

舗装構造の最適調査・補修更新政策  
に関する研究

平成23年2月23日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

松村泰典

## 要 旨

現在，日本に現存する自動車道は設置されてより30~50年が経ち，施設運営者は補修・更新の意思決定を迫られる時代へと変遷してきている．そういった背景から長期的運営を考えるにあたって，最適な調査間隔と，更新の意思決定に用いる管理基準を設けることが必要となる．一言に舗装構造の劣化と言っても，定期的に行われている路面性状調査から当該舗装構造全体の劣化具合が分かるというものではない．舗装構造物の劣化過程は路面の健全度の劣化過程と舗装構造自体の耐荷力の低下過程とで構成される複合的過程である．また，耐荷力の低下は路面の健全度劣化に影響を及ぼす．路面の健全度は路面性状調査により観察される．一方で路面の健全度と異なり，舗装構造の耐荷力の低下具合はFWD調査等により部分的に観察可能である．本研究では舗装構造の耐荷力に依存した路面の健全度の劣化過程を混合マルコフ過程として記述する．そのうえで，補修・更新政策を考慮した劣化推移確率を用いて期待ライフサイクル費用を最小化するような最適調査間隔と補修政策を同時に決定する最適調査・補修政策モデルを提案する．さらに，具体的にT自動車道を対象とした適応事例を通じて，当モデルの適用例を明示する．

# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	本研究の基本的な考え方	3
2.1	従来の研究概要	3
2.2	劣化過程の不確実性と調査の目的	4
2.3	調査・補修スキーム	5
2.4	リスク費用管理曲線	6
第3章	舗装構造の劣化過程のモデル化	8
3.1	前提条件	8
3.2	耐荷力の低下過程	9
3.3	路面の劣化過程	11
3.4	舗装全体の劣化過程	12
第4章	最適調査・補修更新モデル	14
4.1	モデル化の前提条件	14
4.2	舗装の劣化・補修過程	15
4.3	定式化	17
4.4	解法	19
第5章	適用事例	21
5.1	適用事例の概要	21
5.2	マルコフ劣化ハザードモデルの作成	22
5.3	最適調査・補修更新モデルの分析結果	23
5.4	感度分析	26
第6章	おわりに	28
	参考文献	29

付録A 隠れマルコフ劣化モデルの概要	付-1
A.1 本研究の階層的隠れマルコフ劣化構造 . . . . .	付-1
付録B 付図	付-4

## 第1章 はじめに

道路舗装構造物の劣化過程には多くの不確実性が介在しており、舗装構造の劣化過程を確定的に予想することは非常に困難である。路面の劣化具合(以下、路面健全度と呼ぶ)は、定期的に行われる路面性状調査により観察することが出来る。路面健全度の劣化過程の不確実性を考慮した統計的劣化予想モデルとしてマルコフ劣化モデル等<sup>1)~7)</sup>が提案されている。マルコフ劣化モデルを用いることにより、路面性状調査により計測された実際の路面の状態に関するデータに即した劣化過程予測が可能となった。その結果、舗装の補修費用を用いた流れを用いて定義した期待ライフサイクル費用の低減を合理的に検討することが可能となった。

一方で自動車道といった舗装構造物は長期間に渡り運営するに連れて路面健全度が低下するだけでなく、舗装構造物全体の劣化が進行し、舗装耐荷力の耐荷力が低下していく。舗装耐荷力が低下すると、わだち掘れやひび割れ等の道路不健全要因の発生が加速する等、路面健全度の劣化速度に影響を与える。舗装構造物のライフサイクルの低減化を考えるためには路面健全度の劣化に応じた補修に限らず、舗装構造物の打ちかえ(以下、舗装更新と呼ぶ)を加味することが必要となる。舗装構造物の耐荷力を観測する手法としてFWD(Falling Weight Deflectometer)調査がある。FWD調査は路面に錘を落下させた時に舗装表面に生じるたわみ量を測定するもので、複数点で同時に計測するためたわみ形状が得られる。ただFWD調査は調査費用と交通規制による社会的費用が高価であるため、頻繁にFWD調査を実施して逐次的に耐荷力に関する情報が得られるという想定は現実的ではない。したがって、期待ライフサイクル費用の最小化を達成するためには、限られた情報から、舗装耐荷力の低下した道路区間に対しては舗装更新の意思決定を下すことが必要となる。

舗装構造物の劣化具合を調査するためには路面や耐荷力の調査費用、社会的費用が発生することは避けられないため、調査費用を減少させられることが望ましい。しかし一方で、調査頻度が減少すれば得られる情報量が減少するため劣化過程に関する不確実性が増加してしまう。ここで、道路管理者が道路舗装のサービス水準に対して一定のリスク管理水準を設定した場合、調査頻度が減少すれば設定したリスク水準を達成できないリスクが増加し、リスク管理水準を達成するために予

防的に舗装補修を実施する必要性が生じてくる。したがって、道路管理者の設定した所与のリスク管理水準の下で、調査費用、補修費用、更新費用で構成される期待ライフサイクル費用の最小化を達成するような調査間隔や、舗装構造の補修更新政策を求めるような方法論が必要となる。

以上のような問題意識の下で舗装構造の劣化状態を本研究では、路面の健全度と舗装耐荷力という複数の状態変数を用いたマルコフ過程として表現するとともに、所与のリスク管理水準の下で期待ライフサイクル費用を最小化するような調査間隔と補修更新政策を同時に決定するようなマルコフ決定モデル(以下、最適調査・補修更新モデルと呼ぶ)を定式化する。

以下、2.では本研究の基本的な考え方を説明する。3.では舗装の劣化過程を複数の状態変数に応じたマルコフ過程として定式化する。4.で最適調査・補修更新モデルを定式化する。5.で実際の高速道路から得られたデータを用いた分析事例を示す。

## 第2章 本研究の基本的な考え方

### 2.1 従来の研究概要

一般的に土木施設の維持・補修方法として、1)時間依存的ルール、と2)状況依存的ルール、という2種類の補修更新政策を考えることが出来る。まず、時間依存的ルールは、定期間隔ごとに土木施設の維持補修・更新を実施する方法である。例えば、歩道照明施設等の道路付帯施設のように、大多数の小規模の設備で構成されているような設備・機器システムの場合や、管路といった地下埋設物のように調査費用が莫大になることが一般となっている施設に対しては、当該の土木施設の劣化状態に対して臨機応変に対応するよりも定期的に土木施設を補修・更新する時間依存的ルールを実施する方が望ましい。また、土木施設の劣化過程に多くの不確実性が介在するような場合においては、土木施設の劣化状態に応じた調査・補修更新政策を決定するという状況依存的ルールを採用する方が望ましい。本研究では、道路舗装構造物の劣化過程に多くの不確実性が介在する点から、上記の状況依存的ルールを用いた、最適調査・補修更新政策を求める方法論を提案していく。

故障は破損といった定常的な発生確率過程に従って発生するようなシステムの最適補修政策に関する既存研究は膨大な蓄積がなされてきている<sup>14)~18)</sup>。特に、健全度のレベルを離散的状態変数で記述するマルコフ過程決定モデルは、劣化過程の記述が容易あり、分かり易いことから多くのモデル<sup>8)~13)</sup>が提案されてきた。本来、多くの土木施設の劣化状況は日常的な点検で得られる部分的に観察可能なデータを用いて、マルコフ過程決定モデルを用いて分析する手法が多くを占めてきた。ただ、こういったこういった分析は所与の調査間隔という条件の下で獲得し得た情報に基づいて補修の必要性の有無を決定するものであった。しかし一方で、地下埋設施設のように調査費用が多額である場合には、所与であった調査間隔の決定自体に意義がある。こういった問題意識の下で、調査間隔と補修政策を同時に求める最適補修政策<sup>11)~13)</sup>が提案されている。

本研究では、まず道路舗装のマネジメントを目的とした最適調査・補修更新モデルを定式化する。その際、舗装構造の劣化過程を舗装耐荷力と路面健全度という2

種類の異なった状態変数を用いた2次元のマルコフ連鎖モデルとしてモデル化する。舗装構造の劣化状態に関する情報は部分的に獲得可能である。路面健全度に関する情報は路面性状調査により、舗装耐荷力に関する情報はFWD調査により得られる。これらの調査結果に基づいて、路面補修、あるいは舗装更新の意思決定がなされる。ここで、舗装構造の打ちかえを行う場合、当然路面も打ちかえられ健全な初期状態に更新されることになる。本研究では、期待サイクル費用を最小化するような最適な調査間隔、補修更新政策を分析するために、路面健全度と舗装耐荷力といった2種類の状態変数を考慮したマルコフ過程決定モデルを定式化する。

## 2.2 劣化過程の不確実性と調査の目的

道路の舗装構造は表層部、基盤部、路床部という複数の層で構成される多層構造を有している。このうちで、表層部(路面)は車両交通による摩耗や繰り返し荷重、天候や土砂堆積といった直接的な影響により劣化が進行していく。さらに各層における構造的欠陥の有無が路面の劣化速度の進行を促進する。舗装構造の劣化過程を模式的に図-2.1に示している。上段の図は路面健全度の劣化過程を示し、下段の図は舗装耐荷力の低下過程を示している。図に描かれているように、路面健全度の劣化過程は舗装耐荷力の低下過程よりも早く進行する。舗装マネジメントにおいては、路面のサービス水準に対して、維持すべき管理上の目標値が規定されており、路面健全度が管理上の目標値に達した時点で補修が実施され、路面の健全度は初期状態にまで回復する。しかし、舗装耐荷力が低下しているため健全度回復後の路面の劣化速度は当初のそれに比べると加速されたものになっている。したがって初期時点から路面の補修回数が増加すればするほど、路面の補修間隔は短くなっていく。つまり、耐荷力が低下した場合、ライフサイクル費用低減化には舗装更新といったオプションも生じてくる。

道路管理者は路面性状調査を定期的を実施することにより、路面健全度に関する情報を獲得することが出来る。一方で、舗装耐荷力は目視によって直接的に観測することは不可能である。ここで、舗装耐荷力の低下状態を把握するためには、コア抜きや開削調査のように破壊試験によって舗装構造耐荷力の低下具合を調査するか、FWD調査やベンケルマンビーム試験によりたわみ量を計測することにより舗装構造耐荷力の低下具合を調査する必要がある。今回の事例ではFWD調査を実施



し、耐荷力の低下具合を計測しており、FWD調査は、舗装構造耐荷力の状態を客観的な数値(たわみ量)を用いて評価することが可能である。しかし、FWD調査を実施する場合、道路交通規制を実施することが不可欠であり、渋滞混雑といった社会的費用が発生することが避けられない。また、FWD調査範囲が広範囲になる場合、広範囲にわたる渋滞の発生や調査費用が莫大になり、管理対象となる前線の自動車道に対してFWD調査を実施することは現実的に難しいといえる。本研究では、路面は補修を補修を実施する時点で、FWD調査を実施し舗装耐荷力に関する情報を得るといった状況を想定する。

## 2.3 調査・補修スキーム

路面性状調査の結果に基づいて道路舗装の路面補修実施の有無が決定されるものとする。図-2.2に路面健全度の推移曲線と臨界健全度とリスク管理水準の関係を簡略的に示す。時点 $t$ で実施された路面性状調査により、路面健全度が点 $a$ であることが判明したとする。路面健全度が判明した時に道路管理者は3種類のアクションをオプションとしてもつ。

(1)路面補修を実施せずに路面性状調査の結果を記録するにとどめる(アクション $e_1$ )。  
(2)FWD調査を実施し、舗装の補修方法を検討する場合には2種類のアクションをとりあげる(アクション $e_2$ )。アクション $e_2$ が選択された場合、FWD調査の結果 $g(t) = s$ に基づいて

(2-1)路面のみが補修され、路面の劣化状態が、 $(1, s)$ に回復する(アクション $e_{21}$ )。

(2-2)舗装更新が実施され、路面の健全度と舗装耐荷力が $(1, 1)$ に回復する(アクション $e_{22}$ )。

これらのうちのいずれかが直ちに実施される。道路管理者がアクション $e_1$ を実施した場合、時点 $t$ から次回の路面性状調査時点 $t'$ まで健全度が回復することなく劣化が進行する。時点 $t$ において、路面補修の実施を見送り、同時にFWD調査も見送った場合、時点 $t$ における耐荷力は観測されないが過去のFWD調査結果(舗装更新時からの経過時間)に基づいて、当該時点における耐荷力の確率部分布 $G_1$ を推定することは可能である。また、アクション $e_2$ を選択した場合であれば、時点 $t$ の定期的な路面性状調査により時点 $t$ における路面健全度の情報は獲得しているため、時点 $t'$ における路面健全度は確率分布 $F_2$ に推定することが出来る。本研究の舗装マネジメント

では、路面健全度が所与のリスク管理水準を下回る確率を一定水準以下に維持することを管理目標としている。時点 $t$ において健全度の劣化具合が悪いほど、補修を見送った場合、次の定期的路面性状調査時点 $t'$ で路面健全度が管理水準を下回る確率は増加する。このように考えれば、図-2.2の点 $b$ に示されるように時点 $t$ での補修を見送った場合、次の路面性状調査時点 $t'$ において管理目標の達成が不可能となるような臨界的な路面健全度(以下、臨界健全度と呼ぶ)が存在する。即ち、補修・更新政策は定期的路面性状調査において路面健全度が臨界的健全度より望ましい状態にある場合は補修を見送る、臨界的健全度より悪い状態にある場合は補修を実施するというルールとして記述することができる。

以上の議論において、定期的路面性状調査間隔は与件としていた。定期的路面性状調査間隔を短くした場合、ある調査時点判明した路面健全度が同一であったとしても次回の路面性状調査時点で路面健全度がリスク管理水準を満足しない確率は減少する。路面は補修費用を低減化させるためには、補修の実施の有無を判定するために用いる臨界健全度が出来るだけ悪い状態であることが望ましい。したがって、路面補修費用を抑制するためには定期的路面性状調査間隔を小さくすることが最適な調査政策であるといえる。一方、定期的路面性状調査間隔が短くなると、調査費用が増加することになる。つまり、舗装構造物のライフサイクル費用を小さくするためには、調査費用と補修費用で構成されるライフサイクル費用を最小にするような定期的路面性状調査間隔と補修更新政策を求めることが必要になる。ただ、道路管理者が社会的費用の最小化を考慮に入れる場合、利用者費用も含めたライフサイクル費用の最小化を考えることが必要となる。しかし、現時点において道路管理者が負担する調査費用や補修費用といった直接的費用と異なり、利用者費用の推計精度には多くの課題が残されており、今研究においてはライフサイクル費用に利用者費用を含めないこととした。そのため、今研究では道路利用者に提供されるサービス水準を一定以上に保つ運営を行う意味で、舗装の路面健全度のリスク管理水準を設けた。

## 2.4 リスク-費用管理曲線

今研究の道路舗装の管理項目として、ライフサイクル費用とリスク管理水準をとりあげる。リスク管理水準は舗装のサービス水準が管理水準 $\bar{U}$ を満足する確率を

用いてリスク管理水準を定義することとした。いま，リスク管理水準を所与の値 $\bar{U}$ に固定する。この時，道路管理者は所与のリスク管理水準下でライフサイクル費用を最小化するような定期的路面性状調査間隔と臨界的健全度(補修政策)を決定することが課題となる。このように求められた最適路面性状調査間隔と補修政策はリスク管理水準を与件とした条件付最適調査・補修更新政策といえる。リスク管理水準の値をパラメーターと考え，個々のリスク管理水準に対応する条件付き最適調査・補修更新政策を求めると図-2.3に示すようなリスク管理水準とライフサイクル費用のトレードオフの関係を表現した曲線が描かれる。本研究において，このような曲線をリスク-費用管理曲線と呼ぶ。舗装の劣化過程には多くの不確実性が介在するため，点 $\alpha$ のようにリスク管理水準を厳しく設定した場合，頻繁な定期的路面性状調査が必要となり，かえってライフサイクル費用が増加する結果を招く。したがって，現実的には一定程度のリスクを受け入れることは避けられない。一方で，点 $\beta$ のように微小の費用削減がリスク管理水準を大幅に低下させてしまう結果につながる場合もある。道路管理者がサービス水準の達成確率に関してのリスク管理水準を決定すれば，それを達成するための最適調査・補修更新政策を求めることが可能である。それと同時に道路管理者は，道路利用者の利用者の効用や管理不備の可能性を総合的に考慮し，リスク管理水準を決定する必要がある。

## 第3章 舗装構造の劣化過程のモデル化

### 3.1 前提条件

最適調査・補修更新政策モデルを定式化するために、新たな時間軸を導入する。カレンダー時刻  $s_0$  に道路管理者が道路施設を建設 (もしくは更新) し、その時点以降の道路舗装マネジメントを考える。カレンダー時刻  $s_0$  を初期時点  $t = 0$  とする離散時間軸  $t = 0, 1, 2, \dots, \infty$  を導入する。そうすることで離散時間軸上の点を時点とよびカレンダー時刻と区別する。図-3.1 に示したように、路面健全度、舗装耐荷力という2階層の劣化システムで構成されていると考える。簡単のために、初期時点から舗装全体の補修は一度も実施されていないと考える。舗装全体の補修が実施されれば、そのカレンダー時刻を初期時点と考える。離散時間軸上の時点  $t_1, \dots, t_k, \dots$  において路面の補修が実施される。さらに、路面の補修が実施された時点  $t_k$  を始点  $u_k = 0$  とする局所離散時間軸  $u_k = 0, 1, 2, \dots$  を導入する。記述の簡便化のため、今後下付き添え字  $k$  を表記しない。局所離散時間軸上の時点  $u_k$  を局所時点と呼ぶ。各離散時点における舗装構造の耐荷力を離散的状態変数  $g(t)$  ( $t = 0, \dots, \infty$ ) を用いて表現する。ただし、離散的状態変数はレーティング  $g(t) = s$  ( $s = 1, \dots, S$ ) を用いて記述される。レーティング  $s$  ( $s = 1, \dots, S$ ) は、 $s$  の値が大きくなるほど舗装構造の耐荷力が低下していることを意味している。 $g(t) = S$  の場合は、耐荷力が使用限界に到達していることを意味する。初期時点  $t = 0$  では耐荷力は最良の状態であるので  $g(0) = 1$  となる。次に、路面の健全度を  $I$  個のレーティング  $h(u_k) = i$  ( $i = 1, \dots, I; u_k = 0, \dots, T_k$ ) で記述する。ここでの  $T_k$  は、時点  $t_k$  で路面を補修してから、次の補修時点に到達するまでの期間長であり、 $T_k = t_{k+1} - t_k$  を意味する。ただし、局所時点  $u = 0$  において路面が補修された時点の意味しているので  $h(0) = 1$  が成立する。 $h(u_k) = I$  は、路面の使用限界を表す。

本研究では舗装の劣化状態を路面健全度、舗装耐荷力という2種類の状態変数で表現し、路面健全度の劣化過程、舗装耐荷力の低下過程をともにマルコフ劣化過程で表現する。舗装耐荷力の低下過程は過去の低下過程に依存しないため斉次マルコフ過程で表現できる。一方で、路面の劣化過程は、舗装耐荷力に依存した劣

化過程となると考えられる。本研究では、舗装構造は劣化過程を路面健全度、舗装耐荷力という2種類の状態変数の組で表現し、さらに舗装構造の劣化過程をこれらの2種類の状態変数で構成される状態空間上で表現される斉次マルコフ連鎖モデルとして記述する。

### 3.2 耐荷力の低下過程

路面の健全度劣化とは分離して、舗装構造の劣化推移は斉次マルコフ劣化過程として見ていく。まず道路舗装を建設(更新)した初期時点 $s_0$ を起点とする離散時間軸 $t = 0, 1, 2, \dots$ を考える。舗装構造の耐荷力を $S$ 個のレーティング指標 $s$  ( $s = 1, \dots, S$ )で表現する。 $s$ の値が大きくなるほど、耐荷力が低下した状況を表し $S$ は舗装構造の使用限界を表している。離散時間軸上の期間 $[t, t+1)$ における耐荷力の低下過程を表すマルコフ推移確率は、時点 $t$ で評価された耐荷力 $g(t) = s$ を与件とし、次の $t+1$ 期において耐荷力 $g(t+1) = l$ が生起する条件付確率

$$\text{Prob}[g(t+1) = l | g(t) = s] = p^{sl} \quad (3.1)$$

として定義できる。期間長を1に基準化する。マルコフ推移確率は、津田等<sup>2)</sup>が開発したマルコフ劣化モデルを用いて表現できる。そのために、時点 $t$ における耐荷力 $s$  ( $s = 1, \dots, S-1$ )のハザード率を

$$\lambda^s = \mathbf{x}\boldsymbol{\beta}^s \quad (3.2)$$

と表す。ただし、 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_Q)$ は、説明変数ベクトルであり、 $\boldsymbol{\beta}^s = (\beta_1^s, \dots, \beta_Q^s)'$ は未知パラメータベクトルである。記号 $'$ は転置を意味しており、 $Q$ は説明変数の数を表している。ハザード率 $\lambda^s$ は、期間 $[t, t+1)$ に対して定義されている。このとき、時点 $t$ において耐荷力 $s$ の状態から、時点 $t+1$ においても耐荷力 $s$ が継続する確率は、

$$\begin{aligned} p^{ss} &= \text{Prob}[g(t+1) = s | g(t) = s] \\ &= \exp(-\lambda^s) \end{aligned} \quad (3.3)$$

となる。さらに、時点 $t$ と時点 $t+1$ の間で耐荷力が $s$ から $l (> s)$ に推移するマルコフ推移確率 $p^{sl}$  ( $s = 1, \dots, S-1; l = s, \dots, S$ )は、

$$p^{sl} = \text{Prob}[g(t+1) = l | g(t) = s]$$

$$= \sum_{m=s}^l \prod_{z=s}^{m-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^z - \lambda^m} \prod_{z=m}^{l-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^{z+1} - \lambda^m} \exp(-\lambda^m) \quad (s=1, \dots, S-1; l=s+1, \dots, S) \quad (3.4)$$

と表すことができる<sup>2)</sup>。ただし，表記上の規則として，

$$\begin{cases} \prod_{z=s}^{m-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^z - \lambda^m} = 1 & (m=s \text{ の時}) \\ \prod_{z=m}^{l-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^{z+1} - \lambda^m} = 1 & (m=l \text{ の時}) \end{cases}$$

が成立する。さらに，表記の便宜上，

$$\begin{aligned} & \prod_{z=s, z \neq m}^{l-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^z - \lambda^m} \exp(-\lambda^m) \\ &= \prod_{z=s}^{m-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^z - \lambda^m} \prod_{z=m}^{l-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^{z+1} - \lambda^m} \exp(-\lambda^m) \end{aligned}$$

と簡略化する。また， $p^{sS}$  に関しては，マルコフ推移確率の条件より次式を満たす。

$$p^{sS} = 1 - \sum_{l=s}^{S-1} p^{sl} \quad (3.5)$$

$$(s=1, \dots, S-1)$$

以上の推移確率を用いれば，期間  $[t, t+1)$  で定義される条件付確率 (3.3) を要素とするマルコフ推移行列を

$$P = \begin{pmatrix} p^{11} & \cdots & p^{1S} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & p^{SS} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

と定義することができる。さらに，期間  $[t, t+u)$  における推移確率行列 (以下， $u$  期推移確率行列と呼ぶ) は時間的整合性から

$$P(u) = \{P\}^u \quad (3.7)$$

と表される。また， $u$  期推移確率行列を

$$P(u) = \begin{pmatrix} p^{11}(u) & \cdots & p^{1S}(u) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & p^{SS}(u) \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

と表記する。

### 3.3 路面の劣化過程

道路管理者により路面の補修が離散時間軸上の時点  $t_1, \dots, t_k, \dots$  に実施される。路面の補修が実施された時点  $t_k$  を始点  $u = 0$  とする局所離散時間軸  $u = 0, \dots, T_k$  を導入する。ここで、 $u = T_k$  において次回 ( $=t_{k+1}$ ) の路面の補修が実施されるものとする。

局所離散時間軸上の時点  $u$  は、離散時間軸上の時点  $t_k + u$  と対応し

$$t_k + T_k = t_{k+1}$$

を満たす。

時点  $t_k$  ( $u = 0$ ) に路面の補修が実施され、路面の健全度が  $h(0) = 1$  に回復する。局所時点  $u$  から  $u+1$  の間において生起する路面の劣化状態の推移状態を、マルコフ推移確率で表す。単位期間  $[u, u+1)$  の期間長も 1 に基準化する。

ここで路面の劣化過程を考えるために、実際では舗装構造の耐荷力は(隠れていて)不明な状態にあるが、ここでは耐荷力が分かっているものと仮定して定式化を進めてゆく。局所時点間  $[u, u+1)$  (離散時間軸上の時点間  $[t_k + u, t_k + u+1)$ ) における路面の劣化過程を表すマルコフ推移確率は、局所時点  $u$  (時点  $t_k + u$ ) で評価された舗装構造の耐荷力  $g(t_k + u) = s$  と路面の健全度  $h(u) = i$  を与件とし、次の局所時点  $u+1$  において健全度  $h(u+1) = j$  が生起する条件付確率

$$\begin{aligned} \text{Prob}[h(u+1) = j | h(u) = i, g(t_k + u) = s] \\ = \pi^{ij}(s) \end{aligned} \quad (3.9)$$

として定義できる。耐荷力  $s$  を与件とした場合の健全度  $i$  ( $i = 1, \dots, I-1$ ) のハザード率  $\mu^i(s)$  を

$$\begin{aligned} \mu^i(s) &= \gamma_0^s \mathbf{y} \boldsymbol{\gamma}^i \\ &= \gamma_0^s \mu^i \end{aligned} \quad (3.10)$$

と表す。ここで  $\mathbf{y} = (y^1, \dots, y^V)$  は説明変数ベクトル、 $\boldsymbol{\gamma}^i = (\gamma_1^i, \dots, \gamma_V^i)'$  は未知パラメータベクトル、 $\mu^i = \mathbf{y} \boldsymbol{\gamma}^i$ 。このとき、耐荷力  $s$  の下で局所時点  $u$  において健全度が  $i$  であり、局所時点  $u+1$  においても健全度  $i$  が継続する確率は、

$$\begin{aligned} \pi^{ii}(s) &= \text{Prob}[h(u+1) = i | h(u) = i, g(t_k + u) = s] \\ &= \exp\{-\mu^i(s)\} \\ &= \exp(-\gamma_0^s \mu^i) \end{aligned} \quad (3.11)$$

となる . さらに , 局所時点  $u$  と局所時点  $u+1$  の間で健全度が  $i$  から  $j (> i)$  に推移するマルコフ推移確率  $\pi^{ij}(s)$  ( $i = 1, \dots, I-1; j = i, \dots, I$ ) は ,

$$\begin{aligned}\pi^{ij}(s) &= \text{Prob}[h(u+1) = j | h(u) = i, g(t_k + u) = s] \\ &= \sum_{z=i}^j \prod_{r=i, \neq z}^{j-1} \frac{\mu^r(s)}{\mu^r(s) - \mu^z(s)} \exp\{-\mu^z(s)\} \\ &\quad (i = 1, \dots, I-1; j = i+1, \dots, I)\end{aligned}\tag{3.12}$$

と表すことができる . また ,  $\pi^{iI}(s)$  に関しては , マルコフ推移確率の条件より次式で表せる .

$$\begin{aligned}\pi^{iI}(s) &= 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi^{ij}(s) \\ &\quad (s = 1, \dots, S-1)\end{aligned}\tag{3.13}$$

以上の推移確率を用いれば , 局所期間  $[u, u+1)$  で定義される条件付確率 (3.9) を要素とするマルコフ推移行列を

$$\Pi(s) = \begin{pmatrix} \pi^{11}(s) & \cdots & \pi^{1I}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi^{II}(s) \end{pmatrix}\tag{3.14}$$

と定義することができる .

### 3.4 舗装全体の劣化過程

舗装構造全体の劣化状態を , 路面の健全度  $i$  と舗装耐荷力  $s$  という2つの状態変数の組  $(i, s)$  を用いて表現することにする . いま , 隣接する2つの時点  $t$  と  $t+1$  を考える . 時点  $t$  における劣化状態を  $(i, s)$  , 時点  $t+1$  の劣化状態を  $(j, l)$  と表す . 期間  $[t, t+1)$  中における舗装耐荷力は時点  $t$  における状態  $s$  が近似的に継続すると仮定する . このとき , 劣化過程の単調性条件から  $i \leq j, s \leq l$  は成立している . この時 , 期間  $[t, t+1)$  において劣化状態が  $(i, s)$  から  $(j, l)$  に推移する確率  $\theta_{i,s}^{j,l}$  は

$$\theta_{i,s}^{j,l} = \begin{cases} P^{sl} \pi^{ij}(s) & i \leq j, s \leq l \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases}\tag{3.15}$$



と表される．ここで， $\theta_{i,s}^{j,l}$  を  $(s,l)$  要素とする対角ブロック行列を

$$\theta_i^j = \begin{pmatrix} \theta_{i,1}^{j,1} & \theta_{i,1}^{j,2} & \cdots & \theta_{i,1}^{j,S} \\ 0 & \theta_{i,2}^{j,2} & \cdots & \theta_{i,2}^{j,S} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \theta_{i,S}^{j,S} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

とし，舗装全体の劣化過程の推移確率行列を

$$\Theta = \begin{pmatrix} \theta_1^1 & \theta_1^2 & \cdots & \theta_1^J \\ 0 & \theta_2^2 & \cdots & \theta_2^J \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \theta_J^J \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

と定義する．この時，路面性状調査時点  $t_k$  からつぎの調査時点  $t_k + r$  までの  $r$  期間に生起する劣化状態の推移確率行列はマルコフ推移確率

$$\Theta(r) = \{\Theta\}^r \quad (3.18)$$

を用いて表現できる．マルコフ推移確率  $\Theta(r)$  の  $\{(i,s), (j,l)\}$  要素  $\theta_{i,s}^{j,l}(r)$  は  $r$  期間のうちに劣化状態が  $(i,s)$  から  $(j,l)$  に推移する条件付き確率を表している．

初期時点  $t=0$  において，舗装全体が更新され，舗装耐荷力が  $g(0) = 1$ ，路面健全度が  $h(0) = 1$  の状態に確定したと考える．初期時点以降，舗装全体の劣化が進行するが，劣化過程に不確実性が介在する．時点  $t$  において舗装状態  $(i,s)$  が生起する確率を  $\psi_{i,j}(t)$  と表し，状態ベクトルを  $\psi(t) = \{\psi_{1,1}(t), \psi_{1,2}(t), \cdots, \psi_{i,s}(t), \cdots, \psi_{J,S}(t)\}'$  と表す．ここでの記号「 $'$ 」は転置操作を表している． $r$  期間に及ぶ劣化状態の推移確率が式(??)で表現される時，調査時点  $t$  と調査時点  $t+r$  の状態生起確率  $\psi(t)$  と  $\psi(t+r)$  の間に

$$\psi(t+r) = \psi(t)\Theta(r) \quad (3.19)$$

が成立する．同様に，初期時点における舗装劣化状態は  $(i,s) = (1,1)$  であり， $\psi(0) = (1,0, \cdots, 0)'$  と表せるので，任意の時点  $t$  における舗装状態の生起確率は

$$\psi(t) = \psi(0)\Theta(t) \quad (3.20)$$

と表せる．

## 第4章 最適調査・補修更新モデル

### 4.1 モデル化の前提条件

本研究では路面の補修時にFWD調査を実施し，舗装耐荷力が判明すると想定する。定期的路面性状調査は $r$ 期毎に実施される。ここでの $r$ は政策変数であり，ひとまず所与の値をとるとする。したがって，例えば $\omega$ 回目の定期的路面性状調査が行われる離散時間軸上の時点は $t = t_k + r\omega$  ( $\omega = 0, 1, 2, 3, \dots, W$ )と定義できる。 $\omega$ 回目の定期的路面性状調査により，ある特定の地点における路面健全度が $h(t) = i$  ( $i = 1, 2, \dots, J$ )と判明したと想定する。例えば，時点 $t$ において路面健全度が $h(t) = J$ と判明した場合であれば直ちに路面の補修が実施され，路面健全度は $h(t) = 1$ に回復する。一方で，時点 $t$ において判明した路面健全度が $1 < h(t) \leq J$ であった場合，道路管理者が選択可能なアクション $e$ としては

(1) 路面補修を実施せずに定期的路面性状調査の結果を記録するにとどめる(アクション $e_1$ )。

(2) FWD調査を実施し，舗装構造物の補修方法を検討する(アクション $e_2$ )。

という2種類のアクションがあげられる。

次にアクション $e_2$ が選択された場合，FWD調査の結果 $g(t) = s$ に基づいて道路管理者がもつ選択可能なアクション $e_2$ は

(2-1) 路面のみを補修し，舗装構造の劣化状態が $(1, s)$ に回復する(アクション $e_{21}$ )。

(2-2) 舗装打ちかえを実施し，舗装構造の劣化状態が $(1, 1)$ に回復する(アクション $e_{22}$ )。

ここで，調査時点 $t$ における補修更新政策 $\xi$ を，調査で観測された路面健全度 $h(t) = i$ に対して，補修後の路面健全度を指定するルール $\eta^\xi(i)$ を用いて定義する。すなわち，補修更新政策 $\xi$ は

$$\eta^\xi(i) = \begin{cases} (i, s) & \text{アクション } e_1 \text{ の場合} \\ (1, s) & \text{アクション } e_{21} \text{ の場合} \\ (1, 1) & \text{アクション } e_{22} \text{ の場合} \end{cases} \quad (4.1)$$

$(i = 1, \dots, J)$

と記述される。いま，路面の補修の有無を判定する臨界的健全度 $i^*(\xi)$ が存在し，路面健全度 $i$ が臨界健全度 $i^*(\xi)$ より大きくなった場合，FWD調査が実施する。さらに，FWD調査の判定結果が得られ，舗装耐荷力 $s$ が臨界的耐荷力 $s^*(\xi)$ より小さい場合，路面のみの補修を実施し，舗装耐荷力 $s$ が臨界的耐荷力 $s^*(\xi)$ 以上であった場合，舗装構造全体を打ちかえる。

すなわち，路面の補修政策は

$$\eta^\xi(i) = \begin{cases} i & i < i^*(\xi) \\ 1 & i \geq i^*(\xi) \end{cases} \quad (4.2)$$

$(i = 1, \dots, J)$

と表される。さらに，舗装の更新政策は

$$l^\xi(s) = \begin{cases} s & i < i^*(\xi) \\ s & i > i^*(\xi), s < s^*(\xi) \\ 1 & i > i^*(\xi), s \geq s^*(\xi) \end{cases} \quad (4.3)$$

$(i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S)$

と表される。ここで条件(4.3)を満足する補修更新政策の集合を $\Xi$ と表す。補修更新政策 $\xi \in \Xi$ を実施した場合，調査後の路面健全度に基づいて，直ちに補修・更新が実施されるものとする。

## 4.2 舗装の劣化・補修過程

舗装構造の調査・補修更新政策 $(r, \xi)$ の下で実現する劣化，補修・更新過程をマルコフ過程としてモデル化する任意の路面性状調査時点 $t$ において実施される一連の論理的順序を図-4.1に模式図で示した。いま，定期的路面性状調査時点の期首に判明した真の舗装の劣化状態を $(i, s)$ で表す。しかし，真の舗装の劣化状態は定期的路面性状調査が実施される直前の時点には観測不可能とする。次に，

- (1) 定期的路面性状調査が実施され路面健全度 $i$ が観測される。
- (2) 路面健全度が $i > i^*(\xi)$ の場合，FWD調査を実施する。
- (3) 舗装耐荷力 $s$ が観測され， $s \geq s^*(\xi)$ の場合には，舗装全体を打ちかえる。

一方， $s < s^*(\xi)$ の場合には，路面のみを補修する。以上の一連のアクションは瞬時に実施するものとする。これらの補修アクションの終了後における真の舗装状態を

$(j, l)$  と表す。すなわち，補修更新政策  $\xi$  を実施することにより，真の舗装状態は  $(i, s)$  から  $(j, l)$  に推移する。このような真の状態変数の推移関係を  $1-0$  変数を用いて

$$\alpha_{i,s}^{j,l;\xi} = \begin{cases} 1 & \eta^\xi(i) = j \ \iota^\xi(s) = l \\ 0 & \text{それ以外の場合} \end{cases} \quad (4.4)$$

$(i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S)$

と表す。さらに，推移関係  $\alpha_{i,s}^{j,l;\xi}$  を  $\{(i, s), (j, l)\}$  要素とする推移行列

$$\mathbf{A}^\xi = \begin{pmatrix} \alpha_{1,1}^{1,1;\xi} & \alpha_{1,1}^{1,2;\xi} & \cdots & \alpha_{1,1}^{j,l;\xi} & \cdots & \alpha_{1,1}^{J,S;\xi} \\ \alpha_{1,2}^{1,1;\xi} & \alpha_{1,2}^{1,2;\xi} & \cdots & \alpha_{1,2}^{j,l;\xi} & \cdots & \alpha_{1,2}^{J,S;\xi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{i,s}^{1,1;\xi} & \alpha_{i,s}^{1,2;\xi} & \cdots & \alpha_{i,s}^{j,l;\xi} & \cdots & \alpha_{i,s}^{J,S;\xi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{J,S}^{1,1;\xi} & \alpha_{J,S}^{1,2;\xi} & \cdots & \alpha_{J,S}^{j,l;\xi} & \cdots & \alpha_{J,S}^{J,S;\xi} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

を用いて定義する。さらに，調査・補修更新政策  $\xi$  の下で調査時点  $t$  において (調査が実施される直前で) 定義される真の舗装状態の生起確率分布を

$\psi^{r;\xi}(t) = \{\psi_{1,1}^{r;\xi}(t), \psi_{1,2}^{r;\xi}(t), \dots, \psi_{J,S}^{r;\xi}(t)\}$  と表すと，調査時点  $t$  と次の調査時点  $t+r$  において実現する舗装の劣化・補修過程は

$$\psi^{r;\xi}(t+r) = \Theta^{r;\xi} \psi^{r;\xi}(t) \quad (4.6)$$

と表すことができる。ただし， $\Theta^{r;\xi} = \mathbf{A}^\xi \Theta(r)$  であり，その  $\{(i, s), (j, l)\}$  要素を  $\theta_{i,s}^{j,l;r;\xi}$  と表す。さらに，舗装の劣化・補修過程の定常状態をとると，

$$\psi^{r;\xi,*} = \psi^{r;\xi,*} \mathbf{A}^\xi \Theta(r) \quad (4.7)$$

が成立する。ここに， $\psi^{r;\xi,*} = (\psi_{1,1}^{r;\xi,*}, \psi_{1,2}^{r;\xi,*}, \dots, \psi_{J,S}^{r;\xi,*})$  は調査時点における真の舗装状態に関する長期定常生起確率を表す。

最適補修更新モデルを，舗装のリスク管理水準を一定水準以上に維持した上で，初期時点から無限期間にわたって発生する補修更新費用の現在価値 (期待ライフサイクル費用) を最小化する問題として定式化する。舗装の定期的路面性状調査時点において路面健全度が使用限界に到達している定常生起確率を一定水準以下に抑

制することをリスク管理目標として設定する。調査時点  $t$  における舗装の路面健全度の定常生起確率を

$$\boldsymbol{\rho}^{r,\xi,*} = (\rho_1^{r,\xi,*}, \dots, \rho_J^{r,\xi,*}) \quad (4.8)$$

で表現する。ただし、

$$\rho_i^{r,\xi,*} = \sum_{s=1}^S \psi_{i,s}^{r,\xi,*} \quad (i = 1, \dots, J) \quad (4.9)$$

と表される。任意の路面性状調査時点  $t$  において使用限界である路面健全度  $J$  が観測される定常生起確率  $\rho_J^{r,\xi,*}$  を、リスク管理水準  $\bar{U}$  以下に抑えることが可能な補修更新政策  $(r, \xi)$  の集合  $\Xi(\bar{U})$  を、

$$\Xi(\bar{U}) = \{(r, \xi) | \rho_J^{r,\xi,*} \leq \bar{U}\} \quad (4.10)$$

と定義する。

### 4.3 定式化

定期的路面性状調査間隔  $r$  と調査時点において実施される調査・補修更新政策  $\xi$  は、ともに政策変数である。これら2つの政策変数の組  $(r, \xi) \in \Xi$  を補修更新政策と呼ぶことにする。ただし、 $\Xi$  は調査・補修更新政策集合である。道路管理者が調査・補修更新政策  $(r, \xi) \in \Xi(\bar{U})$  に従って、道路舗装の調査・補修を実施する場面を考える。道路管理者は、時点  $u_k = rd$  ( $d = 0, 1, \dots$ ) において、路面性状調査を実施する。路面性状調査費用を  $c$  と表す。さらに、路面性状調査の実施時点において、路面健全度が臨界的健全度  $i^*(\xi)$  を下回った場合、舗装の補修を実施する。補修費用は補修直前の路面健全度  $i$  に依存しないと仮定し、路面の補修費用を  $\omega$  で表す。また、FWD調査費用を  $\zeta$ 、舗装の更新費用を  $D$  と表す。いま、ある路面性状調査時点  $u_k$  において真の劣化状態が  $(i, s)$  であると仮定する。路面性状調査を行うことにより、路面の性状  $i$  に関する情報を獲得できる。さらに、FWD調査を行うことにより、舗装耐荷力  $s$  に関する情報を獲得できる。ここで、補修更新政策  $\xi$  を表す2種類の0-1変数

$$d_i^\xi = \begin{cases} 0 & i < i^*(\xi) \\ 1 & i \geq i^*(\xi) \end{cases}$$

$$\nu_{i,s}^{\xi} = \begin{cases} 0 & i < i^*(\xi) \\ 0 & i \geq i^*(\xi), s < s^*(\xi) \\ 1 & i \geq i^*(\xi), s \geq s^*(\xi) \end{cases}$$

を定義する。この時、ある調査時点  $t_k$  において真の劣化状態が  $(i, s)$  の下で、その時点以降、調査・補修更新政策  $(r, \xi)$  を恒常的に適用することによって発生する補修更新費用の期待割引当該期価値 (以下、期待ライフサイクル費用と呼ぶ)  $V_{i,s}^{r,\xi}$  は、再帰的に

$$\begin{aligned} V_{i,s}^{r,\xi} &= c + \nu_{i,s}^{\xi}(D + \zeta + V_{1,1}^{r,\xi}) \\ &+ \delta_i^{\xi}(1 - \nu_{i,s}^{\xi})(\omega + \zeta + V_{1,s}^{r,\xi}) \\ &+ (1 - \delta_i^{\xi}) \sum_{j=i}^J \sum_{l=s}^S \exp(-\rho r) \theta_{i,s}^{j,l}(r) V_{j,l}^{r,\xi} \end{aligned} \quad (4.11)$$

$(i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S)$

と定義できる。ただし、 $\rho$  は割引率、 $\theta_{i,s}^{j,l}(r)$  は式 (3.17) で定義されるマルコフ推移確率  $\Theta(r)$  の  $\{(i, s), (j, l)\}$  要素を表している。式 (4.11) は状況依存的期待ライフサイクル費用  $V_{i,s}^{r,\xi}$  ( $i = 1, \dots, I; s = 1, \dots, S$ ) に関する連立方程式になっている。式 (4.11) は

$$\begin{aligned} V_{i,s}^{r,\xi} &= \mathcal{R}_{i,s}^{1,1;r,\xi} V_{1,1}^{r,\xi} + \mathcal{R}_{i,s}^{1,s;r,\xi} V_{1,s}^{r,\xi} \\ &+ \sum_{j=2}^J \sum_{l=1}^S \mathcal{R}_{i,s}^{j,l;r,\xi} V_{j,l}^{r,\xi} + \mathcal{U}_{i,s}^{r,\xi} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$(i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S)$

と書き換えることができる。ただし、

$$\mathcal{R}_{i,s}^{1,1;r,\xi} = \nu_{i,s}^{\xi} \quad (4.13)$$

$$\mathcal{R}_{i,s}^{1,s;r,\xi} = \delta_i^{\xi}(1 - \nu_{i,s}^{\xi}) \quad (4.14)$$

$$\mathcal{R}_{i,s}^{j,l;r,\xi} = (1 - \delta_i^{\xi}) \exp(-\rho r) \theta_{i,s}^{j,l}(r) \quad (j \neq 1) \quad (4.15)$$

$$\mathcal{U}_{i,s}^{r,\xi} = c + \delta_i^{\xi}(1 - \nu_{i,s}^{\xi})(\omega + \zeta) + \nu_{i,s}^{\xi}(D + \zeta) \quad (4.16)$$

である。連立方程式 (4.12) を

$$\mathbf{V}^{r,\xi} = \mathbf{\Gamma}^{r,\xi} \mathbf{V}^{r,\xi} + \mathbf{U}^{r,\xi} \quad (4.17)$$

と行列表記する . ただし ,

$$\mathbf{V}^{r,\xi} = (V_{1,1}^{r,\xi}, V_{1,2}^{r,\xi}, \dots, V_{i,s}^{r,\xi}, \dots, V_{J,S}^{r,\xi})' \quad (4.18)$$

$$\mathbf{U}^{r,\xi} = (U_{1,1}^{r,\xi}, U_{1,2}^{r,\xi}, \dots, U_{i,s}^{r,\xi}, \dots, U_{J,S}^{r,\xi})' \quad (4.19)$$

$$\mathbf{\Gamma}^{r,\xi} = \left\{ \begin{array}{cccc} \mathcal{R}_{1,1}^{1,1;r,\xi} & \mathcal{R}_{1,1}^{1,2;r,\xi} & \dots & \mathcal{R}_{1,1}^{J,S;r,\xi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{R}_{i,s}^{1,1;r,\xi} & \mathcal{R}_{i,s}^{1,2;r,\xi} & \dots & \mathcal{R}_{i,s}^{J,S;r,\xi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{R}_{J,S}^{1,1;r,\xi} & \mathcal{R}_{J,S}^{1,2;r,\xi} & \dots & \mathcal{R}_{J,S}^{J,S;r,\xi} \end{array} \right\} \quad (4.20)$$

である .

連立方程式(4.17)を解くことにより, 状況依存的期待ライフサイクル費用が求められる . 状況依存的期待ライフサイクル費用である  $V_{i,s}^{r,\xi}$  は当該時点において舗装状態が  $(i, s)$  の時に, それ以降, 調査・補修更新政策  $(r, \xi)$  を恒常的に適用する場合に発生する期待ライフサイクル費用の当該期価値を表している . いま, 長期定常状態において, 道路舗装の運用により発生する期待ライフサイクル費用の現在価値を

$$\overline{LCC}(r, \xi) = \sum_{i=1}^J \sum_{s=1}^S \psi_{i,s}^{r,\xi,*} V_{i,s}^{r,\xi} \quad (4.21)$$

と定義する . この時, リスク管理水準  $\bar{U}$  を所与とした時に, 期待ライフサイクル費用を最小とするような舗装の補修更新政策を求める最適調査・補修更新政策モデルは,

$$\min_{r,\xi} \left\{ \overline{LCC}(r, \xi) \right\} \quad (4.22)$$

$$\text{subject to } (r, \xi) \in \Xi(\bar{U}) \quad (4.23)$$

と定式化できる . この問題の最適解として求まる最適政策はリスク管理水準  $\bar{U}$  を所与とした条件付き最適政策であり, このことを明示的に表現するために最適政策を  $(r^*(\bar{U}), \xi^*(\bar{U}))$  と表す .

## 4.4 解法

最適調査・補修更新モデルの最適解を求める方法を提案する . ひとまず, 定期調査・補修更新政策  $(r, \xi)$  を与件とする . 定期調査・補修更新政策  $(r, \xi)$  を所与とした

場合，舗装状態  $(i, s)$  を与件とした期待ライフサイクル費用である  $V_{i,s}^{r,\xi}$  は，連立方程式 (4.17) を解くことにより求めることができる．すべての  $(r, \xi) \in \Xi$  に対して網羅的に  $V_i^{r,\xi}$  ( $i = 1, \dots, J$ ) を計算することにより，問題 (4.22), (4.23) の最適解  $(r^*(\bar{U}), \xi^*(\bar{U}))$  を求めることができる．最適調査・補修更新モデルの解法は図-4.3のように整理できる．すなわち，

- step 1  $(r, \xi)$  を設定する．
- step 2 推移確率  $P^\xi(r)$  を求める．
- step 3 式 (4.7) を用いて  $\pi_j^{r,\xi,*}$  を求め， $\pi_j^{r,\xi} \leq \bar{U}$  を満足するかどうかを検討する．満足しない場合，step 6 へ進む．満足する場合，step 4 へ進む．
- step 4 連立方程式 (4.17) を解き， $V_{i,s}^{r,\xi}$  ( $i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S$ ) を求める．
- step 5  $\overline{LCC}(r, \xi)$  を求める．
- step 6 すべての  $(r, \xi)$  に対して探索が終了していない場合，新しい  $(r, \xi)$  を設定し，step 2 へ戻る．すべての  $(r, \xi)$  に関して探索した場合， $\overline{LCC}(r, \xi)$  を最小にするような  $(r^*, \xi^*)$  を求める．



## 第5章 適用事例

### 5.1 適用事例の概要

本研究では、適用事例として高速道路の舗装マネジメントを対象として取り上げる。自動測定車を利用した路面性状調査により、定期的に路面健全度が判定し、路面補修時点でFWD調査を行い舗装耐荷力が判定されるとした想定の下で、調査・補修問題を取り扱う。適用事例として対象とする道路区間は、T自動車道、6車線、総延長287.8km・車線である。同区間は昭和47年11月に設置された折より、現在35年が経過している。大型車交通量は約6800台である。同区間の舗装種別は高機能舗装であり、全区間の95.5%にあたる274.7km車線が土工部で構成されている。路面健全度は、1)ひび割れ、2)わだち掘れ、3)IRIという3種類の損傷タイプのそれぞれに対して評価される。路面性状調査では100m区間を基本単位として、路面健全度を判定する。さらに、100mを基本単位とする路面性状調査結果に基づいて補修必要箇所を選定する。つまり、路面性状調査では比較的長い区間を一斉調査し、その調査結果から損傷が進行している区間を100m区間別に判定し、補修する区間を選定する。補修基準値は、3つの損傷別にあらかじめ設定されており、ある舗装区間の3つの損傷のいずれかの値が補修基準値に達すれば、要補修区間として判別される。本適用事例では、3種類の損傷のうち劣化の進展が早いとされる”ひび割れ”に着目して、路面健全度の定義を行う。ひび割れは、調査対象区間を小メッシュで分割し、ひび割れが存在するメッシュの割合で評価する。ひび割れ率に基づいて、路面健全度を表-5.1に示すよう定義した。健全度6の状態が使用限界とした。本適用事例では、高速道路舗装の補修を対象としており、補修工法として切削オーバーを基本とし、損傷の進行程度が異なっても同一の補修工法が採用される。路面の健全度が6に到達した箇所は直ちに切削オーバーレイが実施される。

また、舗装構造物のたわみが大きいほど舗装体の構造的な耐荷力が低下していると判定される。FWD調査によるたわみ測定を行い、アスファルト層の健全度をD指標

$$D = \frac{D_0 - D_{90}}{t} \quad (5.1)$$

を用いて評価する。

ただし， $D_0, D_{90}$ はそれぞれ載荷点直下，および載荷点から90cm離れた地点でのたわみ量(mm)を， $t$ はアスファルト層の設計層(mm)を意味する。さらに， $D$ 指標を表-5.2に示すように離散化し，耐荷力とランクを定義した。図-5.1の路面健全度と同様に，耐荷力ランク5は舗装体の使用限界を意味する。つまり，耐荷力ランクが5に到達したと判定された場合，アスファルト層全体の更新が実施される。

なお，LCCの計算に用いる費用条件として，路面性状調査費用は平成21年度版調査等積算基準(東・中・西日本高速道路株式会社)に基づき，20,000円/kmに設定した。また，舗装補修費の算定にあたっては，密度1.98t/m<sup>3</sup>，表層4cmの排水性舗装とし，同積算基準と平成21年度建設物価・建設機械等損料算定表に基づき，2,125円/m<sup>2</sup>に設定した。さらに，舗装の評価単位区間の延長100m，幅員を3.5mとすれば，評価単位当たりの補修費用は744,000円/区間，調査費用は2,000円/区間となる。FWD調査費用に関しては，仮想的に10,000円と想定した。また，アスファルトの更新費用は切削オーバーレイ費用の約10倍であると考え，7,000,000円/区間に設定した。

## 5.2 マルコフ劣化ハザードモデルの作成

本研究で適用事例の対象としている路線では，過去に路面性状調査とFWD調査を実施している。これらのデータを用いてマルコフ劣化ハザードモデルを推計する。本研究のモデルの基礎段階の，ハザード率を推計する基本モデルとして，舗装構造耐荷力と路面健全度の劣化状態の階層的な関係として，付録Aに階層的隠れマルコフ劣化モデルの議論を添付した。本研究で用いる舗装の劣化モデルは齊次マルコフ連鎖として定式化される耐荷力劣化モデル(A.4)式，路面健全度の劣化過程がハザード率が耐荷力に依存して変化するような非齊次マルコフ連鎖モデル(A.5)式が階層的に連動するような複合型マルコフ過程として表現されている。本研究では最適調査・補修更新モデルを適用する際に，階層的隠れマルコフ劣化モデルを用いて推計された劣化確率を用いて，推定することとする。以下に簡略的に推計方法と推計結果を紹介する。

適用対象とする路線が $N$ 個の道路区間で構成されていると想定する。対象区間 $n$ ( $n=1, \dots, N$ )において，少なくとも2つの時点 $t_1^i$ と $t_2^i$ で路面性状調査とFWD調査が実施されている。ここで，記号「 $\bar{\cdot}$ 」は実測値を意味している。時点 $t_1^i$ において判定

された耐荷力を  $g(\bar{t}_1^n) = \bar{s}^n$  , 路面健全度を  $h(\bar{t}_1^n) = \bar{i}^n$  と表す . 同様に , 時点  $\bar{t}_2^n$  における耐荷力を  $g(\bar{t}_2^n) = \bar{l}^n$  , 路面健全度を  $h(\bar{t}_2^n) = \bar{j}^n$  と表す . さらに , 2つの時点の間の期間長を  $\bar{\tau}^n = \bar{t}_2^n - \bar{t}_1^n$  を定義する . この時 , 各区間に対して情報の組  $\bar{\xi}^n = (\bar{\tau}^n, \bar{i}^n, \bar{j}^n, \bar{s}^n, \bar{l}^n, \bar{x}^n, \bar{y}^n)$  が得られる . ただし ,  $\bar{x}^n, \bar{y}^n$  は , 区間  $n$  のハザードモデル(3.2),(3.10)の説明変数ベクトルである . 時点  $\bar{t}_1^n$  に状態  $(\bar{i}^n, \bar{s}^n)$  が判定され , 時点  $\bar{t}_2^n$  に状態  $(\bar{j}^n, \bar{l}^n)$  が観測される尤度は

$$\mathcal{L}(\bar{\xi}^n : \rho) = \prod_{l=1}^{S-1} \prod_{j=1}^{I-1} \left\{ \theta_{\bar{i}^n, \bar{s}^n}^{j,l}(\bar{\tau}^n : \rho, \bar{x}^n, \bar{y}^n) \right\}^{\delta_n^{jl}} \quad (5.2)$$

と立式できる .

ただし ,  $\rho = \{\beta^s, \gamma^i : s = 1, \dots, S-1, i = 1, \dots, I-1\}$  は未知パラメータベクトルである . また ,  $\delta_n^{jl}$  はダミー変数であり

$$\delta_n^{jl} = \begin{cases} q1 & j = \bar{j}^n, l = \bar{l}^n \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (5.3)$$

と定義される . 道路管理者が獲得可能な情報集合を  $\bar{\Xi} = \{\bar{\xi}^n, (n = 1, \dots, N)\}$  と表す . この時 , 情報集合  $\bar{\Xi}$  が観測される尤度は

$$\mathcal{L}(\bar{\Xi} : \rho) = \prod_{n=1}^{N-1} \mathcal{L}(\bar{\xi}^n : \rho) \quad (5.4)$$

と表すことができる . パラメータ尤度関数(5.4)が未知パラメータ  $\rho$  に関して高度な非線形式となっており , 通常的最尤法を用いてのパラメータ推計が困難であり , MCMC法の代表的な手法であるギブス・サンプリング(Gibbs Sampling)法により , 各パラメータのサンプル値を反復的に乱数発生させる方法を利用する . このようにして推計したマルコフ劣化過程のパフォーマンスカーブを図-5.12に示す .

### 5.3 最適調査・補修更新モデルの分析結果

図-5.1~図-5.11に本研究で用いた最適調査・補修更新政策モデルから求められる結果を示した . 本研究における最適調査・補修更新政策モデルの最適解は , 所与のリスク管理水準  $\bar{U}$  の下で期待ライフサイクル費用  $\overline{LCC}(r, \xi)$  を最小にする政策  $(r^*, \xi^*)$  を求めることを目的としている . つまり , ある使用限界リスク水準  $\rho_5^{r, \xi, *}$  が管理リスク水準  $\bar{U}$  を下回る範囲の中で , 期待ライフサイクル費用  $\overline{LCC}(r, \xi)$  を最小にするような政策  $(r^*(\bar{U}), \xi(\bar{U}))$  を選択する問題に帰着するといえる .

本研究の最適調査・補修更新政策モデルを用いて計算するにあたり、実際の舗装マネジメントの現場において定期的な路面性状調査が3年ないし6年で行われている実態に基づき、定期的路面性状調査間隔 $r$ を1年刻みに1年間隔から6年間隔の場合について、各臨界的路面健全度と各臨界的舗装耐荷力を設定した場合に求められる使用限界リスク $\rho_5^{r,\xi,*}$ と期待ライフサイクル費用 $\overline{LCC}(r,\xi)$ を求めた。

図-5.3~図-5.11には、路面補修の意思決定に用いる臨界的路面健全度と舗装更新の意思決定に用いる臨界的舗装耐荷力を所与のランクとした場合に、使用限界リスク水準 $\rho_5^{r,\xi,*}$ の下で達成し得る最小期待ライフサイクル費用を示している。横軸がリスク管理水準を、縦軸が期待ライフサイクル費用を表している。

本研究の分析では臨界的劣化状態

$(i^*, s^*) = (3, 3), (3, 4) \cdots (5, 4), (5, 5)$  について計算を行った。図-5.3~図-5.11に、リスク管理水準(横軸)と期待ライフサイクル費用(縦軸)の関係を示した。各図の作成にあたり、路面健全度の劣化推移確率の導出で用いるハザード最低ランク5に到達する使用限界リスク水準 $\rho_5^{r,\xi,*}$ を求め、あるリスク管理水準を設定した場合に、設定したリスク管理水準を満足する調査政策(定期的路面性状調査間隔 $r$ )のうちで、期待ライフサイクル費用が最小値をとるものを所与のリスク管理水準下という条件付きの最適調査・補修更新政策とした。

道路管理者は判定された路面健全度 $i=5$ の場合に即時、路面補修の意思決定を行う状況を想定している。判定された劣化状態に対して臨界的劣化状態を設定し、それに応じた道路管理を行った場合にどういったライフサイクル費用の変化、またはサービス水準の変化が生じるかを本モデルを用いて見ることを主旨としている。

つまり、明確に使用限界と判定される以前に管理アクションを行う”予防保全”に依るライフサイクル費用とサービス水準への影響をみることに目的となる。

まず臨界的路面健全度を $i^*=5$ の場合をみる。ここで注意すべきは、臨界的路面健全度を最低ランクに設定したことにより、舗装更新の意思決定は考慮不足になり、かつ路面調査と路面補修に加担した管理体制となる。図-5.9~図-5.11には臨界的路面健全度が $i^*=5$ の場合を示している。臨界的路面健全度が $i^*=5$ の場合、 $i^*=3,4$ の場合の期待ライフサイクル費用 $\overline{LCC}$ に比べ非常に低額なマネジメントが最適調査・補修更新政策となっている。これは、補修の意思決定に必要な臨界的路面健全度が最低ランクであることから、舗装更新回数が少数となっていることが影響していると考えられる。つまり、舗装更新の履歴が蓄積されていない現状と類似する。本研究

では，劣化状態が収束する  $i^* = 5$  を路面補修の意思決定に用いるのは舗装更新の最適時点を考慮不足と考え，他の  $i^* = 3, 4$  とは別に，図-5.2 にリスク管理水準（横軸）と期待ライフサイクル費用（縦軸）の関係を示した。表-5.4 から分かるように，臨界的路面健全度  $i^* = 5$  に設定した場合，定期的路面性状調査間隔を短期化すればするほど期待ライフサイクル費用が低減化されているのが分かる。同臨界的路面健全度で，各臨界的舗装耐荷力に設定した場合を比較すると，各リスク水準の下では臨界的舗装耐荷力 ( $s^*$ ) を高く（低い値に）設定した管理手法の方が期待ライフサイクル費用  $\overline{LCC}$  が低減化されているのが分かる。つまり，臨界的舗装健全度 ( $i^*$ ) を 5 に設定した場合，舗装の劣化状態 ( $s$ ) がそれほど悪くない状態で舗装更新を実施し，かつ定期的路面性状調査間隔  $t$  が短小であればあるほど期待ライフサイクル費用  $\overline{LCC}$  は低減化される結論に到る。そのため，臨界的舗装健全度  $i^*$  を 5 に設定した場合の各リスク管理水準に関する最適期待ライフサイクル費用の関係図-5.2 は臨界的劣化状態  $(i^*, s^*) = (5, 3)$ ，図-5.9 と同じになることが分かる。定期的路面性状調査間隔を短期化すればするほど期待ライフサイクル費用  $\overline{LCC}$  が低減化される傾向から 1 年未満に大規模な路面性状調査を定期的に行うという現実的でない管理手法が最適補修更新政策になる。したがって，最適調査・補修更新政策として臨界的舗装健全度 ( $i^*$ ) を 5 に設定した管理は不適切と結論付けられる。

次に，舗装更新を考慮して”予防保全”の道路管理手法をみるため，臨界的路面健全度  $i^* = 3, 4$  の場合，図-5.3, …, 5.8 をみる。まず，各臨界的路面健全度  $i^* = 3, 4$  を設定し，各臨界的舗装耐荷力  $s^* = 3, 4, 5$  について，使用限界リスク水準  $\rho_5^{\xi, i^*}$  (表-5.4 参照) を求めた。その数値をもとに，リスク管理水準  $\bar{U}$  の範囲に使用限界リスク水準  $\rho_5^{\xi, i^*}$  がある政策の中で，期待ライフサイクル費用  $\overline{LCC}$  が最小値をとるものを最適調査・補修更新政策として，表-5.3 に示した。リスク管理水準  $\bar{U}$  を 0.008 以下と厳しく設定した場合，最適調査・補修更新政策は  $(i^* = 3, s^* = 3, r = 1)$  となる。そこから，リスク管理水準  $\bar{U}$  を 0.060 ~ 0.148 と少し緩めて設定した場合，最適調査・補修更新政策は  $(i^* = 4, s^* = 5, r = 1)$  となる。さらにリスク管理水準  $\bar{U}$  を 0.421 と緩く設定した場合，最適点検・補修政策は  $(i^* = 4, s^* = 5, r = 5)$  となる。さらに，臨界的路面健全度 ( $i^* = 5$ ) の場合とは異なり，調査間隔が長期化すればするほどライフサイクル費用  $\overline{LCC}$  が低減化されている傾向がわかる。臨界的路面健全度  $i^* = 3, 4$  の場合，臨界的劣化状態を低く，定期的路面性状調査間隔を長くすればするほど期待ライフサイクル費用が低減化される傾向がある。

ここでリスク管理水準と期待ライフサイクル費用の関係図-5.1をみる。リスク管理水準とライフサイクル費用のトレードオフの関係が図の外形の勾配変化から把握できる。つまり、舗装道路運営においてサービス水準を高いレベルからさらにサービスの向上を目指すために、より高いサービス水準を求めると急激な費用負担に直面し、一方で、費用削減を目指し続けるとサービス水準の低下は著しくなる傾向にあることが分かる。例として、現在、臨界的路面健全度 $i^* = 4$ 、臨界的舗装耐荷力 $s^* = 4$ 、定期的路面性状調査間隔 $r = 1$ で舗装道路管理をしていると想定する。経済的な都合から、管理費用を低減させるために臨界的路面健全度 $i^* = 4$ 、臨界的舗装耐荷力 $s^* = 5$ 、定期的路面性状調査間隔 $r = 1$ で行う舗装道路管理に変更したとする。この場合であれば、期待ライフサイクル費用は約4割削減できるが、所謂、最低ランクの舗装状態になる確率(使用限界リスク水準)が3倍近く増大したことになる。以上の議論より、一定以下のリスク管理水準と予算制約のもとでの最適調査・補修更新政策の必要性が分かる。

ただ、本研究では舗装の劣化確率一定の下での分析にとどまってしまったが、環境の変化による自然劣化速度への影響が本研究の期待ライフサイクル費用に及ぼす影響を分析する必要がある。

## 5.4 感度分析

舗装管理を行う上で、物価変動や新たな調査手段の出現などの影響で本研究の最適調査・補修更新モデルで所与のパラメータとしたFWD調査費用( $\zeta$ )、舗装更新費用( $D$ )が変動することは十分に考えられる。そういった局面で期待ライフサイクル費用の変化は予め把握することは舗装マネジメントを行う上で、道路管理者が必要とする情報といえる。本研究の最適調査・補修更新政策モデルを用いて、FWD調査費用( $\zeta$ )、舗装更新費用( $D$ )を変化させた場合の期待ライフサイクル費用を表-5.13に示した。まず、FWD調査費用、更新費用をそれぞれ $\zeta = \mu_\zeta \bar{\zeta}$ 、 $D = \mu_D \bar{D}$ と表す。ただし、 $\bar{\zeta}$ 、 $\bar{D}$ はそれぞれ基本ケースにおけるFWD調査費用、更新費用であり、 $\mu_\zeta$ 、 $\mu_D$  ( $0 < \mu_\zeta, \mu_D < \infty$ )は感度パラメータである。基本ケースの場合は $\mu_\zeta = 1$ 、 $\mu_D = 1$ である。本研究では $\mu_\zeta$ 、 $\mu_D$ を0.1から2.0にかけて0.1刻みに変化させて、所与のパラメータとしていたFWD調査費用( $\zeta$ )と舗装更新費用( $D$ )が変動した場合の期待ライフサイクル費用の変化をみる。また、費用変化と期待ライフサイクル費用変化を見るために道路管理者がリス

ク管理水準を0.057に設定したと想定した場合を計算した。費用の変化があった場合も、舗装劣化確率は変化しないため定常確率分布は変化しない。したがって、使用限界リスク水準も変化しないため費用最適調査補修・更新政策として $(r, i^*, s^*) = (1, 4, 4)$ が選択される。変動すると想定した諸費用の感度パラメータの変化と期待ライフサイクル費用の変化を図-5.14, 図-5.15に示した。2つの図から分かるように、諸費用の変動と期待ライフサイクル費用の変動は線形な関係を示しているのが分かる。つまり、最安価な調査手法や更新手法を選択することが、期待ライフサイクル費用削減に繋がり、一方で価格上昇が起きると一次関数より大きい次数で価格上昇するわけではないことが分かった。

## 第6章 おわりに

本研究では、所与のリスク管理水準の下で、路面性状調査費用、補修費用、舗装更新費用で構成されるライフサイクル費用を最小化するような定期的調査間隔と調査・補修更新政策を求める方法論を提言した。第2章では、階層的マルコフ連鎖過程からくる劣化過程の不確実性と、本研究における調査・補修スキームの考え方、そしてリスク管理とライフサイクル費用のトレードオフ関係について述べた。第3章では、各ハザード率の導出、さらに2種類の状態変数を用いて、舗装構造物の劣化推移確率を記述し、舗装構造の劣化過程を舗装耐荷力の低下過程と路面健全度の劣化過程からなる複合的なマルコフ劣化モデルを用いて表現した。第4章では、所与のリスク管理水準の下で期待ライフサイクル費用を最小にするような調査間隔と調査・補修更新政策を同時に決定する最適調査・補修更新政策モデルの定式化を行った。第5章では、実在の高速道路を対象とした適応事例からデータセットを作成し、リスク管理とライフサイクル費用のトレードオフ関係と比較することで、本研究で提言した方法論の有効性の分析を行った。本節では残された課題について述べる。

第一に、FWD調査間隔についての最適更新政策を追加的にモデル化することが必要となる。FWDの調査間隔を最適化するような最適調査・補修更新政策を定式化し、期待ライフサイクル費用の低減化をさらに求めることが必要となる。これには、路面健全度の劣化過程の進行加速の度合いから、舗装耐荷力の低下状態を評価するマネジメント手法の開発も必要とされる。

第二に、本研究で前提条件とし、適応事例にも該当する同一の舗装特性や交通特性を有する道路環境と異なった、多様な異質性や道路特性を対象にした場合も含めた最適な調査・補修更新政策モデルの定式化が必要となる。

第三に、補修工法に多様性がある場合に必要となる政策数が多数になった場合の最適調査・補修更新政策モデルの改良が必要となる。本研究では、路面補修工法は劣化状態に依存せず単一のものとして扱ったが、劣化状態に依存して補修工法や補修費用が異なることなどが考えられる。これらを考慮した最適調査・補修更新政策モデルの定式化が必要となる。



## 参考文献

- 1) 青木一也,山本浩司,小林潔司:劣化予測のためのハザードモデルの推計,土木学会論文集, No.791/VI-67, pp.111-124, 2005.
- 2) 津田尚胤,貝戸清之,青木一也,小林潔司:橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推計,土木学会論文集, No.801/I-73, pp.68-82, 2005.
- 3) 青木一也,山本浩司,津田尚胤,小林潔司:多段階ワイブル劣化ハザードモデル,土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.125-136, 2005.
- 4) 津田尚胤,貝戸清之,山本浩司,小林潔司:ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法,土木学会論文集, No.3/VI-62, pp.473-491, 2006.
- 5) 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.
- 6) 小濱健吾,岡田貢一,貝戸清之,小林潔司:劣化ハザード率評価とベンチマーキング,土木学会論文集A, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.
- 7) 小林潔司,熊田一彦,佐藤正和,岩崎洋一郎,青木一也:サンプル欠損を考慮した舗装劣化予測モデル,土木学会論文集F, Vol. 63, No.1, pp1-15, 2007.
- 8) 小林潔司,貝戸清之,林秀行:測定誤差を考慮した隠れマルコフ劣化モデル,土木学会論文集D,Vol.64,No.3,pp493-512,2008.9.
- 9) 貝戸清之,保田敬一,小林潔司,大和田慶:平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略,土木学会論文集, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.
- 10) 織田澤利守,石原克治,小林潔司,近藤佳史:経済的寿命を考慮した最適修繕政策,土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.169-184, 2004.
- 11) 青木一也,山本浩司,小林潔司:トンネル照明システムの最適点検・更新政策,土木学会論文集, No.805/VI-67, pp.105-116, 2005.

- 12) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適・補修政策, 土木学会論文集F, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.
- 13) 慈道充, 小林潔司: 不確実性下における最適点検補修ルール, 土木学会論文集, No.744/IV-61, pp.39-50, 2003.
- 14) 林秀和, 貝戸清之, 熊田一彦, 小林潔司: 競合的劣化ハザードモデル: 舗装ひび割れ過程への適用, 土木学会論文集D, Vol.65, No.2, pp.143-162, 2009.
- 15) 熊田一彦, 江口利幸, 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: モニタリングデータを用いた高速道路舗装の統計的劣化モデルの検討, 土木学会舗装工学論文集, 第14巻, pp.229-237, 2009.
- 16) 田村謙介, 小林潔司: 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, 2009.
- 17) 保田敬一, 慈道充, 小林潔司: 橋梁におけるライフサイクル期間や割引率がLCCに及ぼす影響: 建設マネジメント研究論文集, Vol.14, 2007.
- 18) 保田敬一, 小林潔司: BMSにおける点検結果と状態推移確率がLCCに及ぼす影響: 建設マネジメント研究論文集, Vol.11, 2004.

## 付録A 隠れマルコフ劣化モデルの概要

隠れマルコフ連鎖モデルは、測定される状態変数に誤差が介在するようなマルコフ連鎖モデルである。隠れマルコフ連鎖モデルは、本来、軽量経済学の分野ではマルコフ切り替えモデル (Markov Switching Model) として知られている。複数の確率分布の中からマルコフ連鎖によって変動する確率によってランダムに選ばれた1つのデータが生成される形をとる。隠れマルコフ連鎖モデルの特徴は、各時点で各状態が生起する確率を推計できる点である。近年では、時系列モデルに関する研究が進展し、動的混合分布モデルと呼ばれる時系列統計モデルに関する研究が進展しつつあり、経済金融データの計量分析の分野では、景気変動や資産価格のボラティリティの変動などの不定期に発生する経済や市場の状態変化をモデル化する際に利用される。

統計学上では、隠れマルコフ連鎖モデルは混合分布モデル (Mixture Distribution Model) の1つである。混合分布モデルは複数の確率分布を混合することで任意の確率分布を近似する確率モデルとされ、データが標準的でない確率分布に従う場合に利用される。一方で、モデル推計を行う際に尤度が特殊な形をとるため通常の方法やベイズ推計法を利用するには障害が大きかった。そのため、多くの混合分布モデルにギブスサンプラー (Gibbs Sampler) を適応することで、マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法の発展が隠れマルコフ連鎖モデルの研究に大きく貢献している。

### A.1 本研究の階層的隠れマルコフ劣化構造

本研究で取り扱った路面健全度の劣化過程と舗装耐荷力の低下過程の階層的構造を示す。各々の劣化過程を考えるために、初期時点  $t = 0$  において舗装全体が更新され、耐荷力が  $g(0) = 1$ 、健全度が  $h(0) = 1$  に確定したと想定し、時間の経過とともに路面と舗装構造ともに劣化が進行していくと考える。基層以下の各層に関しては、初期時点以降補修が実施されないが、路面に関しては、離散時間軸上の時点  $t_k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) において補修が実施されるとする。舗装構造の耐荷力の低下過程は FWD 調査などが必要となるため観測不可能であるが、マルコフ推移確率 (3.6) を用

いると、時点 $t$ における舗装構造の耐荷力分布 $\nu(t) = \{\nu_1(t), \dots, \nu_S(t)\}$ は

$$\nu(t_k + u) = \nu(0)P(t_k + u) \quad (\text{A.1})$$

と表すことが出来る。

ここで、舗装更新時点では耐荷力分布は全く低下していない状態なので $\nu(0) = (1, 0, \dots, 0)$ と表される。

次に、直近の路面補修( $t = t_k$ )が実施されてから $u_k$ 期が経過した時点 $t_k + u_k$ における路面健全度の推移確率についてみる。

各時点 $t_k, \dots, t_k + u_k$ における舗装構造の耐荷力は観測できないが、耐荷力分布 $\nu(t_k + u)$ (A.1)に従って分布していると考え、時点 $t_k + u_k$ から時点 $t_k + u_k + 1$ における路面の推移確率は、複数の舗装構造の耐荷力に対する路面の推移確率を加重平均した混合マルコフ推移確率

$$\tilde{\pi}^{ij}(t_k + u) = \sum_{s=1}^S \nu_s(t_k + u) \pi^{ij}(s) \quad (\text{A.2})$$

で表される。

これは混合分布モデル(mixture distribution model)と呼ばれる。

$$\sum_{j=1}^I \tilde{\pi}^{ij}(t_k + s) = \sum_{s=1}^I \nu_s(t_k + u) \sum_{j=1}^I \pi^{ij}(s) = 1$$

を満足するため $\tilde{\pi}^{ij}(t_k + s)$ は推移確率の条件を満たす。

ここで、 $\tilde{\pi}^{ij}(t_k + u)$ を $(i, j)$ 要素とする推移確率行列 $\tilde{\pi}(t_k + u)$ を定義する。

ここまでに記したように舗装構造の耐荷力分布 $\nu(t_k + u)_k$ は時間とともに変化する。同時に路面の推移確率行列 $\tilde{\pi}(t_k + u_k)$ は舗装構造の分布確率に影響されるために時間とともに変化する。つまり、舗装構造の耐荷力の低下過程が斉次マルコフ連鎖で表現できている場合でも、路面の劣化過程は非斉次マルコフ連鎖に従うことになる。

舗装構造の場合と同様に路面の離散時間軸の局所時点 $u_k$ における路面の健全度分布を $\rho(u) = \{\rho_1(u), \dots, \rho_I(u)\}$ と表す。また、更新時点では路面の健全度は全く劣化していないので点 $u = 0$ における健全度分布は $\rho(0) = \{1, 0, \dots, 0\}$ と表す。

従って、時点 $t_k + u_k$ における路面の健全度分布は

$$\rho(u) = \rho(0) \prod_{v=0}^{u-1} \tilde{\pi}(t_k + v) \quad (\text{A.3})$$

と表すことが出来る。以上のことから，路面と舗装構造の劣化過程は，任意の時点  $t = t^k + u_k$  において

$$\nu(t) = \nu(0)\{P\}^{t_k+u} \quad (\text{A.4})$$

$$\rho(u) = \rho(0) \prod_{v=0}^{u-1} \tilde{\pi}(t_k + v) \quad (\text{A.5})$$

と表すことが出来る。

このように，舗装構造の劣化過程は齊次マルコフ連鎖モデル(A.4)で表され，路面の健全度劣化過程は非齊次マルコフ連鎖モデル(A.5)を用いて表現できる。

ここで注意したいのは舗装構造のマルコフ連鎖モデル(A.4)は直接的に観察不可能であり，「舗装構造の耐荷力分布が路面の劣化過程(A.5)に影響を及ぼす」という階層構造を成している。

本研究では，このような特性をもつモデルを「マルコフ連鎖モデルを階層的隠れマルコフ劣化モデル」と呼ぶこととする。

# 付録B 付図

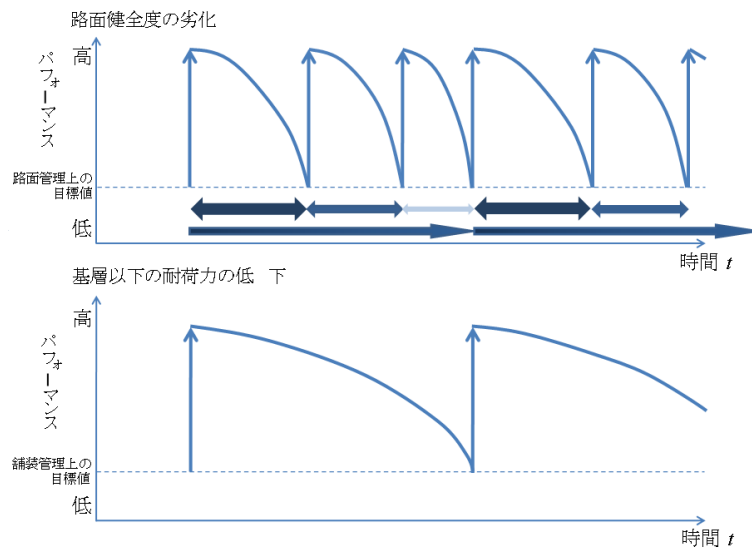


図-2.1 舗装劣化過程

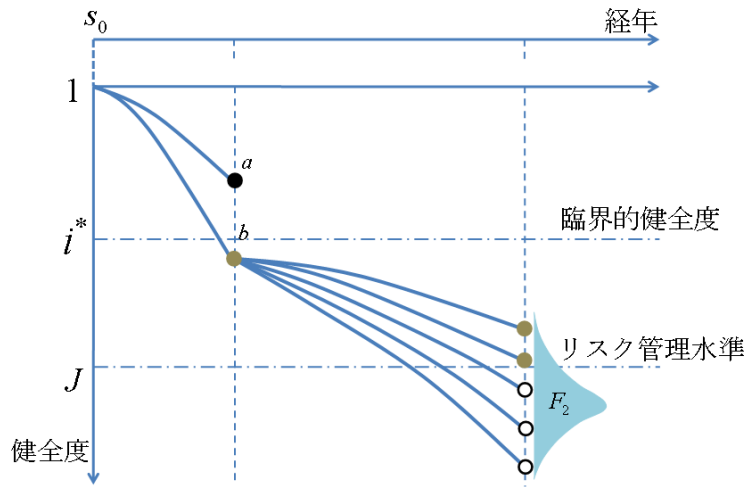


図-2.2 舗装のリスク管理水準

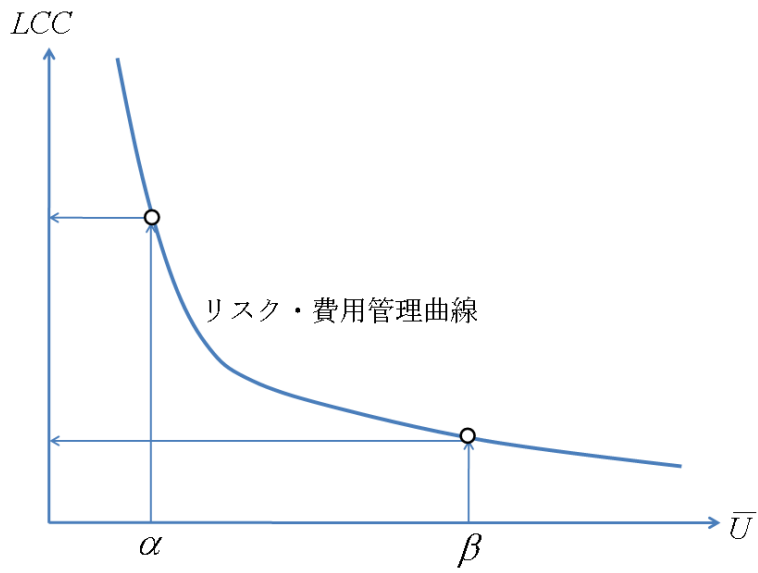


図-2.3 リスク-費用管理曲線

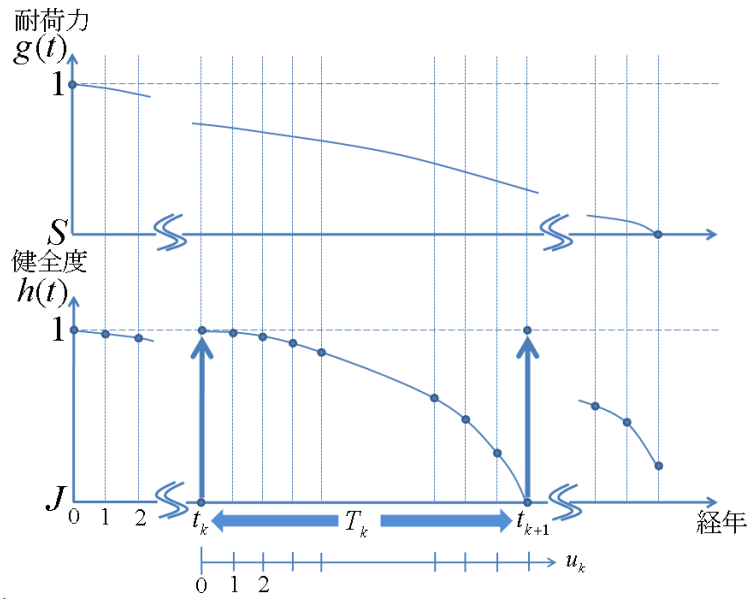


図-3.1 舗装劣化過程

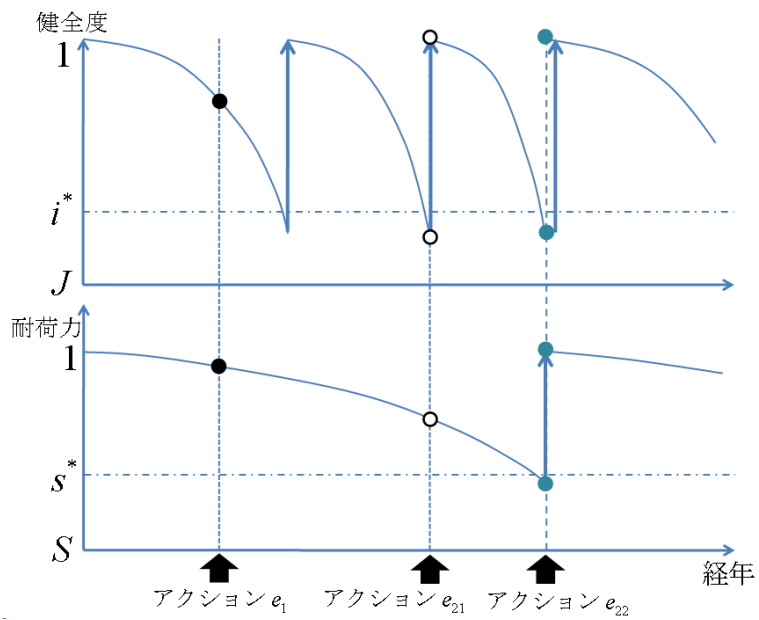


図-4.1 調査・補修更新政策



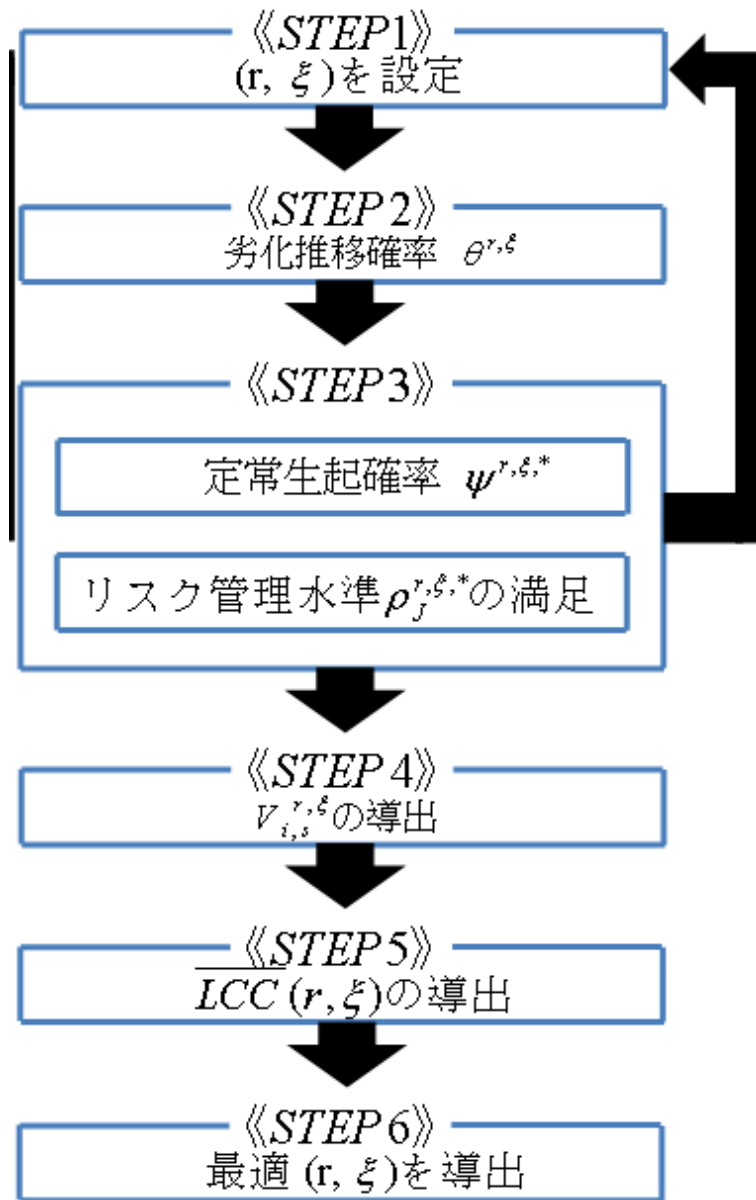


図-4.2 最適調査・補修更新モデルの解法

表-5.1 路面健全度ランク

路面健全度	
健全度ランク	ひび割れ評価範囲
1	$Cr = 0$
2	$0 < Cr \leq 2.5$
3	$2.5 < Cr \leq 5.0$
4	$5.0 < Cr \leq 10$
5	$10 < Cr \leq 20$
6	$20 < Cr$

表-5.2 舗装耐荷力ランク

舗装耐荷力	
耐荷力ランク	FWD調査評価範囲
1	$D \leq 400$
2	$400 < D \leq 800$
3	$800 < D \leq 1200$
4	$1200 < D \leq 1600$
5	$1600 < D$

表-5.3 最適政策とリスク管理水準,期待ライフサイクル費用

$i^*$	$s^*$	$r$	$\bar{U}$	$\overline{LCC}(r^*, \xi^*)$
3	3	1	0.008	23261976
3	4	1	0.014	15350828
3	5	1	0.050	8050950
4	4	1	0.057	7410572
3	5	2	0.059	7326734
4	5	1	0.148	4174393
4	5	2	0.226	4027701
4	5	3	0.297	3906727
4	5	4	0.367	3807467
4	5	5	0.421	3727001
4	5	6	⋮	3662627
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表-5.4 使用限界リスク水準と期待LCC

$(3, 3)$	$\rho(5)$	E(LCC)	$(3, 4)$	$\rho(5)$	E(LCC)	$(3, 5)$	$\rho(5)$	E(LCC)
r=1	0.006770	23261976	r=1	0.0087020	15350828	r=1	0.0141308	8050950
r=2	0.031501	20995459	r=2	0.0385739	13911231	r=2	0.0574793	7326734
r=3	0.069732	18979083	r=3	0.0827750	12641626	r=3	0.1166615	6710498
r=4	0.116334	17181812	r=4	0.1351838	11518032	r=4	0.1826857	6184123
r=5	0.167844	15577700	r=5	0.1919353	10521154	r=5	0.2501678	5733396
r=6	0.222002	14145041	r=6	0.2504550	9635538	r=6	0.3158288	5346445
$(4, 3)$	$\rho(5)$	E(LCC)	$(4, 4)$	$\rho(5)$	E(LCC)	$(4, 5)$	$\rho(5)$	E(LCC)
r=1	0.0447251	10829503	r=1	0.0503923	7410572	r=1	0.0646555	4174393
r=2	0.1108057	10172741	r=2	0.1216201	7023454	r=2	0.1484839	4027701
r=3	0.1756466	9579777	r=3	0.1902800	6677976	r=3	0.2264799	3906727
r=4	0.2366018	9044061	r=4	0.2542339	6370267	r=4	0.2976488	3807467
r=5	0.2935693	8560594	r=5	0.3136176	6096982	r=5	0.3624658	3727001
r=6	0.3469109	8124896	r=6	0.3688733	5854625	r=6	0.4213778	3662627
$(5, 3)$	$\rho(5)$	E(LCC)	$(5, 4)$	$\rho(5)$	E(LCC)	$(5, 5)$	$\rho(5)$	E(LCC)
r=1	0.0739466	679231	r=1	0.0798373	701011	r=1	0.0946816	784550
r=2	0.1419174	697911	r=2	0.1523354	722878	r=2	0.1784046	809732
r=3	0.2046838	717399	r=3	0.2186493	745472	r=3	0.2534124	836085
r=4	0.2629134	737609	r=4	0.2797192	768630	r=4	0.3213128	862878
r=5	0.3171920	758451	r=5	0.3362960	792149	r=5	0.3830911	889436
r=6	0.3680216	779806	r=6	0.3889466	815837	r=6	0.4392989	915330

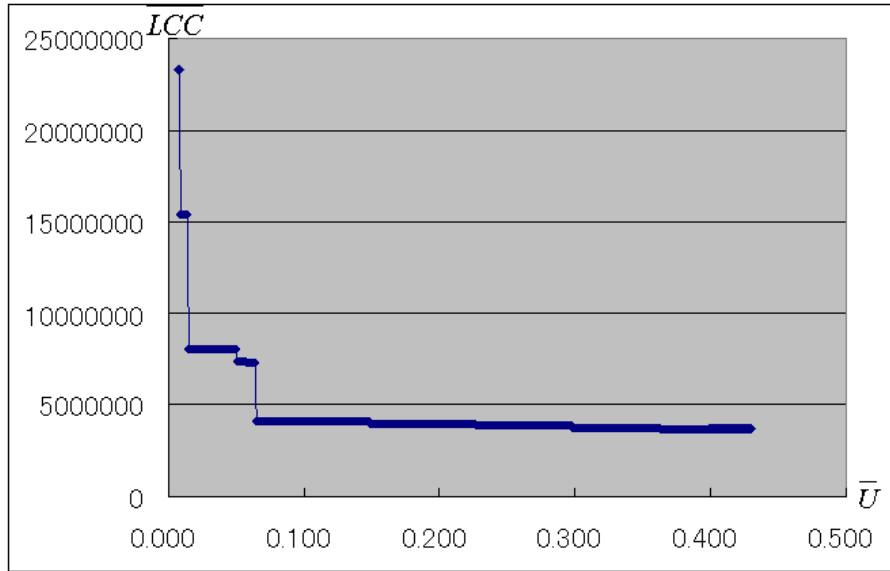


図-5.1 リスク管理水準に関する期待ライフサイクル費用の関係

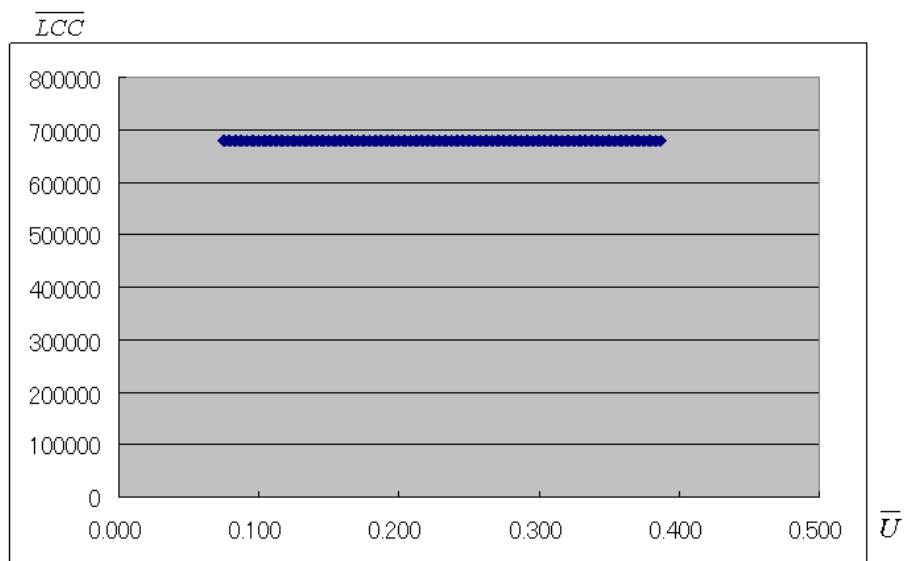


図-5.2 臨界健全度を5に設定した場合

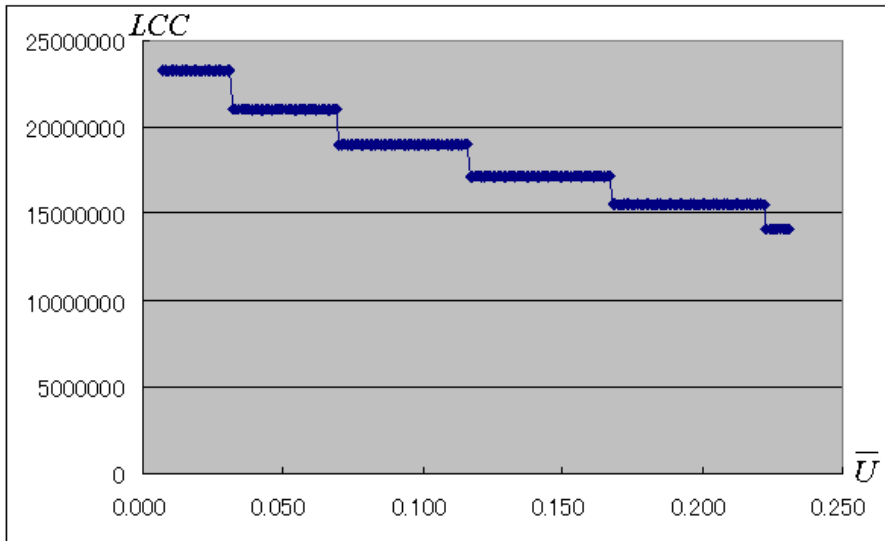


図-5.3 臨界劣化状態(3,3)の場合

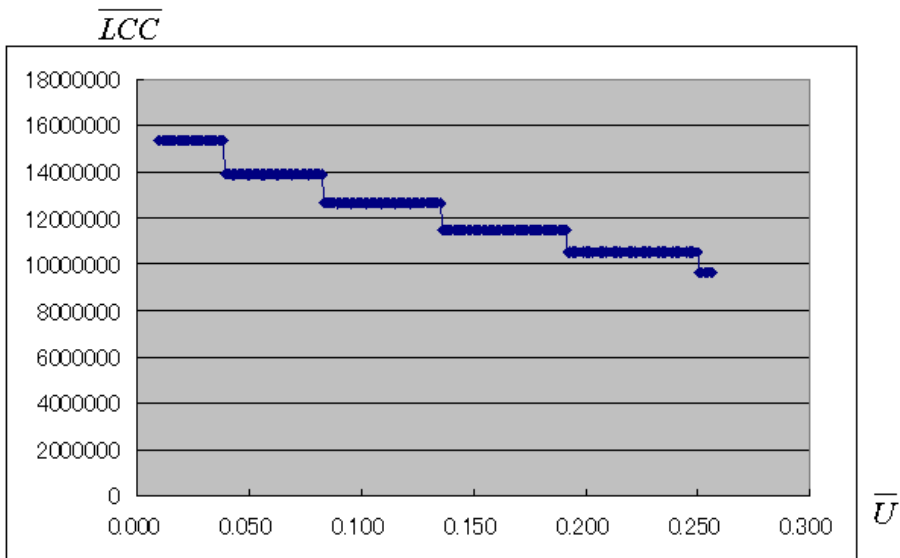


図-5.4 臨界劣化状態(3,4)の場合

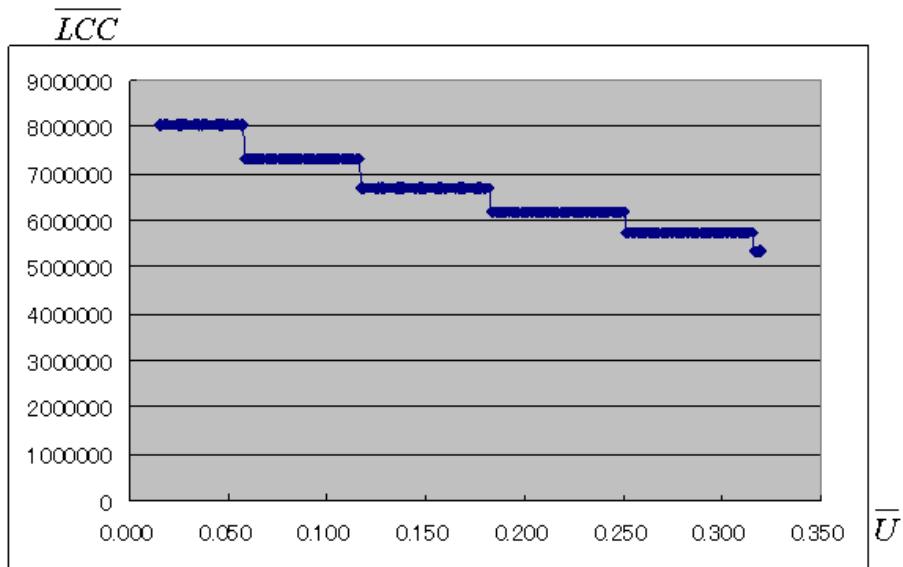


図-5.5 臨界劣化状態(3,5)の場合

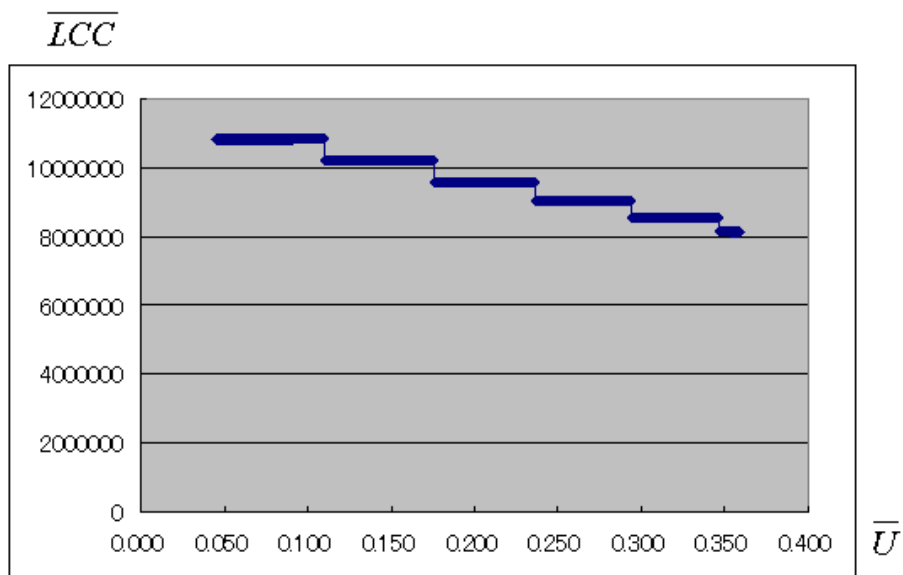


図-5.6 臨界劣化状態(4,3)の場合

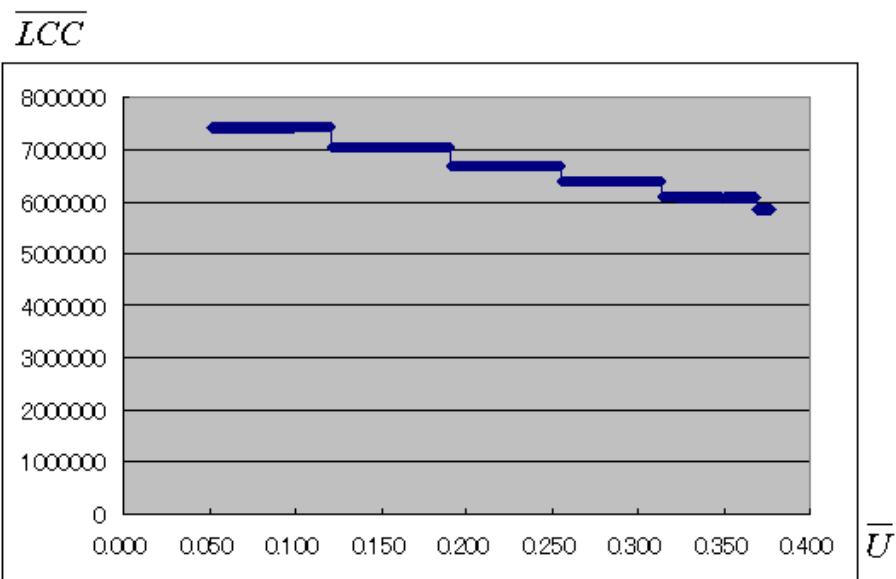


図-5.7 臨界劣化状態(4,4)の場合

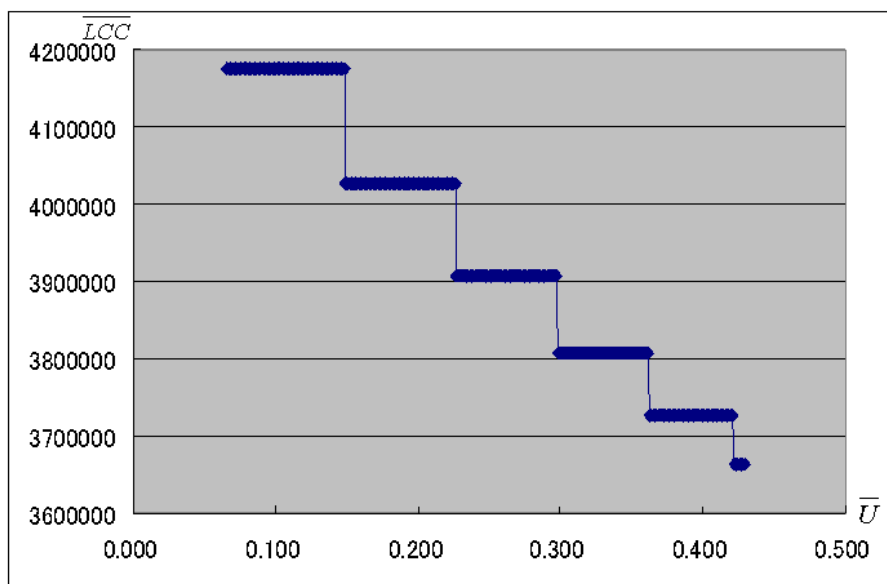


図-5.8 臨界劣化状態(4,5)の場合

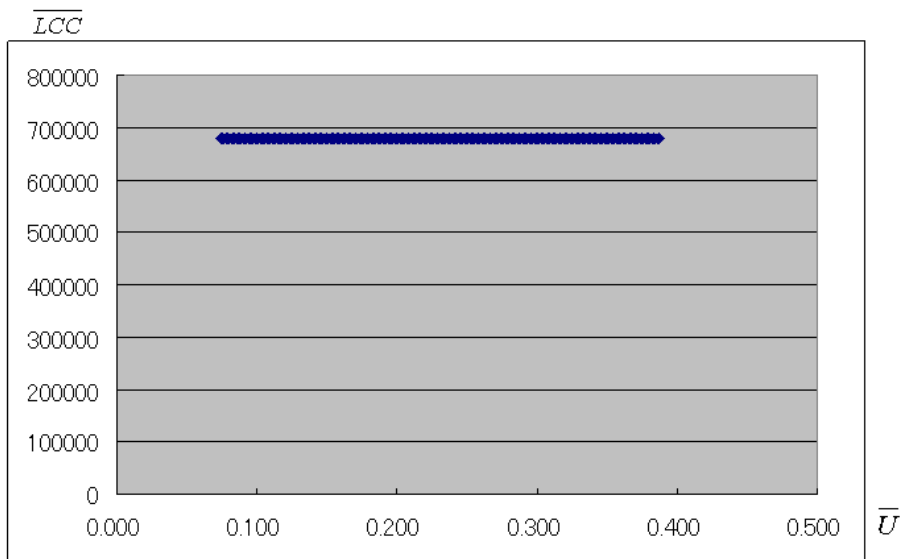


図-5.9 臨界劣化状態(5,3)の場合

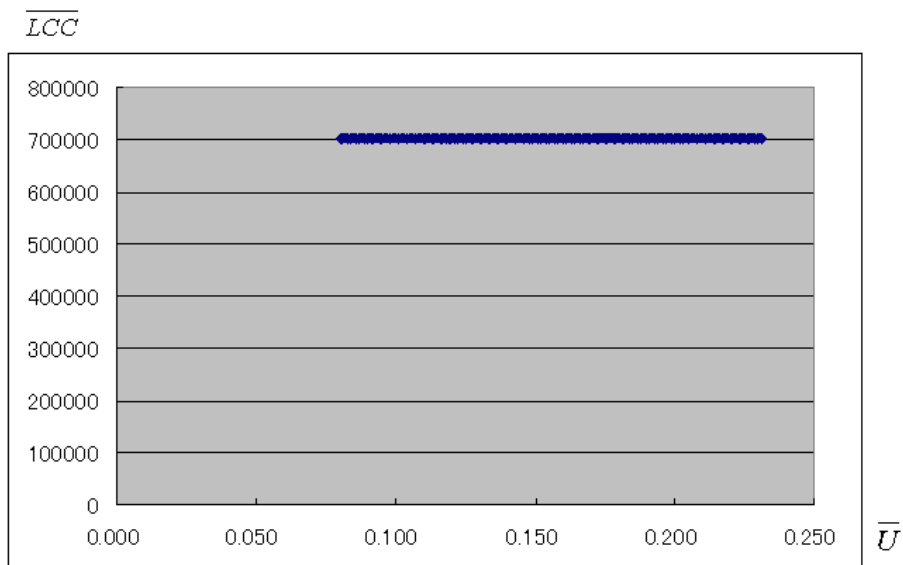


図-5.10 臨界劣化状態(5,4)の場合



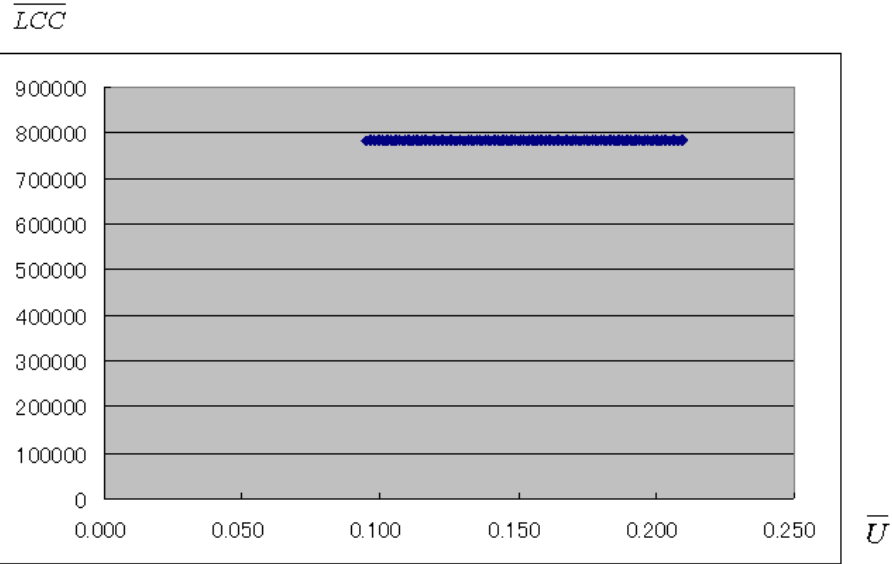


図-5.11 臨界劣化状態 (5,5) の場合

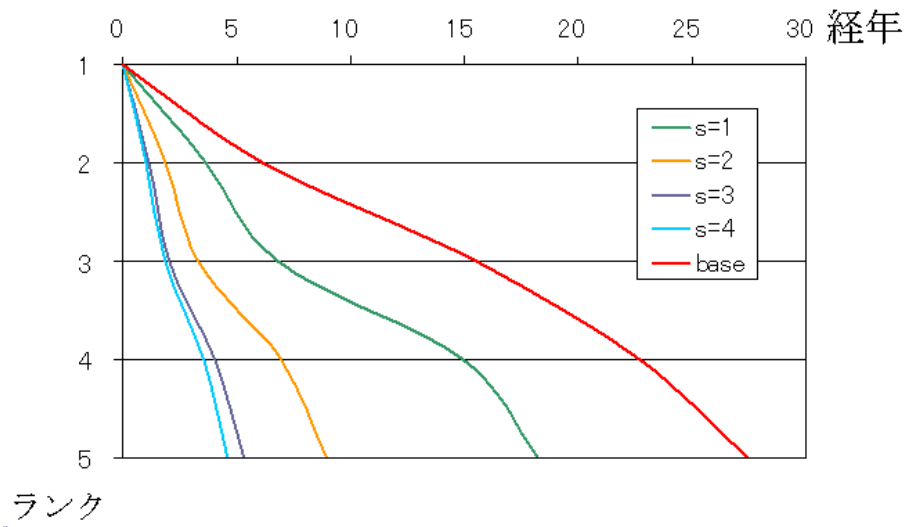


図-5.12 パフォーマンス曲線

$\mu(\xi)$	E[LCC]( $\xi$ )	$\mu(D)$	E[LCC](D)
0.1	7160644	0.1	2327763
0.2	7188414	0.2	2892519
0.3	7216184	0.3	3457276
0.4	7243953	0.4	4022033
0.5	7271723	0.5	4586789
0.6	7299493	0.6	5151546
0.7	7327263	0.7	5716302
0.8	7355033	0.8	6281059
0.9	7382802	0.9	6845816
1.0	7410572	1.0	7410572
1.1	7438342	1.1	7975329
1.2	7466112	1.2	8540085
1.3	7493881	1.3	9104842
1.4	7521651	1.4	9669599
1.5	7549421	1.5	10234355
1.6	7577191	1.6	10799112
1.7	7604961	1.7	11363868
1.8	7632730	1.8	11928625
1.9	7660500	1.9	12493382
2.0	7688270	2.0	13058138

図-5.13 諸費用変化に対する感度分析

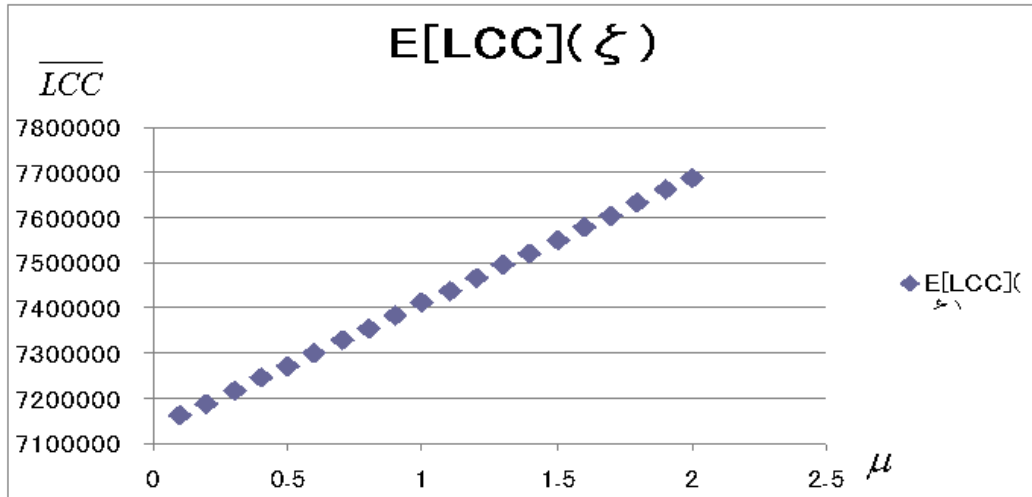


図-5.14 FWD調査費用変化に対する感度分析

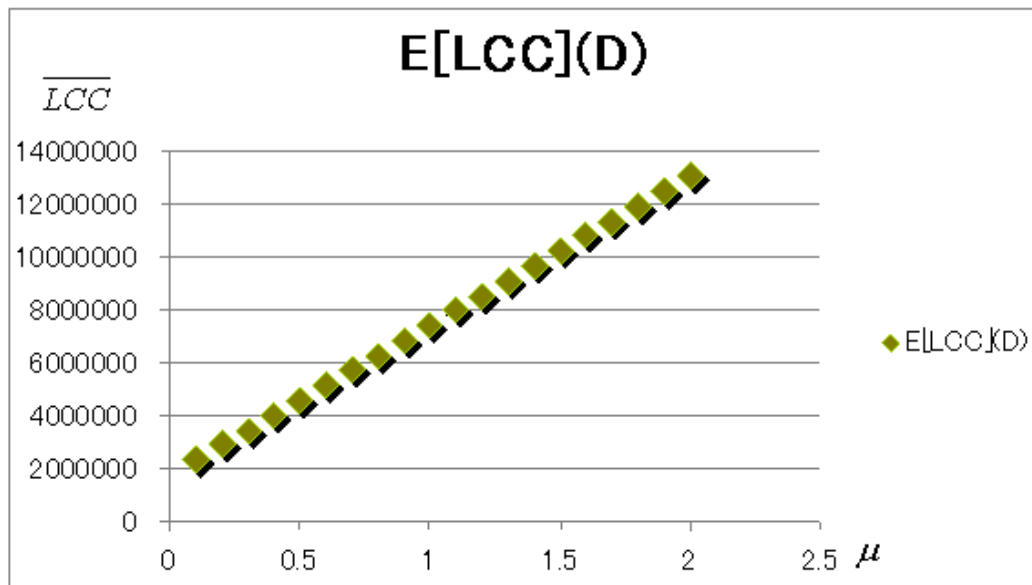


図-5.15 舗装更新費用変化に対する感度分析

## 謝 辞

本論文を結ぶにあたり、本研究の遂行に際して、御多忙のなか本研究に関する基礎的な素養を懇切丁寧に御教授いただき、関係する既存研究の御指導から本研究のモデル形成の道標を示していただきました京都大学経営管理大学院の小林潔司教授に心より感謝申し上げます。京都大学大学院工学研究科の松島格也准教授、大西正光助教、吉田護助教には、本研究の遂行に際し、適切な御指導と御助言をいただくとともに、論文作成に取り組む姿勢を学ばしていただきました。心より感謝の意を表します。大阪大学大学院工学研究科の貝戸清之教授には本研究の作成に際し、本研究の基礎となる考え方や、アセットマネジメントの実際の活用の如何を学ばせていただきました。心より感謝の意を表します。大阪大学大学研究科の起塚亮輔氏には、本研究の基礎の部分の疑問点に対して懇切丁寧に相談にのっていただき、心より感謝の意を表します。そして、京都大学工学研究科都市社会工学専攻計画マネジメント論の研究室の諸兄には、本研究を取りまとめる上で多大な御協力を頂きました。ここに深く感謝する次第です。

