサイクル費用評価

✓ 最適値関数

$$\min_{s \in S} \left\{ E \left[\sum_{i=0}^T \gamma^i c_i^s(h_i^s, y^i) \right] \right\}$$

$$\text{subject to } h_i^s < J \quad (i = 1, \dots, T-1) \\ h_i^s \leq Z \quad (i = 1, \dots, I)$$

性能規定条件

終端条件

✓ メッシュの最適値関数

$$V_i^0(1, y^0) = \min_{s \in S} \left\{ E \left[\sum_{i=0}^T \gamma^i c_i^s(h_i^s, y^i) \right] \right\} \\ = \min_{\xi^0(1, y^0) \in \xi(1, y^0)} \left\{ c_i^0(1, y^0) + \gamma E \left[V_i^1(h_i^1, y^1) \right] \right\}$$

✓ 地盤沈下過程に関するリスクに着目

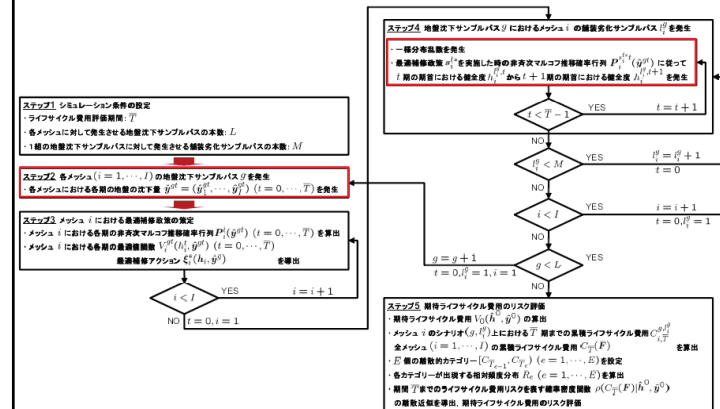
$$V_i^0(1, y^0) = \frac{1}{L} \sum_{g=1}^L \min_{\xi^0(1, y^0) \in \xi(1, y^0)} \left\{ c_i^0(1, \bar{y}^{g0}) + \gamma E^g \left[V_i^1(h_i^1, \bar{y}^{g1}) \right] \right\} \\ = \frac{1}{L} \sum_{g=1}^L V_i^{g0}(1, \bar{y}^{g0})$$

✓ 舗装劣化過程に関するリスクに着目

$$V_i^{g0}(h_i^1, \bar{y}^{g0}) = \min_{\xi^0(h_i^1, \bar{y}^{g0}) \in \xi(h_i^1, \bar{y}^{g0})} \left\{ c_i^0(h_i^1, \bar{y}^{g0}) + E^g \left[V_i^{g+1}(h_i^{g+1}, \bar{y}^{g+1}) \right] \right\} \\ E^g \left[V_i^{g+1}(h_i^{g+1}, \bar{y}^{g+1}) \right] = \sum_{h_i^{g+1}=1}^J p_{h_i^{g+1}}^{h_i^1, \bar{y}^{g0}}(\bar{y}^{g0}) V_i^{g+1}(h_i^{g+1}, \bar{y}^{g+1})$$

11

ライフサイクル費用評価の手順



12

適用事例

- H空港のエプロン部を対象とし、合計544個のメッシュに分割
- 維持管理対象期間:30年
- 空港コンクリート舗装を5段階の劣化状態で評価
- 維持費用を除いた補修費用および補修内容

劣化状態	補修費用(単位:万円)	補修費用
2	27.9	ひび割れ部注入補修
3	61.9	ひび割れ部注入補修
4	95.9	ひび割れ部注入補修
5	3238.4	NC舗装版打ち換え補修

注)但し、ひび割れ部注入補修に用いられる注入剤の耐用年数は5年

- 割引率として4%を採用

- 以下の仮想的な2ケースについて分析

- ✓ ケース1:地盤沈下過程の観測値が期待値から乖離している場合
地盤沈下サンプルバス100本、舗装劣化サンプルバス100本を発生させる
- ✓ ケース2:舗装劣化過程が初期時点の想定より早く進行する場合
地盤沈下サンプルバス1本、舗装劣化サンプルバス10000本を発生させる

13

分析結果(初期時点)

表 4-2 マルコフ劣化ハザードモデル(2次モデル)の推計結果

健全度 j	定数項 $\beta^{j,1}$	交通量 $\beta^{j,2}$	曲率 $\beta^{j,3}$
1	-1.761 (1.937)	—	4.035 (0.8441)
2	-2.467 (0.4712)	0.7550 (0.7014)	2.163 (0.1758)
3	-1.634 (0.1149)	—	1.019 (0.2358)
4	-2.156 (0.9966)	—	0.6506 (1.195)

注) 括弧内は Geweke 検定統計量⁸⁵⁾を表す。また、交通量は時点 $t=30$ における交通量を、曲率は当該サンプルにおける曲率の最大値を1として基準化している。

表 4-3 期待値バス上の最適補修政策(初期時点)

再計画時点	健全度 h_{11}^i	30期 $\xi_{31}^i(h_{11}^i)$	それ以外 $\xi_{31}^i(h_{11}^i)$
0期	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
	5	1	1

注) 30期では健全度5のときにのみ補修を行う事後補修政策が、それ以外の期では予防補修政策が最適補修政策として採用される。

14

分析結果(ケース1)

- 地盤沈下過程に関するベイズ更新

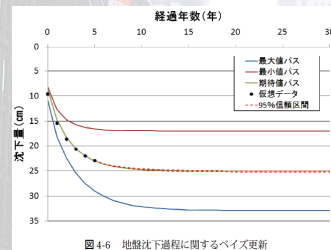


図 4-6 地盤沈下過程に関するベイズ更新

- ✓ ベイズ更新を行った結果、予測される地盤沈下バスの信頼領域の幅が狭まっている。

表 4-4 最適補修政策のベイズ更新結果(期待値バス)

再計画時点	健全度 h_{11}^i	30期 $\xi_{31}^i(h_{11}^i)$	それ以外 $\xi_{31}^i(h_{11}^i)$
1, 2期	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
	5	1	1
3期	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
	5	1	1
再計画時点	健全度	8~15,30期	それ以外
	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
再計画時点	健全度	8~15,30期	それ以外
	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
再計画時点	健全度	8~20,30期	それ以外
	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
再計画時点	健全度	8~20,30期	それ以外
	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
再計画時点	健全度	8~25,30期	それ以外
	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
再計画時点	健全度	8~25,30期	それ以外
	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
再計画時点	健全度	8~30期	それ以外
	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
再計画時点	健全度	8~30期	それ以外
	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1

15

分析結果(ケース1)

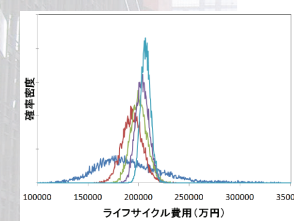


図 4-7 LCCのリスク評価(その1)

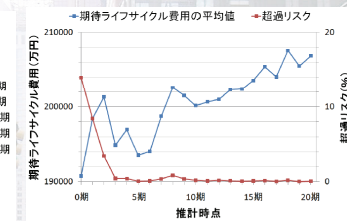


図 4-8 期待LCCと予算超過リスク(その1)

- 期を経るごとにLCCの確率分布の分散も小さくなっていく。
- LCCの確率分布の平均値は、時間の経過に従って大きくなる(確率分布が右にシフトする)
- 時間が経過するごとに条件付きLCCの期待値は増加するが、累積維持補修費用が22億5,000万円を超過するリスクは時間が経過しても増加していない。
- 地盤沈下過程に関するベイズ更新は、最悪シナリオを回避するのに有効であることを示している。

16

分析結果(ケース2)

舗装劣化過程に関するベイズ更新

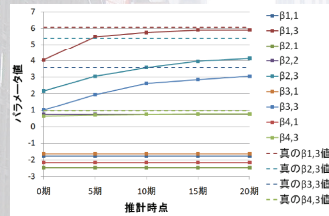


図 4-9 マルコフ劣化モデルの学習過程

- 更新によって推計したパラメータ値の期待値が、時間が経過するにしたがって仮想的マルコフ劣化モデルのパラメータ値に近づいていることが読み取れる。

表 4-6 最適補修政策のベイズ更新

再計画時点	健全度	30期	それ以外
	$\hat{H}_t^0$	$\hat{H}_t^{30}$	$\hat{H}_t^{30+}$
5期	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
	5	1	1
10期	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
	5	1	1
15期	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
	5	1	1
20期	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	1
	5	1	1

17

分析結果(ケース2)

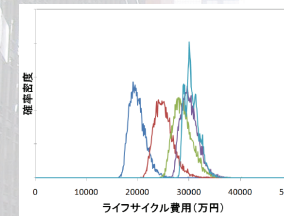


図 4-10 LCCのリスク評価(その2)

- LCCの確率分布は右方向に推移している。
- 初期時点で推計したマルコフ劣化ハザードモデルでは不同沈下が舗装の劣化に与える影響を過小評価していることを示している。

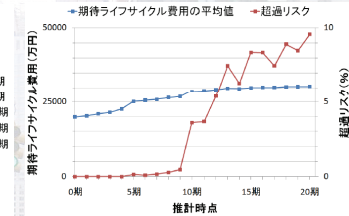


図 4-11 期待LCCと予算超過リスク(その2)

- 時間が経過するに従って、条件付きLCCの期待値が増加し、10期以降において累積維持補修費用が3億2,500万円を超過するリスクが増加している。
- コンクリート舗装の疲労破壊に関しては、契約終了期間に近づくにつれて費用超過リスクが顕在化していく。

18

成果と課題

- 2種類のリスクを考慮しながら期待ライフサイクル費用を最小にするような最適維持補修政策を求める非斉次マルコフ決定モデルを提案した。
- モニタリングデータを用いて、混合地盤沈下モデルやマルコフ劣化モデルをベイズ更新することにより、最適補修政策やライフサイクル費用評価の精度を改善することが可能である。
- 実モニタリングデータを用いたベイズ更新を行い、モデルの実用性について検討すること。
- ライフサイクル費用の最適化を図るためには、舗装構造の設計と維持補修政策の最適化を達成すること。
- 将来の学習過程も考慮に入れた上で、現時点における補修政策を最適化するような方法論の構築。

19