ファクターメソッド
(Factor Method)

耐用年数算定方法

- 推定耐用年数

＝リファレンス耐用年数×A×B×C×D×E×F×G

A:構成材の品質
B:設計のレベル
C:施工のレベル
D:内部環境
E:外部環境
F:使用条件
G:保全のレベル

リファレンス耐用年数

- 部材･材料などが標準的な仕様、たとえば建築学会仕様書に基づいて、地域環境(劣化環境)が他の地域に比して極端ではない地域に施工された場合に予測される年数
  - エキスパートの知見に基づく
    - 結果とともに第三者評価が可能な記録の付記が必要
  - 耐久性能データ(実験･実証結果)に基づく
  - 耐用性能データ(調査診断結果)に基づく

Factor Methodによる鉄骨造住宅の耐用年数予測

- 耐用年数

＝(材料自体の耐久性)×(劣化環境条件)
×(施工条件)×(維持管理条件)

- $Y=Y_S+Y_Z+Y_P=(Y_{0S}+Y_{0Z}+Y_{0P})\times B\times C\times M$

$Y_S=Y_{0S}\times B\times C\times M$:表面無処理鋼材の耐用年数
$Y_Z=Y_{0Z}\times B\times C\times M$:亜鉛めっきの耐用年数
$Y_P=Y_{0P}\times B\times C\times M$:塗膜の耐用年数

材料自体の耐久性

- 表面無処理鋼材のリファレンス耐用年数

$$Y_{0S} = \frac{0.1 \times t}{N \times \alpha_S}$$

t：鋼材の板厚（mm）
N：部材の断面形（不明の場合N=2）
N=1：断面の片側から腐食するもの
N=2：断面の両側から腐食するもの
α_S：鋼材の年間腐食量（mm/年）、定数=0.05

- 亜鉛めっきのリファレンス耐用年数

$$Y_{0Z} = \frac{0.9 \times z}{N \times \alpha_Z}$$

z：片面の亜鉛めっき付着量（g/m^2）
N：部材の断面形（断面の片側から腐食）、定数=1
α_Z：亜鉛めっきの標準的な年間腐食量（g/m^2・年）、定数=11

- 塗膜の標準耐用年数

$$Y_{0P} = 5.0 \quad (year)$$

エポキシ樹脂プライマー（1回塗り）＋エポキシ樹脂エナメル（1回塗り）

部位劣化係数、施工係数、維持保全係数

- 部位劣化係数
  - $B_S = BK_S \times BX_S$
  - $B_Z = BK_Z \times BX_Z$
  - $B_P = BK_P \times BX_P$
  - BK_S、BK_Z、BK_P：部位係数（一般部：1.0、柱脚：0.7）
  - BX_S、BX_Z、BX_P：露出度係数（屋外：1.0、屋内・常時乾燥：7.0）
- 施工係数
  - $C_S=C_Z=C_P=1.0$
- 維持保全係数
  - $M_S=M_Z=M_P=1.0$

鉄骨造住宅の耐用年数

- 一般部

$Y=Y_S+Y_Z$
$=Y_{0S} \times B_S \times C_S \times M_S+Y_{0Z} \times B_Z \times C_Z \times M_Z$
$=2.3 \times 1.0 \times 7.0 \times 1.0 \times 1.0+10.6 \times 1.0 \times 7.0 \times 1.0 \times 1.0$
=90.3年

- 最下階の柱脚部

$Y=Y_S+Y_Z+Y_P$
$=Y_{0S} \times B_S \times C_S \times M_S+Y_{0Z} \times B_Z \times C_Z \times M_Z+Y_{0P} \times B_P \times C_P \times M_p$
$=2.3 \times 0.7 \times 7.0 \times 1.0 \times 1.0+10.6 \times 0.7 \times 7.0 \times 1.0 \times 1.0$
$+5.0 \times 0.7 \times 7.0 \times 1.0 \times 1.0$
=87.7年

確率論的モデル

信頼性評価法
モンテカルロ・シミュレーション法

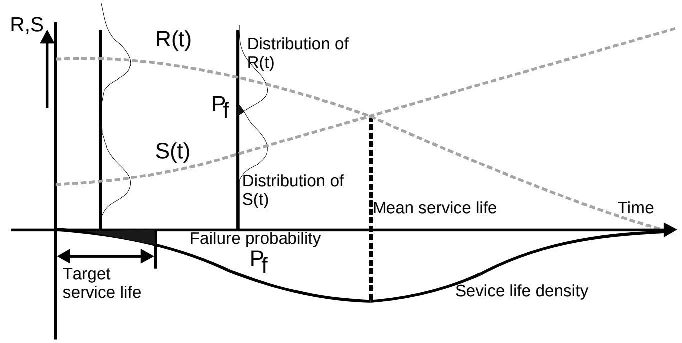
信頼性評価法

- 信頼性評価の目的
  - 工学システムの供用寿命またはある規定された寿命を通じて、事象（R：抵抗力>S：外力）を保証すること
  - 保証は、確率P（R>S）によって可能
  - 抵抗力（強度）と外力（作用荷重）を確率変数としてモデル化
  - 余事象1-P（R>S）は破壊（故障）確率
  - 限界状態関数g(x,t)

$$g(x,t)=R(t)-S(t)$$ g(x,t)>0：安全、g(x,t)<0：破壊

$$P_f(T)=1-P\{g(x,t)>0 \text{ for all } t\in[0;T]\}$$

故障確率と目標耐用年数



信頼性関数

- 信頼性関数Z、平均値μ_z、標準偏差σ_zの一般表記

$$Z\approx g(x)=a_0+a_1x_1+a_2x_2+\ldots\ldots+a_nx_n$$

$$\mu_Z=g(\mu_{x1},\mu_{x2},\mu_{x3},\ldots\ldots,\mu_{xn})$$

$$\sigma_Z{}^2=(\partial g/\partial x_1\cdot\sigma_{x1})^2+(\partial g/\partial x_2\cdot\sigma_{x2})^2+$$
$$\ldots\ldots+(\partial g/\partial x_n\cdot\sigma_{xn})^2$$

故障確率P_fの算出

- 信頼性関数　Z=R-S
- 信頼性関数が正規分布の場合
  - 平均値　　$\mu_z=\mu_R-\mu_s$
  - 標準偏差　$\sigma_z=(\sigma_R{}^2+\sigma_s{}^2)^{1/2}$
- 故障確率P_f

$$P_f=\Phi(-\mu_Z/\sigma_Z)=\Phi(-\beta)$$

  - β（信頼性指数）= μ_z/σ_z

信頼性指数βと故障確率P_fの関係

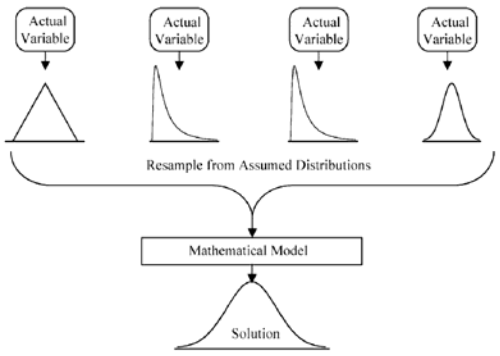
β	P_f
1.00	5.000×10^{-1}
1.28	1.000×10^{-1}
1.50	0.668×10^{-1}
1.80	0.359×10^{-1}
2.00	0.227×10^{-1}
2.32	1.000×10^{-2}
3.09	1.000×10^{-3}
5.20	1.000×10^{-7}

モンテカルロシミュレーション（1）

- 確率分布が既知（または仮定）の場合
- 1回のシミュレーションで、確率分布によって発生させた確率変数の値（または組）を使用
- シミュレーションを複数回繰り返し、複数個の解標本を導出
- 結果をヒストグラムで表示可能、統計的推測の方法を適用可能
- コンピュータを用いて実行する場合に効果的
- 複雑な系に対応

モンテカルロシミュレーション（2）

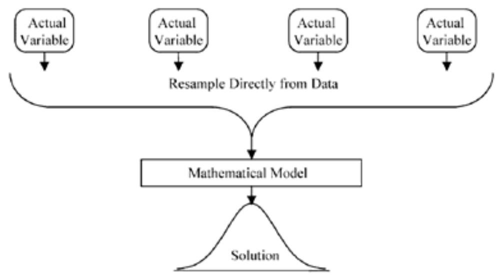
確率分布が既知の場合



Parametric Bootstrap

モンテカルロシミュレーション（3）

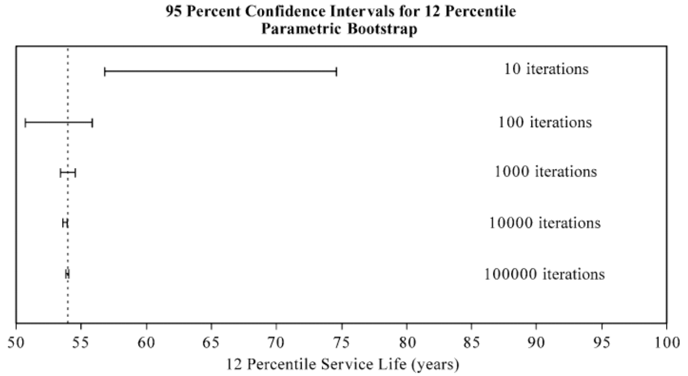
データが既知の場合



Simple Bootstrap

モンテカルロシミュレーション（4）

試行回数と95%信頼区間の変化



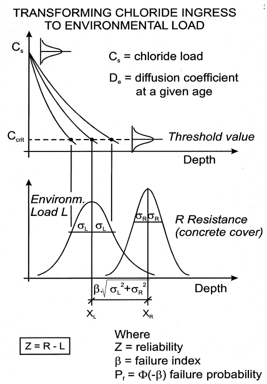
モンテカルロシミュレーション（5）

モンテカルロ法による耐用年数予測の例

コンクリート構造物の塩害を対象とした確率論的モデルの適用（1）

- コンクリート中の鉄筋の発錆時期あるいは腐食確率などの推定
- 入力変数（実測値や信頼できる資料）
  - コンクリートのかぶり厚さ
  - コンクリート表面の塩分濃度
  - 塩分拡散係数
  - 鉄筋の発錆限界塩分濃度

コンクリート構造物の塩害を対象とした確率論的モデルの適用（2）



$$C(x,t)=(C_s-C_i)\left\{1-erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D\cdot t}}\right)\right\}+C_i$$

C(x,t)：時間t、深さxにおける塩分濃度

C_i：初期の塩分濃度

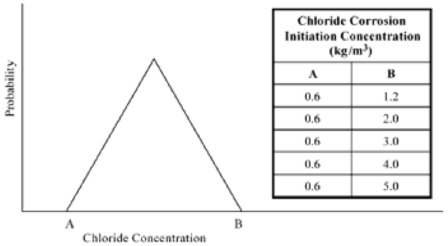
C_s：コンクリート表面の塩分濃度

erf：誤差関数

D：見掛けの塩分拡散係数

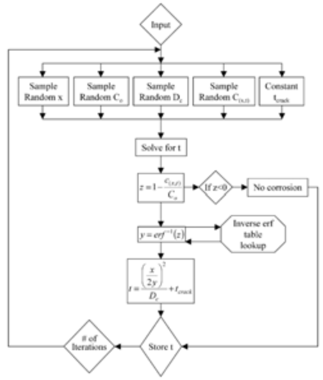
コンクリート構造物の塩害を対象とした確率論的モデルの適用（3）

Variable	Distribution	μ	V
d_c (cm)	Normal	3.66	45%
C_s (kg/m^3)	Lognormal	4.56	40%
D_a (cm^2/year)	Lognormal	0.51	30%
C_{th} (kg/m^3)	Lognormal	1.35	10%



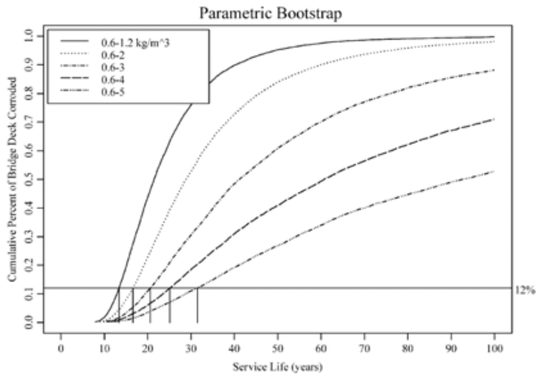
Chloride Corrosion Initiation Concentration (kg/m^3)	
A	B
0.6	1.2
0.6	2.0
0.6	3.0
0.6	4.0
0.6	5.0

コンクリート構造物の塩害を対象とした確率論的モデルの適用（4）



- ひび割れ発生
  ＝補修時期
  ＝鉄筋腐食確率12%

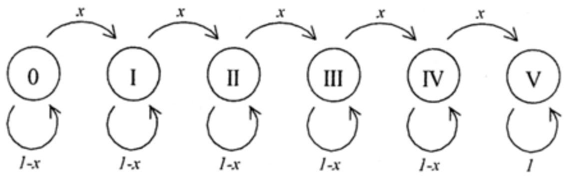
コンクリート構造物の塩害を対象とした確率論的モデルの適用（5）



マルコフ連鎖モデル

マルコフ連鎖モデルの位置づけ

- 劣化現象自体を確率的な過程とみなし、劣化現象自体を説明するモデル
  - 各劣化状態の変化・進行自体を確率的に表現
  - 厳密な劣化メカニズムや作用因子が明らかでない場合に有用



確率過程

- 時間の推移とともに刻々と変化してゆくさまざまな現象
  - 天候
  - 地震の発生
  - 生物学的遺伝
  - 株価
  - 為替

マルコフ過程

- 未来の挙動が現在の状態だけで決定され、過去の状態とは無関係であるという性質をもつ確率過程
  - 毎日午前10時のニューヨーク市場における円相場の変動
  - 百貨店での毎日の閉店時におけるある商品の在庫の変動
  - 毎日午後6時の気温、湿度、雲量など気象現象の変動
  - 毎日の血圧、脈拍数などの変動

マルコフ連鎖モデル（1）

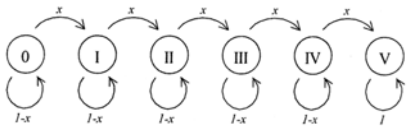
- マルコフ過程の中でも扱う状態が離散的である場合のモデル
  - 任意のn、任意の状態 j_0, j_1, j_2, ･･･j_k, に対して下式が成立

$$P\left(X_{n+1}=k \middle| X_0=j_0, X_1=j_1, \cdots, X_{n-1}=j_{n-1}, X_n=j,\right)$$
$$=P\left(X_{n+1}=k \middle| X_n=j\right)$$

  - $\{X_n\}$ が離散的

マルコフ連鎖モデル（2）

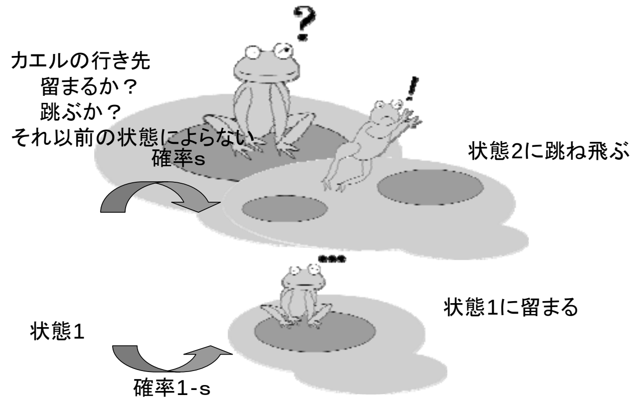
- 一般的なマルコフ連鎖推移図



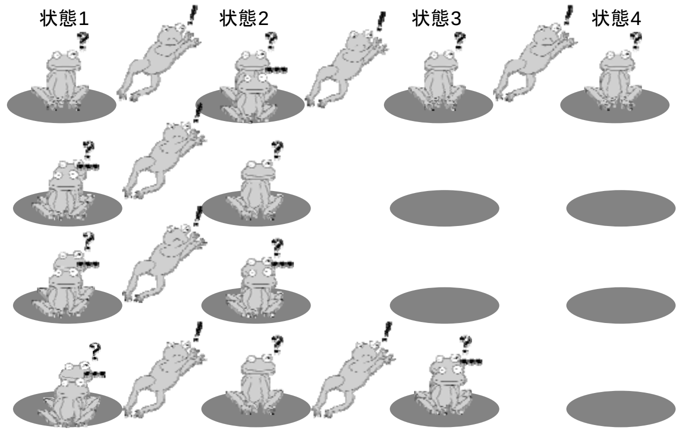
- 遷移マトリクスによる状態予測

$$\begin{bmatrix}X_{\Psi 1t}\\X_{\Psi 2t}\\X_{\Psi 3t}\\X_{\Psi 4t}\\X_{\Psi 5t}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1-X_1&0&0&0&0\\X_1&1-X_2&0&0&0\\0&X_2&1-X_2&0&0\\0&0&X_3&1-X_3&0\\0&0&0&X_4&1-X_4\end{bmatrix}^t\cdot\begin{bmatrix}X_{\Psi 1t=0}\\X_{\Psi 2t=0}\\X_{\Psi 3t=0}\\X_{\Psi 4t=0}\\X_{\Psi 5t=0}\end{bmatrix}$$

マルコフ連鎖モデル（3）

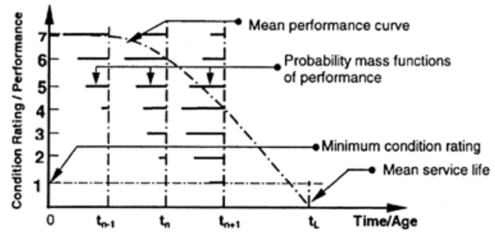


マルコフ連鎖モデル（4）



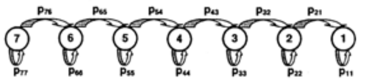
マルコフ連鎖モデルによる耐久性予測

- マルコフ連鎖モデルの適用により劣化状態の推移や分布が明らかとなる
- 遷移マトリクスを定めるデータをいかに得るかが重要



屋根防水への適用事例（1）

- マルコフ連鎖推移図



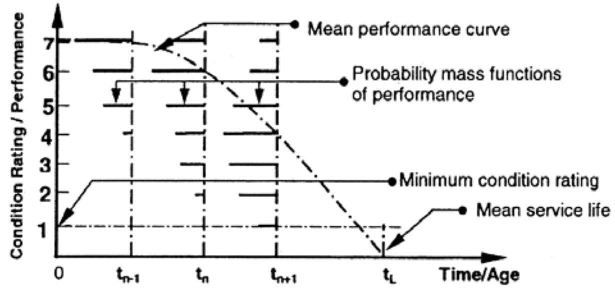
- ROOFERシステム[1)]を用いた状態等級の決定

BELCAM condition rating	Description	"Roofer" condition index
7	Excellent	86–100
6	Very good	71–85
5	Good	56–70
4	Fair	41–55
3	Poor	26–40
2	Very poor	11–25
1	Failed	0–10

1) Bailey他 ROOFER:An engineered management system for bituminous built-up roofs

屋根防水への適用事例（2）

- 状態の推移、各時点における状態分布
- 耐用年数の予測



屋根防水への適用事例（3）