

劣化過程の不確実性を考慮した路面性状調査の 最適実施方策

小林潔司¹・江口利幸²・大井明³・青木一也⁴・貝戸清之⁵

¹フェロー会員 京都大学経営管理大学院 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail: kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

²正会員 東日本高速道路株式会社関東支社京浜管理事務所 (〒 224-0044 横浜市都筑区川向町 1047)
E-mail: m.eguchi.ac@e-nexco.co.jp

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒 194-8508 町田市忠生 1-4-1)
E-mail: a.oi.aa@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 株式会社パスコ研究開発センター (〒 153-0043 目黒区東山 2-8-11 目黒ビル新別館 1F)
E-mail: kiakzo6013@pasco.co.jp

⁵正会員 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

本研究は、不確実な劣化過程を有する道路舗装の最適調査・補修政策を決定する方法論を提案する。道路舗装の劣化過程には多大な不確実性が存在するが、路面性状調査により調査時点における舗装の劣化状態を確定的に把握できる。道路管理者は、路面性状調査を実施することにより、調査時点において舗装の補修を実施すべきか否かに関して、より正確な情報に基づいて意思決定を行うことができる。本研究では、路面性状調査の経済便益をリアルオプション価値として評価するとともに、期待ライフサイクル費用を最小に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・補修モデルを提案する。適用事例では、高速道路の路面性状調査を対象として、本研究で提案するモデルの有効性を実証的に検証する。

Key Words : *pavement management, inspection policy, real option, state-dependent rules*

1. はじめに

道路舗装の劣化過程には多くの不確実性が介在しており、将来時点における舗装の劣化状態を確定的に予想することは困難である。このような舗装の劣化過程の不確実性を考慮した統計的劣化予測モデルとして、マルコフ劣化モデル等が提案されている^{1)~7)}。統計的劣化予測モデルを用いることにより、実際の路面性状調査結果に基づいて、現実の実態に即して劣化過程を予測することが可能となった。その結果、舗装構造や舗装材料、補修方法のライフサイクル費用評価の信頼性が向上した。

ライフサイクル費用に基づいた補修政策に関する分析は、ネットワークレベルにおける予算計画や補修基準の設定等、個別の道路区間を集計化したマクロなレベルにおける補修政策に関する情報を提供する。しかし、個別区間におけるミクロな補修政策を検討する場合、個々の路面性状に関する具体的な健全度に基づいて補修方法や補修時期を検討することが必要である。多くの外的要因が舗装の劣化過程に影響を及ぼすため、個別道路区間の舗装の劣化過程を確定的に予測することは極めて困難である。このため、道路舗装の維持補修の有無を決定するためには、路面性状調査等により舗装の

健全度をモニタリングすることが不可欠となる。

舗装の健全度情報を獲得するためには、路面性状調査費用や交通規制等による社会費用が発生する。モニタリング費用を抑制するためには、路面性状調査の実施頻度を減少させることが望ましい。一方、時間の経過にともなって、舗装の健全度に関する不確実性が増加する。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する場合、時間が経過するほどリスク管理水準を達成できないリスクが増加する。さらに、舗装の劣化状態が進展し、舗装の補修費用が増加する可能性もある。したがって、道路管理者が設定する舗装サービス水準に関する所与のリスク管理水準の下で、補修費用、社会的費用、モニタリング費用で構成される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の補修戦略を求めるとの方法論が必要となる。

以上の問題意識の下で、本研究では、舗装の劣化過程をマルコフ劣化モデルで表現するとともに、所与のリスク管理水準の下でライフサイクル費用を最小にするような調査間隔と補修政策を同時に決定するマルコフ決定モデル(以下、最適調査・補修モデルと呼ぶ)を定式化する。以下、**2.**で本研究の基本的な考え方を説明する。**3.**で、最適調査・補修モデルを定式化する。**4.**

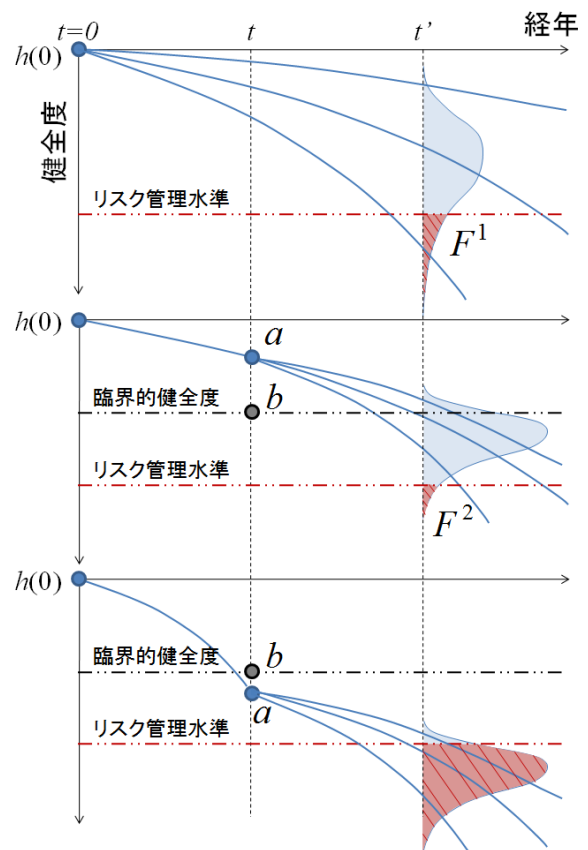
で、追加調査を考慮した拡張モデルを定式化する。5. で路面性状調査の経済便益について考察し、6. において、実際の高速道路を対象とした実証分析事例を示す。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要

土木施設の維持・補修方法として、1) 時間依存的ルール、2) 状況依存的ルールという2種類の補修戦略を考えることができる。時間依存的ルールは、一定の時間間隔を経て定期的に土木施設の維持更新を実施する方法である。たとえば、照明施設等の道路付帯施設のように、数多くの小規模の設備で構成されているような設備・機器システムや、管路等の地中埋設物のように維持管理費用に調査費用が占める割合が高くなるような土木施設に関しては、定期調査を実施せず、土木施設の劣化状態に関わらず定期的に土木施設や設備を更新するという時間依存的ルールを適用することが望ましい。一方、劣化過程に多大な不確実性が存在する場合、土木施設の劣化状態に依存して補修政策を決定するという状況依存的ルールを採用することが望ましい。本研究では、道路舗装の劣化過程の不確実性に着目し、状況依存的ルールを用いた調査・補修政策を求める方法論を提案する。

破壊や故障がある定常的な確率過程に従って生起するようなシステムの最適修繕戦略に関しては膨大な研究が蓄積されている^{8),9)}。特に、健全度を離散的な状態変数で記述するマルコフ決定モデル¹⁰⁾は、劣化過程の記述が簡単であり、土木工学の分野でも数多くの実用モデル¹¹⁾⁻¹⁹⁾が提案されている。多くの土木施設においては、調査業務を通じてのみ施設の健全度が部分的に観察可能である場合が少なくない。このように劣化過程が直接観測可能でないような施設の修繕問題をマルコフ決定過程を用いて分析する方法がいくつか提案されている。しかし、そこでは調査時期があらかじめ確定的に与えられており、定期的な調査により獲得した調査情報に基づいて修繕投資の有無を決定するアプローチとなっている。特に、地下埋設物のような土木施設の調査費用は無視できない。このような施設に関しては調査のタイミングを決定すること自体が問題となる。このような問題意識の下に、調査間隔と補修政策を同時に求める最適調査・補修モデルが提案されている¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。本研究では、まず道路舗装のマネジメントを対象として最適調査・補修モデルを基本モデルとして定式化する。さらに、本研究では、定期調査だけでなく、定期調査で劣化の進展が発見された箇所に関して追加調査を行い、必要な時点で追加補修を実施するような追加調査・補修政策を加味した最適調査・補



注) 図の上段は、時点 t で路面性状を実施しなかった場合、中段は、時点 t で路面性状調査を実施し、その時に観測された健全度が a であることを示す。一方、下段は、時点 t における劣化状態 a が、臨界的健全度(点 b)を下回っており、補修を見送った結果、時点 t' においてリスク管理水準を下回る確率が増加する様子を表している。

図-1 劣化過程の不確実性

修モデルを拡張モデルとして定式化する。このような場所を限定した追加調査・補修の機会を設けることにより、調査費用と補修費用の追加的な削減が可能となる。このような拡張モデルは、追加調査・補修政策を決定するようなサブマルコフ決定モデルを内蔵するマルコフ決定モデルとして定式化できる。筆者の知る限り、このような拡張型マルコフ決定モデルに関する研究事例は見あたらない。

(2) 劣化過程の不確実性と調査の目的

道路舗装の劣化には多大な不確実性が介在し、劣化過程を確定的に予測することは不可能である。いま、初期時点 $t = 0$ において路面性状調査が実施され、観測された舗装の健全度を $h(0)$ と表記する。初期時点 $t = 0$ から時間が経過するにつれて、舗装の劣化が図-1に示すような劣化過程により進行する。同図には、舗装の劣化過程として想定されるいくつかのサンプルパスが記載されている。舗装の劣化過程に関しては不確実性

が存在し、時間が経過するほど劣化状態の不確実性が大きくなる。ある時点 t において、路面性状調査が実施された場合を考える。路面性状調査を実施することにより、調査時点における舗装の健全度を観測することができる。時点 $t > 0$ における舗装の健全度を $h(t)$ と表す。時点 t から、さらに時間が経過することにより、再び舗装の劣化が進展する。ここで、時点 t' ($t' > t$)に着目する。時点 t' において道路管理者は舗装の健全度の分布状態を推定する。同図には、時点 t で路面性状調査を実施しなかった場合に、道路管理者が推定できる健全度の確率分布 F^1 と、時点 t における路面性状調査で獲得した情報を付加して推定した確率分布 F^2 を示している。時点 t に路面性状調査を実施することにより、時点 t' における健全度の不確実性(確率分布 F の分散)を小さくすることが可能となる。ここで、道路管理者が舗装マネジメントの目標として、「舗装の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抑える」というリスク管理目標を設定する場合を考える。たとえば、図-1の例では、時点 t' において、健全度が所与のリスク管理水準を下回る確率は確率分布 F^1 、 F^2 の斜線部の面積で定義される。路面性状調査を実施することにより、調査時点における健全度に関する不確実性を除去することが可能となる。さらに、調査時点以降における不確実性も削減することが可能となり、次節で述べるような理由により、ライフサイクル費用の削減に資することができる。

(3) 調査・補修ルール

舗装の健全度を定期的な路面性状調査により観測し、路面性状調査の結果に基づいて道路舗装の補修実施の有無が判断されると考える。いま、図-1において、時点 t における路面性状調査により健全度が点 a であることが判明したとする。道路管理者は、1) 道路補修の実施を見送り、次回の路面性状調査の結果に基づいて補修の有無を判定する(アクション e_1)、2) 直ちに道路補修を実施する(アクション e_2)、という2種類のアクションを考える。道路管理者がアクション e_2 を選択した場合、健全度は健全な状態(初期状態)に回復する。アクション e_1 を採用した場合、時点 t から、つぎの定期調査時点 t' まで劣化が進展する。時点 t において、補修の実施を見送った場合、時点 t' における健全度を確定的に把握できない。しかし、時点 t の定期調査により、当該時点における健全度に関する情報を獲得しているため、時点 t' における健全度の確率分布 F^2 を予測することができる。本研究の舗装マネジメントでは、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に維持することを管理目標としている。当然ながら、時点 t における劣化状態が悪くなるほど、補修の実施を

見送った時に、次の定期調査時点 t' においてリスク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-1の点 b に示すように、今期に補修を見送れば、次の定期調査時点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健全度が存在する。この臨界的健全度は、補修基準を設定する補修政策として定義される。すなわち、補修政策は、定期調査時点において「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できる。

以上の議論では、定期調査間隔を与件としていた。調査を頻繁に実施すれば(調査間隔を短くすれば)、ある定期調査時点における健全度が同一であっても、次回の定期調査時点において、舗装の健全度がリスク管理水準を満足しない確率は小さくなる。補修方法が舗装の状態に依存せず一定であると仮定した場合、舗装の補修費用を小さくするためには、補修の実施の有無を判定するための臨界的健全度ができるだけ事後的補修となるような悪い状態であることが望ましい。したがって、補修費用を抑制するためには、定期調査間隔を小さくすることが最適な調査の実施方策となる。一方で、調査間隔を減少すれば、調査費用が増加する。したがって、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調査間隔と補修政策を同時に求めることが必要となる。なお、道路管理者が社会的費用の最小化を考える場合、利用者費用も含めたライフサイクル費用の最小化を検討することが理想的である。しかし、現時点において、道路管理者が負担する直接的費用(調査費、補修費)と比較して利用者費用の推計精度には課題が残されていると言わざるを得ない。そこで、本研究では、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。その代わりに、利用者の安全性や快適性等を総合的に考慮して、舗装の健全度に対してリスク管理水準を設けることとした。

(4) リスク-費用管理曲線

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。リスク管理水準に関しては、3.(2)で定式化するように、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。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の下で、ライフサイクル費用を最小にするように定期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。以上の考え方で求めた最適調査間隔と補修政策は、リスク管理水準を与件として求めた条件的最適調査・補修政策である。ここで、リスク管理水準

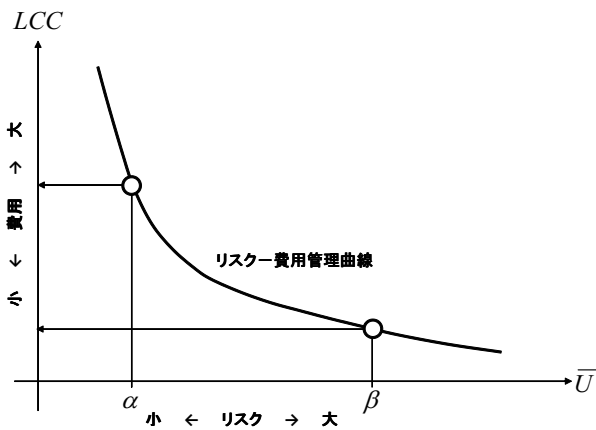


図-2 リスク-費用管理曲線

の値をパラメータと考え、個々のリスク管理水準に対応する条件付き最適調査・補修政策を求めれば図-2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した曲線を得ることができる。本研究では、このような曲線をリスク-費用管理曲線と呼ぶ。舗装の劣化過程に不確実性が存在するため、たとえば点αに示すようにリスク管理水準を厳しく設定すれば頻繁な調査が必要となり、ライフサイクル費用の増加を招く。したがって、現実的には一定程度のリスクを受け入れざるを得ない。一方で、現状が同図の点βに位置する場合、わずかな調査費用の節約が、リスク管理水準の大幅な低下を招くことになる。道路管理者がサービス水準の達成確率に関するリスク管理水準を決定すれば、それを実現するための最適調査間隔・補修政策を求めることができる。道路管理者は、利用者の効用や管理瑕疵の可能性等を総合的に配慮し、リスク管理水準を決定することが必要となる。リスク管理水準の決定問題は、本研究の域を超えているが、リスク-費用管理曲線は道路管理者が適切なリスク管理水準を決定する上で重要な役割を果たすことになる。

3. 基本モデル

(1) モデル化の前提条件

カレンダー時刻 s_0 を初期時点とする離散的時間軸 $t = 0, 1, 2, \dots$ を考え、離散的時間軸上の点を時点と呼び、カレンダー時刻と区別する。単位時間幅を1に基準化する。舗装の健全度を J 個のレーティング i ($i = 1, \dots, J$) で表現する。 i の値が大きくなるほど、劣化が進展している。時点 t における舗装の健全度を状態変数 $h(t) = i$ ($i = 1, \dots, J; t = 0, 1, \dots$) を用いて表現する。 J は吸収状態である。施設の劣化過程がマルコフ連鎖に従うと仮定し、離散時間軸上の単位時間間隔における健全度間の推移確率をマルコフ推移確率を用い

て表現する。マルコフ推移確率は、時点 t における路面性状調査において観測された健全度 $h(t) = i$ を与件とし、次の時点 $t+1$ における健全度 $h(t+1) = j$ ($j \geq i$) が生起する条件付確率

$$\text{Prob}[h(t+1) = j | h(t) = i] = p_{ij} \quad (1)$$

を用いて定義される。このような推移確率をすべての健全度ペア (i, j) に対して定義することにより、マルコフ推移確率行列

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & p_{JJ} \end{pmatrix} \quad (2)$$

を定義することができる。マルコフ推移確率(1)は所与の2つの時点 $t, t+1$ の間において生じる健全度間の推移確率を示したものであり、当然のことながら、対象とする調査間隔が異なれば推移確率の値は異なる。補修がない限り常に劣化が進行するので、 $p_{ij} = 0$ ($i > j$) が成立する。また、推移確率の定義より $\sum_{j=i}^J p_{ij} = 1$ が成立する。すなわち、マルコフ推移確率に関して、

$$\left. \begin{aligned} p_{ij} &\geq 0 \quad (i, j = 1, \dots, J) \\ p_{ij} &= 0 \quad (i > j \text{ の時}) \\ \sum_{j=i}^J p_{ij} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

が成立しなければならない。状態 J は、補修のない限りマルコフ連鎖における吸収状態であり、 $p_{JJ} = 1$ が成立すると考える。なお、マルコフ推移確率は過去の劣化履歴には依存しない。マルコフ推移確率モデルでは、健全度が $i-1$ から i に推移した時点にかかわらず、時点 t から時点 $t+1$ の間に推移する確率は時点 t における健全度のみに依存するという性質(マルコフ性)を満足する。マルコフ推移確率を用いれば、前回の観測時点 t から、 r 期経過した時点 $t+r$ に至る期間の間に生起する劣化過程を推移確率行列

$$P(r) = \{P\}^r \quad (4)$$

を用いて表現できる。また、 r 期における推移確率行列 $P(r)$ の各要素を $p_{ij}(r)$ ($i, j = 1, \dots, J$) と表す。また、表記の便宜上、

$$P(0) = I \quad (5)$$

が成立すると仮定する。ただし、 I は $(J \times J)$ 単位行列である。

(2) 調査・補修政策

いま、路面性状調査を r 期ごとに実施する場合を考える。 r は政策変数であるが、ひとまず与件とする。 k 回目の路面性状調査が実施される離散軸上の時点 t_k^r ($k = 0, 1, \dots$) を $t_k^r = rk$ と定義する。 k 回目の路面性状調査により、ある特定の地点における舗装の健全度が $h(t_k^r) = i$ ($i = 1, \dots, J$) と判定されたと考える。時点 t_k^r におい

て、健全度が $h(t_k^r) = J$ と判定された場合は、直ちに補修され健全度が 1 まで回復する。一方、時点 t_k^r において健全度が $1 < h(t_k^r) < J$ の場合に選択可能なアクション e のタイプとして、1) 補修工事を実施せずに健全度の判定結果を記録する (アクション e_1)、2) 補修を実施し、舗装の健全度を 1 に回復する (アクション e_2)、という 2 つのタイプをとりあげる。ここで、定期調査時点における補修政策 ξ を、調査で観測された健全度 $h(t_k^r) = i$ に対して、補修後の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、補修政策 ξ は

$$\eta^\xi(i) = \begin{cases} i & \text{アクション } e_1 \text{ の場合} \\ 1 & \text{アクション } e_2 \text{ の場合} \end{cases} \quad (6)$$

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

と記述される。補修政策はある閾値となる健全度 (臨界的健全度) $i^*(\xi)$ が存在し、健全度 i が臨界的健全度 $i^*(\xi)$ に到達、もしくはそれ以上になった (悪化した) 場合には、必ず補修が実施される。一方、臨界的健全度に到達するまでは、補修は実施されないという単調性条件を満足すると仮定する。単調性条件は

$$\eta^\xi(i) = \begin{cases} i & i < i^*(\xi) \\ 1 & i \geq i^*(\xi) \end{cases} \quad (7)$$

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

と表される。単調性条件 (7) を満足する補修政策の集合を Ξ と表す。補修政策 $\xi \in \Xi$ を実施した場合、調査後の健全度に基づいて、直ちに補修が実施される。このような舗装アクション前後の健全度の推移状態を、

$$q_{ij}^\xi = \begin{cases} 1 & \eta^\xi(i) = j \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (8)$$

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

を用いて定義する。 q_{ij}^ξ を (i, j) 要素とする推移行列 (以下、補修推移行列と呼ぶ) を q^ξ と表記する。

以上では、路面性状調査間隔 r を与件と考えていた。しかし、調査間隔 r と調査時点において実施される補修政策 ξ は、ともに政策変数である。これら 2 つの政策変数の組 $(r, \xi) \in \Xi$ を調査・補修政策と呼ぶ。ただし、 Ξ は、調査・補修政策集合である。調査・補修政策 $(r, \xi) \in \Xi$ の下で実現する劣化・補修過程は、推移確率 $P_{ij}^\xi(r)$

$$P_{ij}^\xi(r) = \sum_{k=1}^J q_{ik}^\xi p_{kj}(r) \quad (9)$$

を用いて定義できる。 $P_{ij}^\xi(r)$ を (i, j) 要素とする推移確率行列を $P^\xi(r)$ と表す。式 (9) を行列表記すれば、

$$P^\xi(r) = q^\xi p(r) \quad (10)$$

となる。

ここで、対象とする路線が同質的な M 個のセクション m ($m = 1, \dots, M$) により構成されていると考える。

調査・補修政策 $(r, \xi) \in \Xi$ を適用した場合に、定期調査時点 t_k^r において実現する対象路線における健全度分布を相対頻度 $\pi_i^\xi(t_k^r)$ を用いて表す。さらに、相対頻度ベクトル

$$\pi^\xi(t_k^r) = \{ \pi_1^\xi(t_k^r), \dots, \pi_J^\xi(t_k^r) \} \quad (11)$$

を用いて表現すれば、当該路線の劣化・補修過程は

$$\pi_j^\xi(t_{k+1}^r) = \sum_{i=1}^J P_{ij}^\xi(r) \pi_i^\xi(t_k^r) \quad (12)$$

と定式化できる。上式をベクトル表記すれば、

$$\pi^\xi(t_{k+1}^r) = \pi^\xi(t_k^r) P^\xi(r) \quad (13)$$

である。道路舗装の劣化・補修過程が繰り返され、長期定常状態に到達したとする。各セクションの健全度に関する定常確率ベクトルを $\pi^{r, \xi} = (\pi_1^{r, \xi}, \dots, \pi_J^{r, \xi})$ と表す。定常確率は

$$\pi^{r, \xi} = \pi^{r, \xi} P^\xi(r) \quad (14a)$$

$$\sum_{i=1}^J \pi_i^{r, \xi} = 1 \quad (14b)$$

を満足するような $\pi^{r, \xi}$ として定義される。路面性状調査時点において使用限界である健全度 J が観測される定常確率 $\pi_J^{r, \xi}$ を、リスク管理水準 \bar{U} 以下に抑えることが可能な調査・補修政策 (r, ξ) の集合 $\Xi(\bar{U})$ を、

$$\Xi(\bar{U}) = \{ (r, \xi) | \pi_J^{r, \xi} \leq \bar{U} \} \quad (15)$$

と定義する。

(3) LCC 評価

調査・補修政策 $(r, \xi) \in \Xi(\bar{U})$ が適用される場合を考える。道路管理者は、時点 t_k^r ($k = 0, 1, \dots$) 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、舗装の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健全度 i に依存する。補修費用を $C(i)$ と表す。補修費用は健全度 i に関して単調非減少関数であり、

$$C(1) \leq C(2) \leq \dots \leq C(J) \quad (16)$$

を満足する。いま、調査・補修政策 (r, ξ) の下で劣化・補修過程が定常状態にあり、ある定期調査時点 t_k^r で健全度が i ($i = 1, \dots, J$) であることが判明したと考える。さらに、時点 t_k^r 以降において、調査・補修政策 (r, ξ) を恒常的に適用することによって得られる調査・補修費用の割引当該期価値 (以下、LCC と呼ぶ) を $V_i^{r, \xi}$ と表す。劣化・補修過程が定常状態にあることより LCC は、調査時点 t_k^r には依存しない。定期調査・補修政策 (r, ξ) を適用した場合、LCC は再帰的に

$$V_i^{r, \xi} = c + \delta_i^\xi C(i)$$

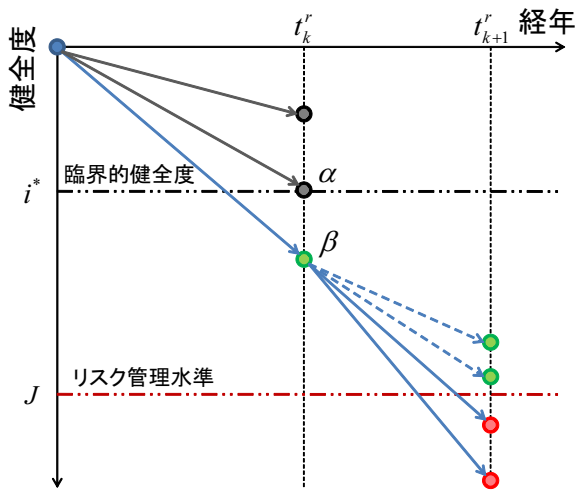


図-3 リスク対応区間

$$+ \exp(-\rho r) \sum_{j=1}^J P_{ij}^{\xi}(r) V_j^{r,\xi} \quad (17)$$

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

と定義される。ただし、 ρ は割引率、 δ_i^{ξ} は 0-1 変数であり

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

と定義できる。さらに、調査・補修政策 (r, ξ) の下で定期調査時点において実現する各健全度の定常確率 $\pi^{r,\xi} = (\pi_1^{r,\xi}, \dots, \pi_J^{r,\xi})$ を用いれば、定常劣化・補修過程において発生する期待 LCC は

$$\overline{LCC}(r, \xi) = \sum_{i=1}^J \pi_i^{r,\xi} V_i^{r,\xi} \quad (18)$$

と表すことができる。この時、リスク管理水準 \bar{U} を所与とした時に、期待 LCC を最小とするような舗装の調査・補修政策を求めると最適調査・補修政策モデルは、

$$\min_{r,\xi} \{ \overline{LCC}(r, \xi) \} \quad (19a)$$

$$\text{subject to } (r, \xi) \in \Xi(\bar{U}) \quad (19b)$$

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. 拡張モデル

(1) 追加調査・補修政策

基本モデルでは、路面性状調査を定期的実施し、路面性状調査の結果に基づいて舗装補修の実施の有無を決定するような意思決定ルールに着目した。このようなルールの下では、次回の定期調査時点においてリスク管理水準を満足させるために、臨界的健全度に余裕

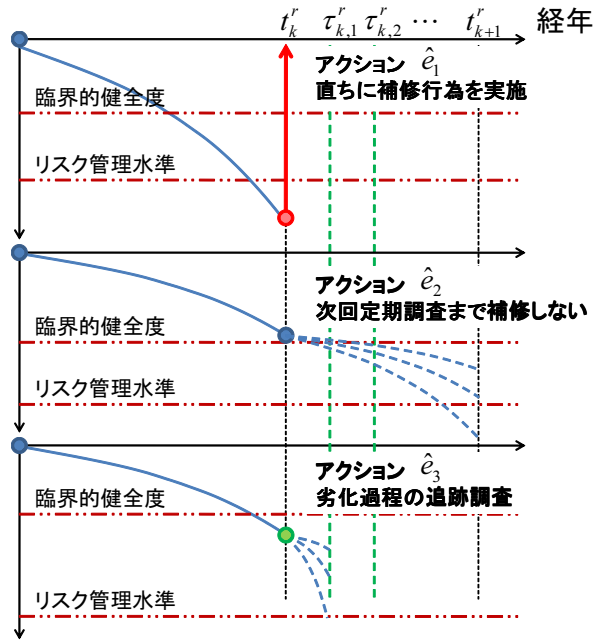


図-4 追加調査・補修政策

を見込んだ水準に設定する必要が生じる可能性がある。図-3において、今回の定期調査時点における健全度が臨界的健全度(点 α)より健全な状態であると判断された場合、舗装の補修は次回の定期調査時点まで先送りされる。今期における健全度が点 β に位置し、補修が実施される場合を考えよう。仮に、次回に補修を先送りした場合、次回の定期調査時点までに舗装の劣化が進行する。同図には、このような劣化の進行過程に関するサンプルパスが複数個記載されている。劣化過程が実線のように進行した場合、次回の定期調査時点において、サービス水準を満足しない。したがって、今回の定期調査時点において、舗装の補修を実施することは正当化可能である。しかし、劣化が破線のように進行した場合、次回の定期調査時点においてもリスク管理水準を満足する。したがって、今期において、舗装の補修を実施すれば、不必要な補修費用が発生したことになる。図中の健全度の範囲 $[i^*, J]$ は、次回の定期調査時点において、リスク管理水準を満足しない可能性があるため、今回の定期調査時点において予防的に補修が実施される領域である。本研究では、このような区間を、健全度の「リスク対応区間」と呼ぶこととする。調査間隔が長くなるほど、あるいは劣化過程の不確実性が大きいほど、リスク対応区間の幅が大きくなる。しかし、健全度がリスク対応区間に位置する場合、その後の劣化過程の進行状態によっては、次回の定期調査時点まで舗装の補修を先送りした方が補修費用を低減できる可能性を否定できない。このような非効率性は、舗装の劣化過程を完全には観測できず、路

面性状調査を通じて部分的にしか観測できないという劣化過程の部分観測可能性に起因している。

劣化過程の部分観測可能性に起因して生じる非効率性を部分的に解消する方法として、路面性状調査を段階的に実施する方法をとりあげる。すなわち、図-4に示すように、健全度と対応して、1) 直ちに補修行為を実施する(アクション \hat{e}_1)、2) 次の定期調査まで補修をしない(アクション \hat{e}_2)、3) 劣化過程を追跡調査し、補修を実施する(アクション \hat{e}_3)という3種類の補修政策を考える。基本モデルに対して、劣化過程を追跡調査することにより、劣化過程の不確実性に起因する非効率性を減少することが可能となる。当然のことながら、追跡調査を実施するために追加調査費用が新たに発生する。しかし、追跡調査の対象となる道路区間は限定されており、追加調査費用は定期調査費用より少なくなる。拡張モデルではLCCの最小化に資するような定期調査間隔、補修政策、および追跡調査方法を同時に求めることを目的とする。

(2) 定期・追加調査政策

基本モデルと同様に、カレンダー時点 s_0 を初期時点とする離散的時間軸 $t = 0, 1, 2, \dots$ を考える。定期的な路面性状調査(定期調査)は、離散時間軸の時点 $t_k^r = rk$ に実施される。さらに、隣接する2つの定期調査時点 t_k^r, t_{k+1}^r の間で、毎期ごとに追加調査を実施する場合を考える。すなわち、図-4に示すように、期間 $[t_k^r, t_{k+1}^r)$ 内に、追加調査時点 $\tau_{k,j}^r = t_k^r + j$ ($j = 1, \dots, r-1$) を設ける。時点 t_k^r において選択可能なアクション \hat{e} のタイプとして、1) 補修工事を実施せずに健全度の判定結果を記録する(アクション \hat{e}_1)、2) 補修を実施し、舗装の健全度が1に回復する(アクション \hat{e}_2)、3) 補修工事を実施せず、 $\tau_{k,j}^r$ ($j = 1, \dots, r-1$) において追加調査を実施する(アクション \hat{e}_3)、という3つのタイプをとりあげる。ここで、定期調査時点における補修政策 $\hat{\xi}$ を、定期調査で観測された健全度 $h(t_k^r) = i$ に対して、補修後の健全度を指定するルール $\eta^{\hat{\xi}}(i)$ を用いて定義する。すなわち、補修政策 $\hat{\xi}$ は

$$\eta^{\hat{\xi}}(i) = \begin{cases} i & \text{アクション}\hat{e}_1\text{の場合} \\ 1 & \text{アクション}\hat{e}_2\text{の場合} \\ i & \text{アクション}\hat{e}_3\text{の場合} \end{cases} \quad (20)$$

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

と記述される。さらに、補修政策は単調性条件を満足すると仮定し、2種類の臨界的健全度 $i^*(\hat{\xi}), i^{**}(\hat{\xi})$ が存在し、

$$(i^*(\hat{\xi}) \neq i^{**}(\hat{\xi}) \text{ の時})$$

$$\hat{e} = \begin{cases} \hat{e}_1 & i < i^{**}(\hat{\xi}) \\ \hat{e}_2 & i \geq i^*(\hat{\xi}) \\ \hat{e}_3 & i^{**}(\hat{\xi}) \leq i < i^*(\hat{\xi}) \end{cases} \quad (21a)$$

$$(i^*(\hat{\xi}) = i^{**}(\hat{\xi}) \text{ の時})$$

$$\hat{e} = \begin{cases} \hat{e}_1 & i < i^*(\hat{\xi}) \\ \hat{e}_2 & i \geq i^*(\hat{\xi}) \end{cases} \quad (21b)$$

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

と表される。上式において $i^*(\hat{\xi}) = i^{**}(\hat{\xi})$ が成立する場合、追加調査・補修は実施されない。言い換えれば、補修政策 $\hat{\xi}$ の中には、アクション \hat{e}_3 が存在しない(定期調査・補修政策のみで構成される)補修政策が含まれる。アクション \hat{e}_1 が採用された場合に補修が実施される。このような舗装アクション前後の健全度の推移状態を、基本モデルと同様に

$$q_{ij}^{\hat{\xi}} = \begin{cases} 1 & \eta^{\hat{\xi}}(i) = j \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (22)$$

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

を用いて定義する。 $q_{ij}^{\hat{\xi}}$ を (i, j) 要素とする推移行列(以下、補修推移行列と呼ぶ)を $q^{\hat{\xi}}$ と表記する。

さらに、時点 t_k^r にアクション \hat{e}_3 が採用された時、時点 $\tau_{k,j}^r = t_k^r + j$ ($j = 1, \dots, r-1$) に追加調査が実施される。追加調査時点 $\tau_{k,j}^r$ に採用される補修政策を追加調査で観測された健全度 $h(\tau_{k,j}^r) = i$ に対して、補修後の健全度を指定するルール $\iota^{\hat{\xi}}(i)$ を用いて定義する。すなわち、補修政策 $\hat{\xi}$ を

$$\iota^{\hat{\xi}}(i) = \begin{cases} i & \text{アクション}\hat{f}_1\text{の場合} \\ 1 & \text{アクション}\hat{f}_2\text{の場合} \end{cases} \quad (23)$$

$(i = i^{**}(\hat{\xi}), \dots, i^*(\hat{\xi}) - 1)$

と定義する。ただし、追加調査時点 $\tau_{k,j}^r$ においてアクション \hat{f}_2 が実施された場合、期間 $[\tau_{k,j}^r, t_{k+1}^r)$ 中は追加調査は実施されない。追加調査時点における補修政策も単調性条件を満足すると仮定する。この時、臨界的健全度 $i^\circ(\hat{\xi})$ が存在し、追加補修ルール \hat{f} は

$$\hat{f} = \begin{cases} \hat{f}_1 & i < i^\circ(\hat{\xi}) \\ \hat{f}_2 & i \geq i^\circ(\hat{\xi}) \end{cases} \quad (24)$$

$(i = i^{**}(\hat{\xi}), \dots, J)$

と表される。さらに、単調性条件(21a),(21b),(24)を満足する調査・補修政策の集合を $\hat{\Xi}$ と表す。調査・補修政策 $(r, \hat{\xi}) \in \hat{\Xi}$ を実施した場合、調査後の健全度に基づいて、アクション \hat{f}_2 が採用された場合に補修が実施される。このような舗装アクション前後の健全度の推移状態を、

$$\hat{z}_{ij}^{\hat{\xi}} = \begin{cases} 1 & \iota^{\hat{\xi}}(i) = 1 \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (25)$$

$(i = i^{**}(\hat{\xi}), \dots, J; j = 1, \dots, J)$

を用いて定義する. \hat{z}_{ij}^{ξ} を (i, j) ($i, j = 1, \dots, J$) 要素とする推移行列 (以下, 追加補修推移行列と呼ぶ) を \hat{z}^{ξ} と表記する.

(3) 劣化・補修過程

アクション e_3 が存在するような調査・補修政策 $(r, \hat{\xi}) \in \hat{\Xi}$ が採用され, 定期調査時点 t_k^r において健全度 i ($i = i^{**}(\hat{\xi}), \dots, i^*(\hat{\xi}) - 1$) が観察された場合を考える. この場合, 時点 $\tau_{k,j}^r$ ($j = 1, \dots, r-1$) において, それまでに追加補修がなされていない限り追加調査が実施される. いま, 健全度 i ($i = i^{**}(\hat{\xi}), \dots, i^*(\hat{\xi}) - 1$) に対して推移行列

$$p_{i^{**}}^{i^*} = \begin{pmatrix} p_{i^{**}i^{**}} & \cdots & p_{i^{**}i^*-1} & \cdots & p_{i^{**}J} \\ 0 & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & p_{i^*-1i^*-1} & \cdots & p_{i^*-1,J} \end{pmatrix} \quad (26)$$

を定義する. ただし, $i^* = i^*(\hat{\xi}), i^{**} = i^{**}(\hat{\xi})$ を意味する. さらに, 行列 $p_{i^{**}}^{i^*}$ を部分ブロック行列とする $(J \times J)$ 行列

$$\hat{p}^{\xi} = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{i^{**}-1}^{i^{**}-1} & \mathbf{0}_{i^{**}-1}^{J-i^{**}+1} \\ \mathbf{0}_{i^*-i^{**}}^{i^{**}-1} & p_{i^{**}}^{i^*} \\ \mathbf{0}_{J-i^*+1}^{i^{**}-1} & \mathbf{0}_{J-i^*+1}^{J-i^{**}+1} \end{pmatrix} \quad (27)$$

を定義する. ただし, $\mathbf{0}_a^b$ は $(a \times b)$ 次元の 0 要素行列である.

いま, 定期調査時点 t_k^r から 1 単位期間進展した追加調査時点 $\tau_{k,1}^r$ に着目する. 定期調査時点 t_k^r から追加調査時点 $\tau_{k,1}^r$ にまで劣化過程が進展し, 追加調査時点 $\tau_{k,1}^r$ の調査結果に基づいて追加補修ルールを適用する. 追加補修ルールにより補修が実施された場合, 追加調査時点 $\tau_{k,1}^r$ 以降は調査が実施されず定期調査時点 t_{k+1}^r において定期調査が実施される. 一方, 補修が実施されない場合, 追加調査時点 $\tau_{k,2}^r$ まで劣化が進展する. 以下, 同様の手順を繰り返し, 補修がない限り追加調査時点 τ_{r-1}^r まで追加調査が継続する. ここで, 健全度 i から, j 期後にはじめて健全度 k に移行する確率 $\tilde{p}_{ik}(j)$ が

$$\tilde{p}_{ik}(j) = \sum_{l=1}^{k-1} p_{il}(j-1)p_{lk} \quad (28)$$

と定義できることに留意する. さらに, 推移確率 $\tilde{p}_{ik}(j)$ を (i, k) 要素とする推移行列を $\tilde{p}(j)$ と表す. この時, 補修政策 $\hat{\xi}$ の下で, 追加調査・補修政策の下で推移する劣化・調査過程は推移行列 (2),(25),(27),(28) を用いて,

$$\hat{p}^{\xi}(r) = \sum_{j=1}^{r-1} \hat{p}^{\xi} \tilde{p}(j-1) \hat{z}^{\xi} \{p\}^{r-j} \quad (29)$$

と表すことができる. ただし, $\tilde{p}(0)$ は単位行列 \tilde{I} に一致する. 行列 $\hat{p}^{\xi}(r)$ の (i, j) 要素を $\hat{p}_{ij}^{\xi}(r)$ と表す. この

時, 調査・補修政策 $(r, \hat{\xi}) \in \hat{\Xi}$ の下で期間 $[t_k^r, t_{k+1}^r)$ において実現する劣化・補修過程を表す推移確率は

$$(i^*(\hat{\xi}) \neq i^{**}(\hat{\xi}) \text{ の時}) \\ \hat{P}_{ij}^{\xi}(r) = \begin{cases} P_{ij}^{\xi}(r) & i < i^{**}(\hat{\xi}) \\ P_{ij}^{\xi}(r) & i \geq i^*(\hat{\xi}) \\ \hat{p}_{ij}^{\xi}(r) & i^{**}(\hat{\xi}) \leq i < i^*(\hat{\xi}) \end{cases} \quad (30a)$$

$$(i^*(\hat{\xi}) = i^{**}(\hat{\xi}) \text{ の時}) \\ \hat{P}_{ij}^{\xi}(r) = \begin{cases} P_{ij}^{\xi}(r) & i < i^*(\hat{\xi}) \\ P_{ij}^{\xi}(r) & i \geq i^*(\hat{\xi}) \end{cases} \quad (30b)$$

を (i, j) 要素とする $(J \times J)$ 行列 $\hat{P}^{\xi}(r)$ で表される. ただし, $P_{ij}^{\xi}(r)$ は式 (9) で定義される. つぎに, 調査・補修政策 $(r, \hat{\xi}) \in \hat{\Xi}$ を採用した場合, 定期調査時点 t_k^r において実現する対象路線における健全度分布を相対頻度 $\pi_i^{\xi}(t_k^r)$ を用いて表す. さらに, 相対頻度ベクトル

$$\boldsymbol{\pi}^{\xi}(t_k^r) = \{\pi_1^{\xi}(t_k^r), \dots, \pi_J^{\xi}(t_k^r)\} \quad (31)$$

を用いて表現すれば, 当該路線の劣化・補修過程は

$$\boldsymbol{\pi}_j^{\xi}(t_{k+1}^r) = \sum_{i=1}^J \hat{P}_{ij}^{\xi}(r) \pi_i^{\xi}(t_k^r) \quad (32)$$

と定式化できる. 上式をベクトル表記すれば,

$$\boldsymbol{\pi}^{\xi}(t_{k+1}^r) = \boldsymbol{\pi}^{\xi}(t_k^r) \hat{P}^{\xi}(r) \quad (33)$$

である. 道路舗装の劣化・補修過程が繰り返され, 長期定常状態に到達したとする. 各セクションの健全度に関する定常確率ベクトルを $\boldsymbol{\pi}^{r,\xi} = (\pi_1^{r,\xi}, \dots, \pi_J^{r,\xi})$ と表す. 定常確率は

$$\boldsymbol{\pi}^{r,\xi} = \boldsymbol{\pi}^{r,\xi} \hat{P}^{\xi}(r) \quad (34)$$

を満足するような $\boldsymbol{\pi}^{r,\xi}$ として定義する. 路面性状調査時点において使用限界である健全度 J が観測される定常確率 $\pi_J^{r,\xi}$ を, リスク管理水準 \bar{U} 以下に抑えることが可能な調査・補修政策 $(r, \hat{\xi})$ の集合 $\hat{\Xi}(\bar{U})$ を,

$$\hat{\Xi}(\bar{U}) = \{(r, \hat{\xi}) | \pi_J^{r,\xi} \leq \bar{U}\} \quad (35)$$

と定義する.

(4) LCC 評価

調査・補修政策 $(r, \hat{\xi}) \in \hat{\Xi}(\bar{U})$ が適用される場合を考える. 道路管理者は, 時点 t_k^r ($k = 0, 1, \dots$) 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. 路面性状調査時点において, 舗装の健全度が臨界的健全度 $i^*(\hat{\xi})$ より大きくなった場合, 舗装の補修を実施する. この場合, 健全度 i に応じて補修費用 $C(i)$ が発生する. また, 健全度が $i^{**}(\hat{\xi}) \leq i < i^*(\hat{\xi})$ を満足する場合, 当該調査時点から追加調査・補修政策が適用されるが, 当該の調査時点から, 次期の路面性状調査

時点までに発生する追加調査・補修費用 $C^{r,\hat{\xi}}(i)$ は,

$$C^{r,\hat{\xi}}(i) = \sum_{j=1}^{r-1} \sum_{k=i}^J \exp(-\rho j) \tilde{p}_{ik}(j) z_{k1} C(k) + \sum_{j=1}^{r-1} \sum_{k=i}^{i^{\circ}-1} \exp(-\rho j) p_{ik}(j-1) w \quad (36)$$

と表せる。ただし、 w は追加調査費用、 $i^{\circ} = i^{\circ}(\hat{\xi})$ 、 $p_{ik}(j)$ は時点 t_k^r より j 期目に健全度が i から k に推移している確率であり、行列 $\mathbf{p}(j)$ の (i, k) 要素である。また、 $\tilde{p}_{ik}(j)$ は j 期目にはじめて健全度 k に推移する確率であり、式 (28) で表される。

つぎに、調査・補修政策 $(r, \hat{\xi})$ の下で劣化・補修過程が定常状態にあり、ある定期調査時点 t_k^r で健全度が i ($i = 1, \dots, J$) であることが判明したと考える。さらに、時点 t_k^r 以降において、調査・補修政策 $(r, \hat{\xi})$ を恒常的に適用することによって得られる調査・補修費用の割引当該期価値 (以下、同様に LCC と呼ぶ) を $V_i^{r,\hat{\xi}}$ と表す。劣化・補修過程が定常状態にあることより LCC は、定期調査時点 t_k^r には依存しない。調査・補修政策 $(r, \hat{\xi})$ を適用した場合、LCC は再帰的に

$$V_i^{r,\hat{\xi}} = c + \delta_i^{\hat{\xi}} C(i) + \delta_i^{\hat{\xi}} C^{r,\hat{\xi}}(i) + \exp(-\rho r) \sum_{j=1}^J \hat{P}_{ij}^{\hat{\xi}}(r) V_j^{r,\hat{\xi}} \quad (37)$$

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

と定義される。式 (37) において、右辺第 1 項と第 2 項は第 k 期における定期調査費用と補修費用、第 3 項は追加調査・補修費用、第 4 項は第 $k+1$ 期以降の LCC の当該期価値を意味する。ただし、 $\delta_i^{\hat{\xi}}, \delta_i^{\hat{\xi}}$ は 0-1 変数であり

$$\delta_i^{\hat{\xi}} = \begin{cases} 0 & i \leq i^*(\hat{\xi}) \\ 1 & i > i^*(\hat{\xi}) \end{cases} \quad (38a)$$

$$\delta_i^{\hat{\xi}} = \begin{cases} 1 & i^{**}(\hat{\xi}) \leq i < i^*(\hat{\xi}) \\ & (\text{ただし、} i^*(\hat{\xi}) \neq i^{**}(\hat{\xi}) \text{ の時}) \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (38b)$$

と定義される。さらに、調査・補修政策 $(r, \hat{\xi})$ の下で定期調査時点において実現する各健全度の定常確率 $\pi^{r,\hat{\xi}} = (\pi_1^{r,\hat{\xi}}, \dots, \pi_J^{r,\hat{\xi}})$ を用いれば、定常劣化・補修過程において発生する期待 LCC は

$$\overline{LCC}(r, \hat{\xi}) = \sum_{i=1}^J \pi_i^{r,\hat{\xi}} V_i^{r,\hat{\xi}} \quad (39)$$

と表すことができる。この時、リスク管理水準 \bar{U} を所与とした時に、期待 LCC を最小とするような舗装の調査・補修政策を求める最適調査・補修政策モデルは、

$$\min_{r, \hat{\xi}} \left\{ \overline{LCC}(r, \hat{\xi}) \right\} \quad (40a)$$

$$\text{subject to } (r, \hat{\xi}) \in \hat{\Xi}(\bar{U}) \quad (40b)$$

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 $(r^{**}(\bar{U}), \hat{\xi}^{**}(\bar{U}))$ と表す。

5. 調査便益とモデルの解法

(1) 調査便益の計測方法

路面性状調査を実施することにより、個別道路区間における舗装の健全度に関する情報を獲得することができる。道路管理者は健全度情報に基づいて、各道路区間の補修の有無を決定する。道路補修の有無は、舗装の健全度に依存する状況依存的ルールを用いて決定される。一方、路面性状調査を実施しない場合、舗装の損傷状態に関する情報を獲得できないため、舗装の損傷状態とは無関係に定期的に舗装の補修を実施せざるを得ないと考える。舗装の補修はあらかじめ決定された時間間隔ごとに実施する時間依存的ルールに基づいて実施される。すなわち、路面性状調査を定期的実施する経済便益は、舗装の補修政策を時間依存的ルールから、状況依存的ルールに変更することにより実現する LCC の削減額を用いて定義できる。路面性状調査を行うことにより、道路管理者は道路補修の実施の有無を決定するオプション (リアルオプション) を獲得することができる。このように考えれば、路面性状調査の経済価値は、路面性状に関する情報を用いて、舗装の補修タイミングに関する意思決定を合理化するためのオプション価値と解釈することができる。

路面性状調査の経済便益を評価するために、比較の対象となる時間依存的ルールの下で実現する LCC を求める。基本モデルと同様に離散的時間軸 $t = 0, 1, 2, \dots$ を考える。時点 t において舗装の補修を実施したと考える。前回の補修時点 t から、 r 期経過した時点 $t+r$ に至るまでの間に生起する劣化過程は、式 (4) に示す推移確率行列 $\mathbf{p}(r)$ で表現できる。時点 $t+r$ において使用限界である健全度 J に移行する確率は $p_{1J}(r)$ と表せる。時間依存的ルールを採用した場合、リスク管理水準を \bar{U} に設定すると、最適補修間隔 r° は、

$$r^{\circ} = \max_r \{r | p_{1J}(r) \leq \bar{U} \ (r = 1, 2, \dots)\} \quad (41)$$

により定義できる。さらに、補修間隔を r° とする時間依存的ルールの下で実現する LCC は再帰的に

$$V^{r^{\circ}} = \sum_{k=1}^J p_{1k}(r^{\circ}) C(k) + \exp(-\rho r^{\circ}) V^{r^{\circ}} \quad (42)$$

と定義される。上式より、時間依存的ルールの下で実現する $LCCV^{r^{\circ}}$ は

$$V^{r^{\circ}} = \frac{\sum_{k=1}^J p_{1k}(r^{\circ}) C(k)}{1 - \exp(-\rho r^{\circ})} \quad (43)$$

と表される. 一方, 状況依存的ルールの下で実現する LCC は式 (18) より

$$\overline{LCC}(r^*, \xi^*) = \sum_{i=1}^J \pi_i^{r^*, \xi^*} V_i^{r^*, \xi^*} \quad (44)$$

と表される. したがって, 時間依存的ルールから状況依存的ルールに転換することの純便益 B は

$$B = V^{r^0} - \overline{LCC}(r^*, \xi^*) \quad (45)$$

と表される. さらに, 定期調査 1 回当たりの経済便益 (純便益) を評価するために, 経済便益 B を毎年等価な便益の流列で表現する. このとき, 定期調査 1 回当たりの平均的な純便益 Δb^* は,

$$B = \frac{b^*}{1 - \exp(-\rho)} \quad (46)$$

を満足するような b^* を用いて

$$\Delta b^* = \sum_{k=0}^{r^*-1} \exp(-\rho k) b^* \quad (47)$$

と定義できる.

つぎに, 追加調査の経済便益を, 定期的に路面性状調査を実施する状況から, 新たに追加調査を実施する状況に移行することにより得られる LCC の削減額を用いて定義する. 追加調査を実施する場合, 定常的劣化・補修過程において発生する期待 LCC は

$$\overline{LCC}(r^{**}, \hat{\xi}^{**}) = \sum_{i=1}^J \pi_i^{r^{**}, \hat{\xi}^{**}} V_i^{r^{**}, \hat{\xi}^{**}} \quad (48)$$

と表せる. したがって, 追加調査の経済便益 \bar{B} は

$$\bar{B} = \overline{LCC}(r^*, \xi^*) - \overline{LCC}(r^{**}, \hat{\xi}^{**}) \quad (49)$$

と定義できる. さらに, 1 回の定期調査後に行われる追加調査群 (最大 $r^{**} - 1$ 回の追加調査) 全体の平均的な純便益は

$$\bar{B} = \frac{b^{**}}{1 - \exp(-\rho)} \quad (50)$$

を満足するような b^{**} を用いて

$$\Delta b^{**} = \sum_{k=0}^{r^{**}-1} \exp(-\rho k) b^{**} \quad (51)$$

と定式化できる.

(2) 解法

基本モデルの最適調査・補修政策を求める方法を提案する. ひとまず, 定期調査・補修政策 (r, ξ) を与件とする. 定期調査・補修政策 (r, ξ) を所与とした場合, LCC は再帰的に

$$\begin{aligned} V_i^{r, \xi} &= c + \delta_i^\xi C(i) \\ &+ \exp(-\rho r) \sum_{j=1}^J P_{ij}^\xi(r) V_j^{r, \xi} \quad (52) \\ &(i = 1, \dots, J) \end{aligned}$$

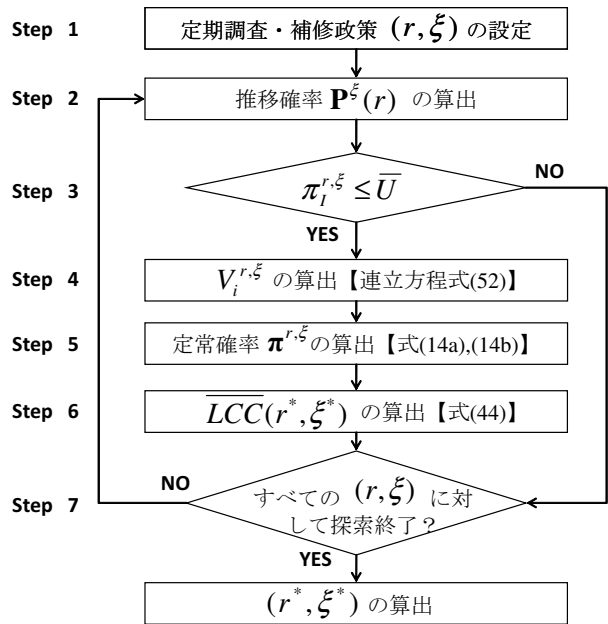


図-5 最適調査・補修モデルの解法

と定義される. 連立方程式 (52) を解くことにより, $V_i^{r, \xi}$ ($i = 1, \dots, J$) を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 (19a),(19b) の最適解 $(r^*(\bar{U}), \xi^*(\bar{U}))$ を求めることができる. このことを考慮すれば, 基本モデルの解法は図-5 のように整理できる. すなわち,

- 1) **step 1** (r, ξ) を設定する.
- 2) **step 2** 推移確率 $P^\xi(r)$ を求める.
- 3) **step 3** $\pi_j^{r, \xi} \leq \bar{U}$ を満足するかどうかを検討する. 満足しない場合, **step 7** へ進む. 満足する場合, **step 4** へ進む.
- 4) **step 4** 連立方程式 (52) を解き, $V_i^{r, \xi}$ ($i = 1, \dots, J$) を求める.
- 5) **step 5** 式 (14a),(14b) より定常確率 $\pi^{r, \xi}$ を求める.
- 6) **step 6** 式 (44) より $\overline{LCC}(r^*, \xi^*)$ を求める.
- 7) **step 7** すべての (r, ξ) に対して探索が終了していない場合, 新しい (r, ξ) を設定し, **step 2** へ戻る. すべての (r, ξ) に関して探索した場合, $\overline{LCC}(r^*, \xi^*)$ を最小にするような (r^*, ξ^*) を求める.

つぎに, 拡張モデルの最適調査・補修政策を求める方法を提案する. 調査・補修政策 $(r, \hat{\xi})$ を適用した場合, LCC 費用は再帰的に

$$\begin{aligned} V_i^{r, \hat{\xi}} &= c + \delta_i^{\hat{\xi}} C(i) + \delta_i^{\hat{\xi}} C^{r, \hat{\xi}}(i) \\ &+ \exp(-\rho r) \sum_{j=1}^J P_{ij}^{\hat{\xi}}(r) V_j^{r, \hat{\xi}} \quad (53) \\ &(i = 1, \dots, J) \end{aligned}$$

と定義される. 連立方程式 (53) を解くことにより,

$V_i^{r,\xi}$ ($i = 1, \dots, J$) を求めることができる. 拡張モデルの解法も基本モデルの解法と同様であり, 以下のように整理できる.

- 1) **step 1** $(r, \hat{\xi})$ を設定する.
- 2) **step 2** 推移確率 $\hat{P}^{\hat{\xi}}(r)$ を求める.
- 3) **step 3** $\pi_j^{r,\hat{\xi}} \leq \bar{U}$ を満足するかどうかを検討する. 満足しない場合, **step 7** へ進む. 満足する場合, **step 4** へ進む.
- 4) **step 4** 連立方程式 (53) を解き, $V_i^{r,\hat{\xi}}$ ($i = 1, \dots, J$) を求める.
- 5) **step 5** 式 (14a), (14b) より定常確率 $\pi^{r,\hat{\xi}}$ を求める.
- 6) **step 6** 式 (48) より $\overline{LCC}(r^{**}, \hat{\xi}^{**})$ を求める.
- 7) **step 7** すべての $(r, \hat{\xi})$ に対して探索が終了していない場合, 新しい $(r, \hat{\xi})$ を設定し, **step 2** へ戻る. すべての $(r, \hat{\xi})$ に関して探索した場合, $\overline{LCC}(r^{**}, \hat{\xi}^{**})$ を最小にする $(r^{**}, \hat{\xi}^{**})$ を求める.

6. 適用事例

(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とりあげ, 路面性状測定車を用いた路面性状調査により, 舗装の健全度を定期的に診断する問題を考える. 適用事例の対象とする道路区間は, NEXCO が管理する高速道路区間であり, 6車線, 総延長約 300km・車線である. 同区間は供用後 35 年が経過し, 大型車交通量は約 6,800 台/日である. 同区間の舗装種別は排水性舗装であり, 全区間の約 95% が土工部で構成されている.

舗装の健全度は, 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, 健全度の 3 項目を同時に取得し, 舗装の健全度を評価する. 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箇所を選定する. すなわち, 路面性状調査では比較的長い区間を一斉調査し, その調査結果から舗装の損傷状態を 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, 高速道路舗装の補修を対象としており, 補修工法は表層のみの切削オーバーレイ工法を基本とし, 損傷の進行程度が異なっても同一の補修工法を採用するものと仮定する. したがって, 補修費用は, 補修する舗装の延長のみに依存する.

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) に基づいて, 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/m³, 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いて, 2,125 円/m² 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.

(2) マルコフ劣化モデルの作成

各タイプの損傷は互いに独立に進行すると考え, 損傷タイプごとに劣化の進行過程をマルコフ劣化モデルを用いて表現するとともに, 最適調査・補修モデルを用いて, 最適調査間隔を求める. そのうえでもっとも調査間隔が短くなるような損傷タイプに着目し, 最適調査・補修政策を求めることとした. 厳密に言えば, 3つの損傷を同時に考慮したような劣化予測モデルを作成し, 3種類の損傷タイプの中でもっとも劣化が進展している損傷に着目して, 最適調査・補修政策を求めることが必要となる. 筆者らは, すでに3つの種類の損傷を同時に考慮にいったような競合劣化ハザードモデル²⁰⁾を提案している. しかし, 競合劣化ハザードモデルを用いた場合, 個々の損傷タイプの劣化がマルコフ性を有していても, 3種類の損傷タイプを同時に考慮したようなマルコフ推移確率は, マルコフ性を有さないことが知られている. このため, 最適調査・補修モデルを用いて最適調査・補修政策を求める過程が極めて煩雑であり, 実用的ではない. ここでは, もっとも損傷速度が大きい損傷タイプに着目し, 望ましい調査・補修政策を求めることとする. なお, 本研究では, 補修の基本単位を 100m として評価する. 実際の維持管理の現場では, 補修対象舗装の前後の区間の状態を考慮して, 連続する補修区間を一括して補修を実施する場合が少なくない. このような補修個所の水平的な集計化政策はとりあげず, 100m を単位区間として補修を実施することとする.

筆者らは, すでに全国の高速道路の路面性状調査のデータに基づいて, ひび割れ, わだち掘れ, IRI のマルコフ劣化モデルを推計している²¹⁾. 本適用事例では, 既往研究²¹⁾において推計されたマルコフ劣化モデルを用いて, 路面性状調査の最適な実施間隔を求めた. 図-6 に, マルコフ劣化モデルの推計結果に基づいて, ひび割れ, わだち掘れ, IRI のパフォーマンスカーブを求めた結果を示している. 同図の縦軸は, 各々の損傷に対する健全度ランクを示している. 表-1 には, 健全度ランクと各損傷の路面性状値との関係を示している. なお, もっとも損傷が進行した状態をランク $J = 7$ と定義しているが, 図-6 に示すように, わだち掘れに関しては

表-1 健全度ランク

ランク	わだち掘れ Ru (mm)	ひび割れ Cr (%)	IRI (mm/m)
1	$Ru \leq 5$	$Cr = 0$	$IRI \leq 1.0$
2	$5 < Ru \leq 9$	$0 < Cr \leq 1.0$	$1.0 < IRI \leq 1.5$
3	$9 < Ru \leq 13$	$1.0 < Cr \leq 2.5$	$1.5 < IRI \leq 2.0$
4	$13 < Ru \leq 17$	$2.5 < Cr \leq 5.0$	$2.0 < IRI \leq 2.5$
5	$17 < Ru \leq 21$	$5.0 < Cr \leq 10.0$	$2.5 < IRI \leq 3.0$
6	$21 < Ru \leq 25$	$10.0 < Cr \leq 20.0$	$3.0 < IRI \leq 3.5$
7	$25 < Ru$	$20.0 < Cr$	$3.5 < IRI$

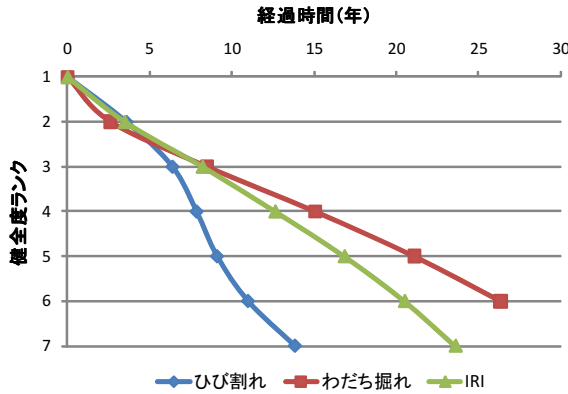


図-6 パフォーマンスカーブ

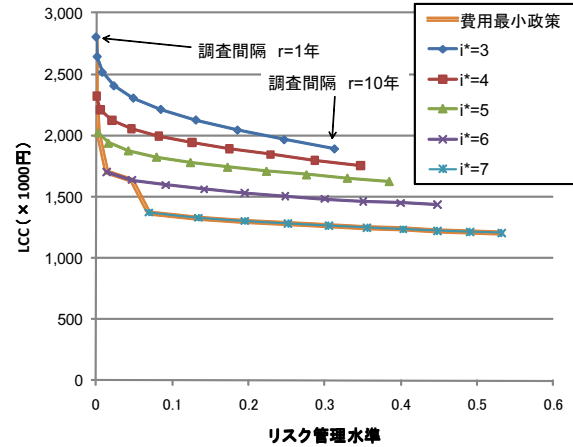


図-7 リスク管理水準と LCC の関係 (基本モデル)

観測された路面性状データにランク 7 のデータが存在しなかったため、ランク 6 までの推計に留まっている。各損傷タイプに対するパフォーマンスカーブの推計結果から、ひび割れの劣化速度がもっとも大きいことが判明した。したがって、本適用事例では、望ましい調査・補修政策を検討する際の代表的な路面の損傷タイプとして「ひび割れ」を取り上げることとする。

(3) 基本モデルの分析結果

図-7 に、基本モデルを用いて求めたリスク管理水準と LCC の関係を分析した結果を示している。同図においては、臨界的健全度 $i^*(\xi)$ を、 $i^*(\xi) = 3$ から $i^*(\xi) = 7$ に設定したそれぞれのケースに対して、路面性状調査の実施間隔を 1 年から 10 年まで 1 年刻みで変化させ、LCC とリスク管理水準の関係を求めた。いずれの臨界的健全度 $i^*(\xi)$ を採用した場合においても、LCC とリスク管理水準の間にはトレードオフの関係を見出すことができる。同図には、臨界的健全度 $i^*(\xi)$ 別の 5 ケースの曲線のほか、所与のリスク管理水準を満足する条件下において LCC が最小となる政策によって描画した包絡線 (リスク-費用管理曲線) を併記している。リスク-費用管理曲線は、リスク管理水準として 0.1 より大きい範囲 (図の右側部分) では、曲線の傾きが緩やかになっている。このことは、調査頻度を少なくとも LCC 削減に与える効果が小さい一方でリスク-費用調査頻度の減少による劣化リスクが急速に増加すること

を示唆している。一方、リスク管理水準を 0.07 より改善する場合、調査頻度が大きくなり、LCC の増加を招くことになる。リスク管理水準が 0.07 以上の場合、臨界的健全度を $i^*(\xi) = 7$ とすることにより、LCC を最小にすることができる。すなわち、舗装の劣化が管理水準に到達した時点で補修を実施することが最適となる。しかし、本研究では、調査間隔を年単位に設定しているため、リスク管理水準を 0.07 未満にするためには実行可能解が存在しない結果となっている。大規模調査間隔を年単位で設定する場合、リスク管理水準を 0.07 未満にするためには、臨界的健全度を $i^*(\xi) = 6$ 以下に設定することが必要となる。すなわち、リスク管理水準として 0.07 未満の値を目標値として設定した場合は、予防的保全政策を採用しなければならない。あるいは、事後的保全政策を採用する場合、リスク管理水準を 0.07 未満にするためには、調査間隔を 1 年未満にすることが必要となる。しかし、同一の年度内に大規模調査を複数回実施することは、調査業務の実際上現実的でないばかりか、LCC の急速な増加を招くことになる。そこで、以下では拡張モデルを用いて、追加調査・補修政策の導入効果を分析することとする。

(4) 拡張モデルの分析結果

拡張モデルでは、2 種類の臨界的健全度 $i^*(\hat{\xi})$, $i^{**}(\hat{\xi})$ を導入し、1) 直ちに補修行為を実施する ($i \geq i^*(\hat{\xi})$) の場

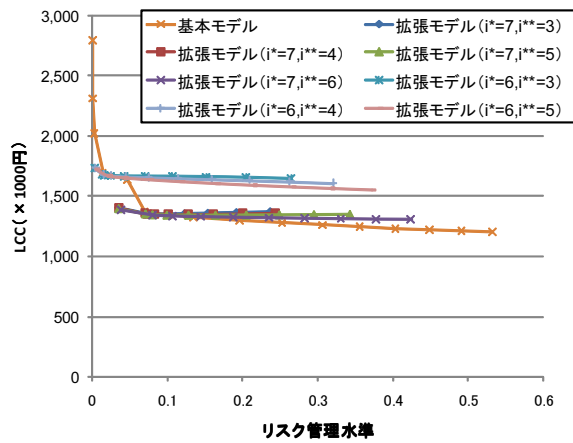


図-8 リスク-費用管理曲線 (拡張モデル)

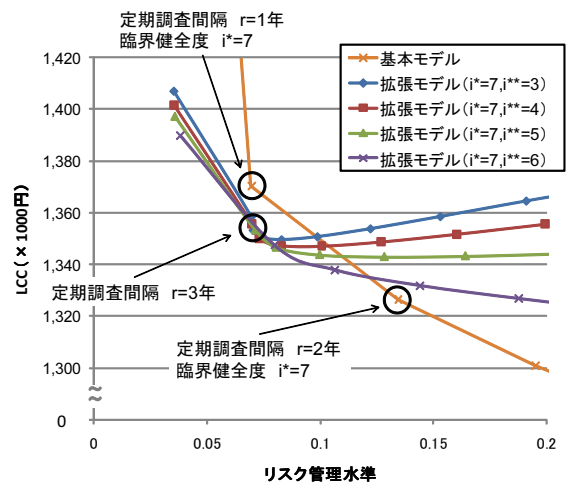


図-9 リスク-費用管理曲線 (拡張モデル・ $i^*(\hat{\xi}) = 7$)

合), 2) 次回の定期調査まで補修をしない ($i < i^{**}(\hat{\xi})$ の場合), 3) 劣化過程を追跡調査し, 必要があれば補修を実施する ($i^{**}(\hat{\xi}) \leq i < i^*(\hat{\xi})$ の場合) という3種類の補修政策を考える。ただし, $i^*(\hat{\xi}) = i^{**}(\hat{\xi})$ の場合には, 追加調査・補修は実施されず, 1) 直ちに補修行為を実施する ($i \geq i^*(\hat{\xi})$ の場合), 2) つぎの定期調査まで調査・補修を実施しない ($i < i^*(\hat{\xi})$ の場合) という2種類の補修政策を考える。さらに, 分析ケースとして, 1) 直ちに補修を実施する臨界的健全度を $i^*(\hat{\xi}) = 7$ に固定し, 追加調査・補修を実施する臨界的健全度を $i^{**}(\hat{\xi}) = 3$ から $i^{**}(\hat{\xi}) = 6$ の間で変化させるケース, 2) $i^*(\hat{\xi}) = 6$ に固定し, $i^{**}(\hat{\xi}) = 3$ から $i^{**}(\hat{\xi}) = 5$ の間で変化させたケースを設定した。図-8は, これらの2つのケースを対象としてリスク管理水準とLCCの関係を分析した結果を示している。同図には, 基本モデルで算出した費用最小政策も併記している。なお, 追加調査・補修政策における路面性状調査の実施間隔は, 基本モデルと同様に, 1年から10年の1年刻みで変化させている。ただし, 実施間隔が1年の場合の追加調査は, 6ヶ月後に1回実施するものとする。拡張モデルの場合も, 基本モデルと同様に, リスク管理水準が向上すれば, 路面性状の調査頻度を増加させることが必要となり, LCCの増加を招く結果となっている。しかし, 拡張モデルの場合, 基本モデルの場合よりも, リスク管理水準とLCCのトレードオフの関係はより平坦になっている。すなわち, リスク管理水準を増加させても, きめ細かい追加調査・補修政策を導入することにより, LCCの増加を抑制することが可能である。リスク管理水準が0.04より大きい場合, 臨界的健全度を $i^*(\hat{\xi}) = 7$ に設定(事後的保全政策を採用)することによりLCCを最小化することができる。リスク管理水準が0.07の場合, 路面性状調査の実施間隔は $r^{**} = 3$ 年となる。基本モデルの場合, 上述したように, 同一のリスク管理水準0.07を達成するためには, 毎年の路面性状調査が必要とな

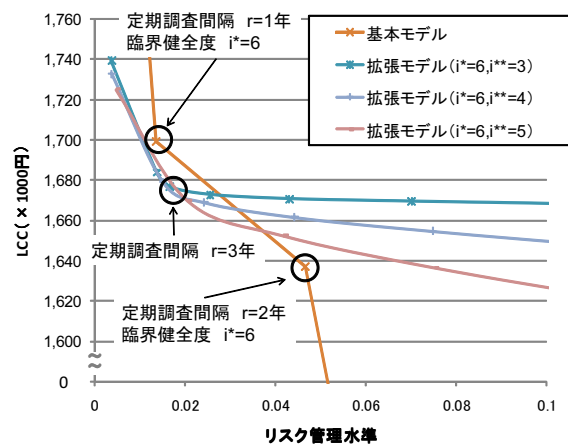


図-10 リスク-費用管理曲線 (拡張モデル・ $i^*(\hat{\xi}) = 6$)

る。すなわち, 追加的調査・補修を実施することにより, 最適路面性状調査の間隔を1年から3年に延長することが可能となる。基本モデルの場合と同様に, リスク管理水準を0.04以下に設定するためには, 臨界的健全度を $i^*(\hat{\xi}) = 6$ に設定し, 予防的保全を実施することが必要となるが, 当然のことながらLCCは著しく増加する。

図-9は, 臨界的健全度を $i^*(\hat{\xi}) = 7$ に設定した場合を想定し, リスク管理水準が0.2以下の範囲に焦点を絞り, リスク管理水準とLCCの関係を分析した結果を示している。基本モデルの場合, リスク管理水準を0.1以下に抑えるためには, 路面性状調査を少なくとも毎年1回実施することが必要である。これに対して, 拡張モデルの場合には, 路面性状調査を4年間隔で実施するとともに, 追加調査・補修政策を毎年実施することにより, リスク管理水準を0.1以下に抑えることが可能である。この場合, 臨界的健全度を $i^{**}(\hat{\xi}) = 3$ から $i^{**}(\hat{\xi}) = 5$ の間で設定することとなる。さらに, 基本モデルの場合に比べて, 若干の費用削減効果が見られる。高速道路

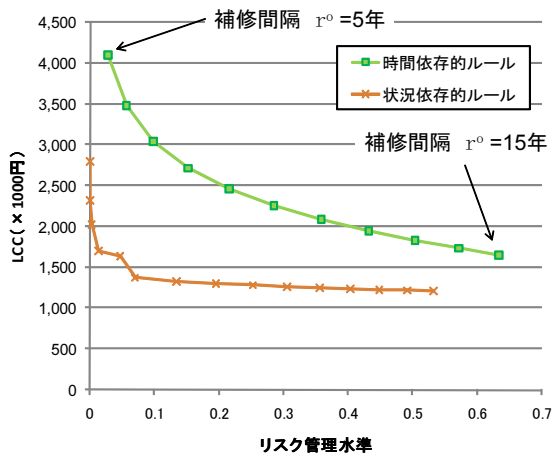


図-11 リスク-費用管理曲線 (時間依存的ルール)

における舗装マネジメントでは、路面性状調査を3年に一度のペースで実施する機会が多い。しかし、事後的保全政策を採用する限り、リスク管理水準を0.07程度にまで抑制することは不可能であることが判明した。しかし、この場合でも、追加調査・補修政策を毎年行使することにより、リスク管理水準を0.04程度まで抑制することが可能となる。図-10は、同様に $i^*(\hat{\xi}) = 6$ のケースについて、リスク管理水準0.02~0.06付近を拡大したものである。基本モデルの場合、予防的保全政策 $i^*(\hat{\xi}) = 6$ を導入することにより、リスク管理水準を0.04未満に抑制することが可能になっている。しかし、図-9と図-10を比較すると、臨界的健全度を $i^*(\hat{\xi})$ を7から6へ変更することにより、LCCが増加することが理解できる。これは、補修費用と比較して調査費用が相対的に小さいことによるものであり、リスク管理水準0.04を達成するためには予防的保全 $i^*(\hat{\xi}) = 6$ を実施するよりも、事後的保全政策 $i^*(\hat{\xi}) = 7$ を採用し、追加調査を実施する方が、LCC最小化という観点からは望ましい結果となっている。

(5) 調査便益の分析結果

次に、路面性状調査および追加調査・補修政策を実施することによる経済便益(純便益)を分析する。図-11は、式(41)、式(42)、式(43)に従って算出した時間依存的ルールを採用した場合におけるリスク-費用管理曲線を示している。同図には、状況依存的ルールとして、基本モデルにおけるリスク-費用管理曲線を併記している。時間依存的ルールの補修間隔 r^0 は、5年から15年の間で1年刻みで変化させている。時間依存的ルールの場合、状況依存的ルールと同様に、LCCとリスク管理水準の間のトレードオフの関係が明確に示されている。状況依存的ルールの場合と比較すると、いずれのリスク管理水準を所与とした場合においても、時間依存的

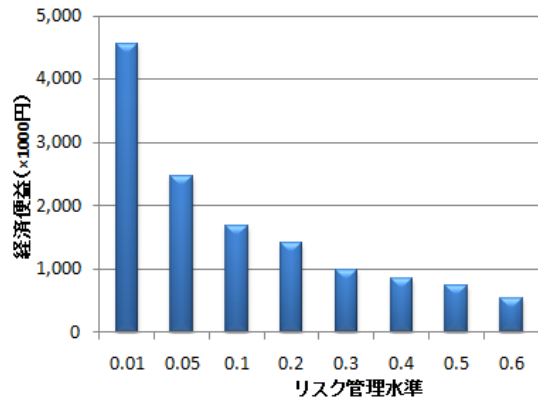


図-12 路面性状調査の経済便益

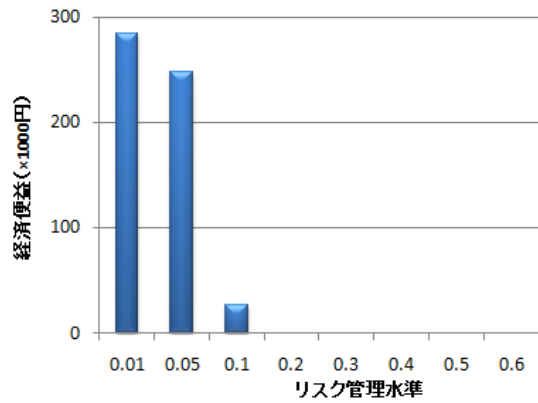


図-13 追加調査の経済便益

ルールのLCCが大きい。つまり、路面性状調査を定期的実施し舗装の補修政策を状況依存的ルールとすることによって、LCCの大幅な削減が実現することが示された。リスク管理水準が高い(リスク管理水準 \bar{r} が小さい)範囲で、LCCの削減額は大きく、リスク管理水準 \bar{r} が増加するにつれて、LCCの削減額が小さくなっていることが読み取れる。すなわち、リスク管理水準を高度に保つことを目的とする場合、路面性状調査の経済価値が大きくなることが理解できる。式(45)を用いて各リスク管理水準値における路面性状調査を実施することによる経済便益を算出した結果を図-12に示す。一方、図-13は、追加調査を実施することによる経済便益を、式(49)を用いて算出した結果を示している。リスク管理水準が小さい範囲では、追加調査の経済便益が相対的に大きな値を示す一方、リスク管理水準が0.2以上の範囲では、追加調査は実施されず、追加調査の経済便益は定義されない。拡張モデルを用いて求めたリスク管理水準別の最適調査・補修政策を、表-2に一括して示している。これらの分析結果より、リスク管理水準を0.1以下の厳しい値に設定する場合において、追加調査・補修政策が有効であることが示された。リスク管理水準が0.2以上の場合は、基本モデルの最適

表-2 最適調査・補修政策(拡張モデル)

リスク管理 水準 \bar{U}	最適調査 政策	定期調査 間隔 (年) r	臨界的健全度	
			i^*	i^{**}
0.01	追加	1	6	5
0.05	追加	1	7	6
0.1	追加	4	7	5
0.2	基本	3	7	-
0.3	基本	4	7	-
0.4	基本	6	7	-
0.5	基本	9	7	-
0.6	基本	10	7	-

解が拡張モデルの最適解と一致し、追加調査・補修政策は実施されない。

7. おわりに

本研究では、道路管理者が設定する舗装サービス水準に関する所与のリスク管理水準の下で、補修費用、および調査費用で構成される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の補修戦略を求める方法論を提案した。具体的には、舗装の劣化過程をマルコフ劣化予測モデルで表現するとともに、所与のリスク管理水準の下でライフサイクル費用を最小にするような調査間隔と補修戦略を同時に決定する最適調査・補修モデルを定式化した。また、定期的な調査・補修政策と場所を限定した追加調査・補修政策を同時に決定する拡張モデルを提案した。さらに、路面性状調査を定期的実施する経済便益は、舗装の補修政策を時間依存的ルールから、状況依存的ルールに変更することにより得られる経済便益であることを指摘し、定期調査および追加調査の経済便益を計測する方法を提案した。最後に、現実の高速道路を対象とした適用事例を通じて、本研究で提案した方法論の有効性を実証的に分析した。しかしながら、本研究で提案した方法論の有用性を高めるためにいくつかの研究課題が残されている。第1に、追加調査・補修政策に関しては、本研究でとりあげた方法以外にも多様な方法が考えられる。たとえば、本研究では毎期ごとに追加調査を実施することを想定したが、追加調査の間隔を2期以上に設定することも可能である。このような拡張は、基本モデルに内蔵するサブマルコフ決定モデルの定式化を修正することにより対応できる。第2に、本研究では対象とする路線が、ほとんど同一の舗装特性や交通特性を有する区間で構成される場合を想定している。このため、単一のパフォーマンスカーブを用いた最適調査・補修モデルを定式化した。対象とする路線が、多様な舗装構造や道路特性を有する区間で構成される場合、道路区間の異質性を考慮した最適調査・補修モデルを開発することが必要となる。第3に、本研究の適用事

例では単一の路線を対象として、調査・補修政策を検討した。今後は、複数路線を対象として、実用的な路面性状調査の計画方法論を開発することが必要である。第4に、本研究で提案した最適調査・補修モデルは、若干の修正により、舗装以外の土木施設のアセットマネジメント問題に適用可能である。特に、補修工法に多様性がある場合、補修政策の数が膨大になるため効率的な解法を開発することが必要である。

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, pp.1-15, 2007.
- 8) 例えば, Heyman, D.P. and Sobel, M.J.(eds.): *Stochastic Models*, Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol.2, North-Holland, 1990.
- 9) 例えば, 三根久, 河合一: 信頼性・保全性の数理, 朝倉書店, 1982.
- 10) Howard, R.A.: *Dynamic Programming and Markovian Processes*, 関根智明他訳: ダイナミックプログラミングとマルコフ過程, 培風館, 1971.
- 11) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research*, Part B, Vol.27B, pp.425-438, 1993.
- 12) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol.28, pp.55-62, 1994.
- 13) Durango, P. and Madanat, S.: Optimal maintenance and repair policies for infrastructure facilities under uncertain deterioration rates: An adaptive control approach, *Transportation Research*, Part A, Vol.36, pp.763-778, 2002.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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点検・補修政策, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.

- 18) Jido, M., Otazawa, T. and Kobayashi, K.: Synchronized Repair Policy for Bridge Management, in: Watanabe, E., Frangopol, D. M. and Utsunomiya, T. (eds.), *Bridge Maintenance, Safety, Management and Cost*, CD-ROM, Balkema, 2005.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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, 舗装工学論文集, 土木学会, Vol.14, pp.229-237, 2009.

(2010.11.10 受付)

THE OPTIMAL IMPLEMENTATION POLICY OF PAVEMENT INSPECTION WITH DETERIORATION UNCERTAINTY

Kiyoshi KOBAYASHI, Masayuki EGUCHI, Akira OI, Kazuya AOKI and Kiyoyuki KAITO

This study proposes a methodology to find the optimal inspection policy for road pavement with uncertain deterioration processes. Since the deterioration progresses are characterized by a lot of uncertainty, the pavement conditions cannot be deterministically evaluated unless the inspection or repair activities are carried out. The road administrators have to make the decisions of whether repair should be implemented based upon the results of inspection. In this paper, the value of the inspection is evaluated by use of real option theory, and the optimal inspection and repair model is formulated to investigate the optimal inspection frequencies and repair policy which may minimize the expected life cycle costs. Finally, the validity of the methodology presented in the paper is investigated by a case study dealing with the expressway in the real world.