

# 劣化過程を考慮した最適廃棄・補修モデル

小濱健吾<sup>1</sup>・貝戸清之<sup>2</sup>・青木一也<sup>3</sup>・小林潔司<sup>4</sup>・福田泰樹<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: obama.kengo.63m@st.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 大阪大学准教授 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

<sup>3</sup>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 2-8-10 目黒ビル別館 1F)  
E-mail: kiakzo6013@pasco.co.jp

<sup>4</sup>フェロー会員 京都大学教授 経営管理大学院経営管理講座 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)  
E-mail: kobayashi.kiyoshi.6n@kyoto-u.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 西日本高速道路株式会社 三次高速道路事務所 (〒 728-0022 広島県三次市西酒屋 216)  
E-mail: t.fukuda.ac@w-nexco.co.jp

本研究では、社会基盤施設に対する需要の減少と劣化過程の進展により、将来時点において施設廃棄が予定されているような社会基盤施設の最適管理政策を検討する方法論を提案する。社会基盤施設は耐久性を有しており、安全性、経済性に問題がなければ継続的に運用することが可能である。本研究では、1) 社会基盤施設を直ちに廃棄する、2) 必要最低限の維持業務のみを実施する、3) 施設の補修を継続的に実施する、という3つの施設管理政策をとりあげる。その上で、施設需要や劣化状態を考慮し、施設管理政策を最適に転換するようなアセットマネジメント政策を求める最適廃棄・補修モデルを提案する。さらに、具体的事例を通じて、提案した最適廃棄・補修モデルの有効性を実証的に考察する。

**Key Words :** *optimal scrapping, maintenance & rehabilitation, deterioration, asset management*

## 1. はじめに

わが国では、人口の減少期を迎え、社会基盤施設の管理に要する財源を維持することが困難となっている。一方で、社会基盤施設の老朽化が進展し、管理費用の増大が懸念されている。このような状況の中で、老朽化した社会基盤施設を廃棄し、社会基盤ネットワークを縮退させる必要性が議論されるようになってきた。

社会基盤施設は長期間に亘りその効用を発揮する。施設が老朽化したとしても、安全性、経済性に問題がなければ、直ちに社会基盤施設を廃棄する必要はない。一方で、中山間地をはじめとする、市町村レベルの地方自治体（以下、地域コミュニティ）が消滅するなど、社会基盤施設をとりまく環境は急速に変化しつつある。したがって、社会基盤施設に対する維持管理においては、施設需要の長期的動向を踏まえ、施設管理のサービス水準を抑制したり、施設廃棄を検討したりするなど、施設の長期的管理政策を検討することが必要となる。

社会基盤施設の長期的管理政策を検討する場合、施設をとりまく環境の特性が非常に重要な課題となる。本研究では、将来において施設需要が確実に減少し、施設廃棄が確定的に予測されるような社会基盤施設の管理政策について考察する。2.(2)で言及するように、将来的に施設廃棄が予定されるような社会基盤施設に関しては、1) 施設を直ちに廃棄する、2) 必要最低限の維

持業務のみを行う、3) 将来の施設廃棄を考慮に入れながら、施設の維持補修を継続するという3つの施設管理政策が利用可能である。施設管理者は、施設の運用がもたらす将来便益の流列を考慮に入れながら、望ましい施設管理政策を選択すると考える。

以上の問題意識の下に、本研究では、将来に施設廃棄が予定されるような社会基盤施設を対象として、期待純便益の割引現在価値を最大とするような最適管理政策を求める方法論を提案する。もとより、社会基盤施設の廃棄の是非に関しては、本研究でとりあげるような施設の劣化予測や、経済性基準のみに基づいて決定されるべきものではない。しかし、本研究で提案する方法論により、限定された視点ではあるが、施設管理政策に関する1つの合理的な判断情報を提示できるものとする。以下、2.では本研究の基本的な考え方を提示する。3.では最適廃棄・補修モデルを提案し、4.ではモデルの解法を示す。最後に、5.では橋梁を対象とした適用事例を示す。

## 2. 本研究の基本的考え方

### (1) 既存研究の概要

社会基盤施設の劣化過程や故障の生起事象を確率過程としてモデル化し、ライフサイクル費用を最小にするような最適補修政策を求める数理モデルが数多く提

案されている。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<sup>1),2)</sup>は、劣化過程の記述が簡単であり、数多くの実用モデル<sup>3)-5)</sup>が提案されている。伝統的なマルコフ決定モデルは、システムの劣化過程を表現するマルコフ推移確率を初期時点からの経過時間に依存しないような斉次マルコフ劣化モデルで表現し、定常的な最適補修政策を求めることを目的としている。このようなマルコフ決定モデルに関する研究は、ハザードモデル<sup>6),7)</sup>を用いて劣化過程を表現する方法が開発されたことにより、実用化が急速に進展した<sup>8),9)</sup>。例えば、青木等は照明ランプで構成されるシステムを対象として、システム全体の点検・補修タイミングに関する補修政策を求める方法論を提案している<sup>10),11)</sup>。さらに、津田等<sup>12)</sup>は橋梁部材の劣化過程を表すマルコフ推移行列を多段階指数ハザードモデルを用いて推計する方法を提案し、貝戸等<sup>13)</sup>は平均費用を最小にするような橋梁補修政策を求めるマルコフ決定モデルを提案している。しかし、これらの既往の最適補修政策モデルは、施設が永続的に供用されることを前提として、ライフサイクル費用を最小化することを目的としている。

社会基盤施設の管理政策を検討する上で、将来時点で対象とする施設の廃棄を想定するか否かにより、社会基盤施設の維持補修問題の内容は大きく異なってくる。前述したように、既往研究の多くは施設を半永久的に使用することを前提として、ライフサイクル費用を最小にするような最適補修政策を決定することに主眼が置かれてきた<sup>14)</sup>。これに対して、織田澤等<sup>15)</sup>は将来時点における施設廃棄の可能性を考慮に入れた最適補修モデルを提案している。施設需要に不確実性が存在する社会基盤施設を対象として、施設の最適廃棄タイミングを決定するモデルをリアルオプション理論<sup>16),17)</sup>を用いて定式化している。しかし、そこでは施設管理政策として、1) 廃棄政策、2) 補修政策(補修を継続する)という2種類の選択肢のみを取り上げ、最適補修政策が施設需要と施設健全度に依存するような状況依存的ルールを設計するところに主眼が置かれていた。これに対して、本研究では社会基盤施設の耐用年数が長いことから、1) 廃棄政策、2) 補修政策という選択肢に加えて、3) 施設の廃棄を先送りし最低限の維持業務のみを実施する政策(廃棄保留政策)という選択肢を新たに加えたような最適廃棄・補修モデルを提案することとする。

## (2) 廃棄問題の種類

最適廃棄・補修モデルを定式化する場合、施設需要の変化過程と施設の劣化過程を同時に考慮することが必要となる。これらの2つの過程は、それぞれ多大な

不確実性を含んでおり、将来の動向を正確に予測することは困難である。施設需要過程と劣化過程に介在する不確実性を考慮するか否かにより、1) 確定的需要変化、確定的劣化過程(ケース1)、2) 確率的需要変化、確定的劣化過程(ケース2)、3) 確定的需要変化、確率的劣化過程(ケース3)、4) 確率的需要変化、確率的劣化過程(ケース4)、という4つの異なったモデルを定式化することができる。本研究では、近い将来に地域コミュニティの消滅等が発生せざるを得ない過疎地域を対象として、施設廃棄を考慮した施設管理政策を検討することを目的としている。多くの過疎地域では、地域コミュニティの老齢化は、社会基盤施設の劣化速度より早い速度で進展している。しかも、個人の老齢化の速度は一樣であり、地域コミュニティの年齢構成も社会増減、死亡等を除けば一樣に変化する。それに対して、社会基盤施設も年齢構成は一樣に変化するが、施設年齢と施設健全度が1対1に対応しているわけではなく、劣化過程の不確実性は無視できない。施設廃棄が検討対象となるような過疎地域の施設管理政策を検討する場合、ケース1、ケース2は理論的興味はありえても、あまり現実的なケースとはなりえないと考える。ケース3、ケース4は劣化過程の不確実性を考慮しており、現実的な施設管理政策を検討することが可能である。過疎地域においては、将来時点で消滅の危機を迎えているコミュニティ(限界集落)が存在している場合が少なくない。これらの限界集落では、消滅の時点に関しては不確実性が存在するものの、将来人口増加が生じる可能性に乏しい。このため、本研究では、ケース3(確定的需要変化、確率的劣化過程)を対象として、施設需要の減少過程をいくつかのシナリオとして与えるとともに、各シナリオに対する施設管理政策を検討することとする。ケース4(確率的需要変化、確率的劣化過程)を対象としたモデル化は、施設需要の増減を考慮しながら、戦略的な施設管理政策を考えることを目的としている。過疎地域における施設廃棄までの施設管理政策を検討する問題に対しては、ケース3に基づいたモデル化が適切であると考えられる。

本研究では、劣化過程の不確実性を考慮した施設管理政策を検討する。その際、**2.(1)**で言及したように、1) 廃棄政策、2) 廃棄保留政策、3) 補修政策という3つの施設管理政策をとりあげる。廃棄政策は、施設の使用を直ちに中止し、施設を廃棄するような政策である。施設を廃棄する場合、廃棄費用が必要となる。しかし、社会基盤施設は耐用年数が長く、劣化の進展速度も遅い(一部の部材の劣化・損傷が施設全体系の構造安全性に直結するまでには時間を要する)ことが多いために、直ちに施設を廃棄することが必ずしも合理的でない場合が存在する。そこで、廃棄保留政策は、清掃・巡

同等の必要最低限の維持業務（劣化の進行を抑制する効果を伴うことはあるが、健全度の回復を伴わない業務）を実施するが、大規模な補修業務（健全度の回復を伴う業務）を実施せず、適切な時期において施設の廃棄を実施することを決定するような政策である。最後に、補修政策は、施設の必要最低限の日常的な維持業務と同時に、施設に劣化・損傷が発見された場合には大規模補修業務を行い、施設の健全度を回復するような施設管理政策である。このとき、本研究で対象とするケース3のような状況下では、**3.(5)**で言及するように、時間の経過とともに、施設管理政策が「補修政策 → 廃棄保留政策 → 廃棄政策」という順に単調に変化することになり、最適政策切り替えタイミングを決定することが課題となる。なお、ケース4では、施設需要変化と劣化過程の双方が確率的に変化するために、複数リスクを考慮した動的計画モデルを解く問題に帰着する。さらに、需要が必ずしも単調に減少しないため、上述の3つの政策が可逆的に変化するような状況依存的政策切り替えタイミングと非定常的補修政策を同時に考慮したような最適政策の切り替え問題を考慮しなければならない。このような複雑な維持管理問題に関しても、本研究で提案する最適廃棄・補修モデルを拡張することにより対処可能であるが、この問題に関しては将来の課題とする。

### 3. 最適廃棄・補修モデル

#### (1) モデル化の前提条件

カレンダー時刻  $t_0$  を始点とし、無限時限まで続く離散時間軸  $t = 0, 1, \dots$  を対象とする。初期時点  $t_0$  は対象とする社会基盤施設の管理政策を検討する時点であり、施設の供用開始時点である必要はない。離散軸上の期間  $[t, t+1)$  を  $t$  期と呼ぶ。各期間長はすべて同一である。いま、 $t$  期まで施設管理が継続され、 $t$  期における最適管理政策を考える問題に直面したと考える。 $t$  期の期首において、施設に対して点検が実施され、施設健全度に関する情報が獲得される。点検結果（健全度）に基づいて、「廃棄政策」、「廃棄保留政策」、「補修政策」のいずれを選択するかを決定する。「廃棄政策」、「廃棄保留政策」が選択された場合、当該期以降に健全度の回復を伴うような大規模な補修業務が実施されることはなく、 $t$  期で選択された政策に基づいて  $t$  期以降の管理業務が遂行される。

社会基盤施設の劣化状態は  $I$  個の健全度で記述される。施設の健全度を  $i$  ( $i = 1, \dots, I$ ) で表現する。施設がもっとも健全な（劣化が進展していない）状態を  $i = 1$  で表し、状態変数  $i$  の値が大きくなるほど、劣化が進展していることを表す。 $i = I$  の場合、当該施設が使用限

界に到達していることを表す。初期時点  $t_0$  における施設の健全度を状態変数  $h(0)$  と表す。状態変数  $h(0)$  は健全度  $i$  ( $i = 1, \dots, I$ ) の中のいずれかの値をとる。施設の劣化・補修過程は、離散時間軸上で定義される状態変数の流れ  $h(0), h(1), \dots, h(t), \dots$  を用いて定義される。一方、 $t$  期において、当該施設を使用することにより得られる便益を  $v(t)$  ( $t = 0, 1, \dots$ ) と記述する。本研究では、将来時点に亘り施設需要の減少が予測されており、最適管理政策を検討することが課題になっているような社会基盤施設を対象とする。便益  $v(t)$  ( $t = 0, 1, \dots$ ) は  $t$  に関して減少関数であり、任意の  $t$  に対して

$$v(t) > v(t+1) \quad (1)$$

が成立すると仮定する。施設の使用便益に関しては不確実性が存在せず、確定的に与えられると考える。ただし、施設の使用便益の減少過程に関して複数のシナリオを考え、感度分析を行うことにより将来便益の変動に関する影響を分析することとする。

初期時点から社会基盤施設の最適維持・補修業務が実施され、 $t$  期に至った場合を考える。 $t$  期において、施設管理者は、1) 直ちに廃棄する（廃棄政策）、2) 施設廃棄に関する意思決定を保留し、最低限の維持業務のみを実施する（廃棄保留政策）、3) 維持・補修業務を継続する（補修政策）という3つの施設管理政策が存在する。施設管理者が「廃棄政策」を採用した場合、廃棄費用  $C$  を負担して、直ちに施設を廃棄する。つぎに、廃棄保留政策を採用した場合、毎期ごとに維持費用  $c$  を負担して清掃・巡回等の最低限の維持業務は実施するが、健全度を回復するような大規模補修は実施しない。時間の経過に伴って施設の劣化が進展し、健全度が使用限界  $I$  に到達した時点で、施設を廃棄する。劣化過程に不確実性が存在するために、施設の廃棄時点は不確実である。施設を廃棄するためには、廃棄費用  $C$  が必要となる。廃棄費用には、社会基盤施設の解体・撤去費用、さらに解体・撤去作業に伴う周辺施設の規制費用等（例えば道路の規制費用）も含まれる。最後に、補修政策を実施する場合、施設管理者は、維持・補修業務を継続する。その際、将来時点において施設廃棄の可能性があることに配慮しつつ、施設使用による期待純便益の当該期価値を最大にするように補修ルールを決定する。補修政策が適用されている期間中、同一の補修ルールが採用されると考える。理論的には施設便益が時間とともに変化していることを考慮して、補修ルールが時間とともに変化するような非定常補修ルールを考えることができる。しかし、本研究では、過疎地域の自治体が管理する社会基盤施設を分析対象としており、このような非定常補修ルールは社会基盤の管理者に過度に複雑な管理方策を要求することとなり実際的ではない。このような観点から、本研究では補修政策が適

用される期間を通じて、同一の補修ルールが採用されるような定常補修ルールに着目する。以上の考え方の下に、初期時点から時間が経過し、 $t$ 期の期首に、施設管理者が施設管理政策を決定する問題を考える。以下、**3.(2)**では、施設管理者が廃棄政策を採用した場合に着目する。ついで、**3.(3)**では廃棄保留政策、**3.(4)**では補修政策を採用した場合に着目する。最後に、**3.(5)**で最適廃棄・補修モデルを定式化する。

## (2) 廃棄政策

時点 $t$ の期首に点検が行われ、施設の健全度が $i$ であることが判明したと考える。施設管理者が、「廃棄政策」を採用した場合、時点 $t$ で直ちに施設が廃棄されるため、時点 $t$ 以降において施設便益は発生しない。したがって、時点 $t$ で発生する純便益 $\Psi_t^a(i)$ は

$$\Psi_t^a(i) = -C \quad (2)$$

と表される。ここに、上付き添え字 $a$ は、廃棄政策を採用したことを意味する。また、 $C$ は廃棄費用である。

## (3) 廃棄保留政策

廃棄保留政策を採用した場合、清掃・巡回等の最低限の維持業務は実施するが、施設の健全度を回復させるような大規模補修は実施しない。施設の健全度は時間の経過とともに低下し、健全度が使用限界 $I$ に到達した時点で施設が廃棄される。施設の劣化過程はマルコフ連鎖に従うと考える。そこで、2つの時刻間における健全度の推移状態をマルコフ推移確率で表現する。マルコフ推移確率は、時刻 $t$ で測定された健全度 $h(t) = i$ を与件とし、 $t+1$ 期において健全度 $h(t+1) = j$  ( $j \geq i$ )が生起する条件付推移確率として定義される。すなわち、

$$\text{Prob}[h(t+1) = j | h(t) = i] = \pi_{ij} \quad (3)$$

と表せる。このような推移確率を健全度ペア $(i, j)$ に対して求めれば、マルコフ推移確率行列

$$\mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \cdots & \pi_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{II} \end{pmatrix} \quad (4)$$

を定義できる。補修がない限り健全度が回復することはないので、 $\pi_{ij} = 0$  ( $i > j$ )が成立する。また、推移確率の定義より $\sum_{j=i}^I \pi_{ij} = 1$ が成立する。すなわち、マルコフ推移確率に関して

$$\left. \begin{array}{l} \pi_{ij} \geq 0 \quad (i, j = 1, \dots, I) \\ \pi_{ij} = 0 \quad (i > j \text{ の時}) \\ \sum_{j=i}^I \pi_{ij} = 1 \end{array} \right\} \quad (5)$$

が成立しなければならない。状態 $I$ 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、 $\pi_{II} = 1$ が成立する。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依存するという性質（マルコフ性）を満足する<sup>18)</sup>。本研究で扱う社会基盤施設の劣化過程もこのマルコフ性を満足するものとする。

ここで、初期時点から時間が経過し、 $t$ 期に到達した状態を考える。当該期における施設の健全度を $h(t) = i$  ( $i = 1, \dots, I$ )と表す。ここで、 $t$ 期において健全度 $h(t) = i$ の施設に対して、廃棄保留政策を採用し、次期以降に最適管理政策を採用した場合に獲得できる期待純便益の割引当該期価値（以下、廃棄保留政策の当該期価値と呼ぶ）を $\Psi_t^b(i)$ と表す。ここで、上付き添え字 $b$ は、廃棄保留政策を採用したことを意味する。まず、 $t$ 期において、健全度が $I$ である場合、廃棄保留政策の当該期価値は

$$\Psi_t^b(I) = -C \quad (6)$$

となる。つぎに、 $t$ 期の健全度が $i$  ( $i = 1, \dots, I-1$ )である場合を考える。ここで、 $t$ 期の期首において健全度が $h(t) = i$ である状態で廃棄保留政策を採用した場合、廃棄保留政策の当該期価値 $\Psi_t^b(i)$ は

$$\Psi_t^b(i) = v(t) - c + \rho \sum_{j=i}^I \pi_{ij} V_{t+1}^b(j) \quad (7)$$

と定義できる。ただし、 $\rho$  ( $0 < \rho < 1$ )は割引因子であり、本研究では $\rho = 0.96$ とする。また、 $V_{t+1}^b(j)$ は $t+1$ 期に健全度が $j$ の下で、 $t$ 期に最適な施設管理政策を選択することによって獲得できる期待純便益の割引当該期価値の最大値である。施設便益が条件(1)に示すように単調に減少するため、一度最適管理政策として廃棄保留政策が採用されれば、補修政策が採用されることはない。このことに留意すれば、 $t$ 期以前の期において、廃棄保留政策が選択されており、かつ廃棄政策が一度も選択されていない場合、 $t$ 期における最適管理政策の選択問題は

$$V_t^b(i) = \max\{\Psi_t^b(i), -C\} \quad (8)$$

と定式化できる。式(7),(8)を再帰的に適用することにより、任意の $t$ 期に廃棄保留政策を適用し、それ以降に最適管理政策を適用した場合に実現する廃棄保留政策の当該期価値 $\Psi_t^b(i)$ を定義できる。

式(7)において、 $v(t)$ が強単調減少関数であることより、健全度 $i$ が同一である限り

$$\Psi_0^b(i) > \dots > \Psi_t^b(i) > \Psi_{t+1}^b(i) > \dots \quad (9)$$

が成立する。一方、 $\Psi_t^a(i)$ は $t, i$ の値に関わらず、一定値 $-C$ をとる。したがって、任意の $i$ に対して、

$$\left. \begin{array}{l} \Psi_{t^*(i)-1}^b(i) > -C \\ \text{and } \Psi_{t^*(i)}^b(i) \leq -C \end{array} \right\} \quad (10)$$

が成立するような  $t^*(i)$  が存在する. このような  $t^*(i)$  を健全度別廃棄時点と呼ぶ. すなわち, 健全度  $i$  の状態で廃棄時点  $t^*(i)$  に到達すれば, 廃棄費用  $C$  を支出して, 施設を直ちに廃棄することが合理的となる. このような廃棄時点は健全度  $i$  により異なる. 廃棄保留政策の当該期価値  $\Psi_t^b(i)$  の定義より, 任意の  $t$  と  $i$  ( $i = 1, \dots, I-1$ ) に対して  $\Psi_t^b(i) > \Psi_t^b(i+1)$  が成立する. したがって, 健全度別廃棄時点の間には, 単調の関係

$$t^*(1) > \dots > t^*(I) \quad (11)$$

が成立する. さらに, 条件 (22) より, 任意の  $t < t^*(i)$  に対して

$$V_t^b(i) = \Psi_t^b(i) \quad (12)$$

が成立する.

#### (4) 補修政策

最適廃棄・補修モデルにおける補修政策は, 対象とする社会基盤施設に対して点検を行い, 劣化・損傷が発見されれば所与の補修ルールを用いて, 社会基盤施設の健全度の回復を試みるような施設管理政策を意味する. 補修政策が適用される期間を, 補修期間と定義する. 補修政策が適用される場合, 施設に劣化・損傷が発見された場合, 健全度に応じて適切な補修工法が選択される. 健全度に応じて最適な補修工法を対応させるような状況依存的補修ルールを考える. 一般に, 状況依存的補修ルールを考える場合, 補修ルールが時刻に依存しない定常ルールと, 補修ルールが時刻に依存するような非定常ルールが考えられる. 厳密に言えば, 本研究で対象とする最適廃棄・補修問題では, 施設がいずれ廃棄されることが確定しているために, 施設管理者は廃棄までに残された時間を考慮しながら補修ルールを決定する. このため, 補修ルールは初期時点からの経過時間に依存する非定常ルールとなる. しかし, 非定常ルールは, 各期ごとに, 残された施設寿命と施設便益と劣化状態を同時に勘案しながら, その期における最適補修ルールを再計算することが必要となる. しかし, 中山間地における社会基盤施設マネジメントの現場において, 煩雑なライフサイクル費用評価を実施することは実際的ではない. むしろ, 簡便で, かつライフサイクル費用の低減化に資するような補修ルールを求めることが望ましいと考える. このような観点から, 本研究では現在時点において, 健全度に依存する望ましい補修ルールを決定し, 補修期間中は決定された補修ルールが継続的に適用されるような定常政策の採用を想定する.

補修期間中は, 各期の期首に施設の健全度を観測し, 必要な場合には施設の維持補修を実施する. ここで, 期間  $[t, t+1)$  における施設の補修・劣化過程を以下のよ

うにモデル化する. いま,  $t$  期の期首における施設の健全度が  $h(t) = i$  であると仮定する.  $t$  期で補修を実施する場合,  $t$  期の期首において直ちに補修が実施され, 施設の健全度が  $\hat{h}(t) = l$  ( $l \leq i$ ) に回復する.  $\hat{\cdot}$  は補修実施後であることを意味する. 期間  $[t, t+1)$  にわたり, 施設の健全度は, マルコフ推移確率行列  $\mathbf{\Pi}$  に従って推移する. その結果,  $t+1$  期の期首にモニタリングが実施され, 施設の健全度が  $h(t+1) = j$  に推移したと考える. この時, 期間  $[t, t+1)$  の間に, 施設の健全度は, 最終的に  $h(t) = i$  から,  $h(t+1) = j$  に推移する. このように補修アクションが実施された結果として実現する健全度の推移状態を施設の劣化・補修過程と呼ぶこととする.

いま, 補修期間中に適用される補修ルール  $d \in D$  を, 施設の健全度  $h(t) = i$  ( $i = 1, \dots, I$ ) のそれぞれに対して実施すべき補修アクションを指定する関数を用いて定義する. 補修ルールは有限個存在し,  $D$  は補修ルールの集合である. 補修ルール集合には, 大規模補修を実施しないというルールも含まれる. 補修ルール  $d \in D$  の下で実施される補修アクション  $\xi^d$  を, 補修アクション実施後の健全度  $\xi^d(i)$  を用いて

$$\xi^d = \begin{pmatrix} \xi^d(1) \\ \vdots \\ \xi^d(I) \end{pmatrix} \quad (13)$$

と定義する. 補修アクション実施後の健全度  $\xi^d(i)$  は全ての健全度に対して設定する必要があるため補修アクション  $\xi^d$  は  $I$  次元の列ベクトルとなる. なお, 補修を実施しない場合には  $\xi^d(i) = i$  が成り立つ. 補修ルール  $d$  の下で補修アクション  $\xi^d(i)$  を採用した場合の補修費用を  $c^d(i)$  と表す. すなわち, 施設の健全度が  $i$  から  $\xi^d(i) = l$  に改善される場合には補修費用  $c^d(i) = c_{il}$  が必要となる, 補修を実施しない場合には  $c^d(i) = 0$  となる. ただし, 補修費用は条件

$$c_{ij} \leq \dots \leq c_{lj} \leq \dots \leq c_{Ij} \quad (14)$$

$$(i \leq l \leq I; i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, i)$$

を満足すると仮定する. 条件 (14) は健全度が悪い施設の方が, 同一の健全度に回復するための費用が大きくなることを意味する.

つぎに, 補修ルール  $d \in D$  を実施した場合の健全度の推移状態を定義する. 補修ルール  $d$  に基づくアクション内容は  $t$  期における健全度  $h(t) = i$  に対して, アクション実施後の健全度  $\hat{h}(t)$  を対応させる関数  $\xi^d(i)$  を用いて記述できる. 健全度  $i$  の時に補修ルール  $d$  を適用した場合, 施設の健全度の推移関係は,

$$q^d(i, l) = \begin{cases} 1 & \xi^d(i) = l \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (15)$$

$$(i = 1, \dots, I; l = 1, \dots, i)$$

と表される. さらに, 補修ルール  $d$  の下で,  $t$  期の期首におけるモニタリング後の状態  $h(t) = i$  から, 補修アクションを実施し,  $t + 1$  期の期首までに健全度が  $h(t + 1) = j$  に推移する確率  $\hat{\pi}_{ij}^d$  は

$$\hat{\pi}_{ij}^d = \sum_{l=1}^i q^d(i, l) \pi_{lj} \quad (16)$$

と表される.

ここで,  $t$  期の期首に補修ルール  $d \in D$  を用いて施設を補修し,  $t + 1$  期の期首までに健全度  $h(t) = j$  に推移し, それ以降の期において最適な施設管理政策を採用した場合に獲得できる期待純便益の割引当該期価値を  $\Psi_t^c(i; d)$  と表す.  $t$  期において補修ルール  $d \in D$  を適用した場合における期待純便益の割引当該期価値は

$$\Psi_t^c(i; d) = v(t) - c_t^d - c + \rho \sum_{j=1}^I \hat{\pi}_{ij}^d V_{t+1}(j; d) \quad (17)$$

と表せる. ここで,  $V_{t+1}(j; d)$  は,  $t + 1$  期の期首において, 健全度が  $h(t + 1) = j$  であるときに補修ルール  $d \in D$  の下で  $t + 1$  期以降に最適管理政策を適用した場合に獲得できる期待純便益の割引当該期価値の最大値である. また, 最大値  $V_{t+1}(j; d)$  は状態変数  $j$  と政策  $d$  の関数であり, 以下では最適値関数と呼ぶ.

### (5) 最適廃棄・補修モデルの定式化

以上の議論では, 補修期間における補修ルール  $d \in D$  を所与として, それぞれの施設管理政策の下で  $t$  期以降に獲得できる期待純便益の割引当該期価値を定式化した. 再び, 補修期間において採用される補修ルール  $d \in D$  を与件と考える.  $t$  期の期首において, 施設管理者は,  $t$  期以降に獲得する期待純便益の割引当該期価値を最大にするように「廃棄政策」, 「廃棄保留政策」, 「補修政策」の中から 1 つの政策を採用する. 施設管理者が,  $t$  期に「廃棄政策」, 「廃棄保留政策」を採用した場合, それ以降の期における意思決定の可能性は消滅する. したがって,  $t$  期において, 3 つの施設管理政策の中から 1 つの施設管理政策を選択する問題が成立するためには,  $t$  期までの各期において「補修政策」が採用されてきたことが前提となる. この時,  $t$  期における意思決定モデルは, 以下のように定式化できる.

$$V_t(i; d) = \max \left\{ \Psi_t^a(i), \Psi_t^b(i), \Psi_t^c(i; d) \right\} \quad (18)$$

$$(i = 1, \dots, I; t = 0, 1, \dots)$$

ここで, 式 (17) の右辺に最適値関数  $V_{t+1}(i; d)$  が含まれていることに留意すれば, 問題 (18) は最適値関数  $V_t(i; d)$ ,  $V_{t+1}(j; d)$  に関する再帰方程式になっている. 初期時点  $t_0$  において観測された健全度を  $h(0) = i_0$  と表す. 初期時点は, 施設管理政策が検討された時点を

表しており, 初期時点において施設の劣化が一定程度進展していることもある. 初期時点において, 再帰方程式は,

$$V_0(i_0; d) = \max \left\{ \Psi_0^a(i_0), \Psi_0^b(i_0), \Psi_0^c(i_0; d) \right\} \quad (19)$$

$$(i = 1, \dots, I; t = 0, 1, \dots)$$

と表される. ただし,

$$\Psi_0^c(i_0; d) = v(0) - c_0^d + \rho \sum_{j=1}^I \hat{\pi}_{i_0 j}^d V_1(j; d) \quad (20)$$

と表せる. このとき, 最適補修ルール  $d^* \in D$  は

$$V_0(i_0; d^*) = \max_{d \in D} V_0(i_0; d) \quad (21)$$

を満足するような補修ルールとして定義される.  $V_0(i_0, d^*)$  は, 初期時点における最適値関数であり, 初期時点で評価した社会基盤施設の期待純便益の割引現在価値 (資産価値) の最大値を表している. 最適廃棄・補修モデルは社会基盤施設の資産価値最大化問題として定式化される.

いま, 問題 (21) が有限期間を対象とする動的最適化問題であることに留意しよう. さらに,  $V_0(i_0; d) > \Psi_0^b(i_0)$  が成立するような補修ルール  $d \in \hat{D}$  が存在すると仮定する. 式 (17) において,  $v(t)$  が強単調減少関数であり, かつ  $\hat{\pi}_{i_0 j}^d$  が斉次マルコフ推移確率であることより, 健全度  $i$  が同一である限り

$$\Psi_t^c(i; d) > \Psi_{t+1}^c(i; d) > \dots \quad (22)$$

が成立する.  $V_0(i_0; d) > \Psi_0^b(i_0)$ , かつ, 時点  $t^*(i)$  において  $\Psi_{t^*(i)}^c(i, d) \leq \Psi_{t^*(i)}^b(i)$  が成立することより, 任意の  $i$  と  $d \in \hat{D}$  に対して,

$$\Psi_{t^{**}(i, d)-1}^c(i, d) > \Psi_{t^{**}(i, d)-1}^b(i)$$

$$\text{and } \Psi_{t^{**}(i, d)}^c(i, d) \leq \Psi_{t^{**}(i, d)}^b(i) \quad (23)$$

が成立するような  $t^{**}(i, d)$  が存在する. このような  $t^{**}(i, d)$  を健全度別補修政策終了時点と呼ぶ. すなわち, 健全度  $i$  の状態で補修政策終了時点  $t^{**}(i, d)$  に到達すれば, それ以降は大規模補修を実施しないことが合理的となる. このような補修政策終了時点は健全度  $i$  により異なる. 期間  $[t^{**}(i, d), t^*(j)]$  ( $i \geq j$ ) において  $c \leq c^d + c$  であることより,  $\Psi_t(i, d)^c(i, d) < \Psi_{t^{**}(i, d)}^b(i)$  が成立する. さらに, 問題 (21) の最適補修ルール  $d^* \in D$  に着目する. 大規模補修を実施しない補修ルールも補修ルール集合  $D$  に含まれることに留意すれば, 期間  $[0, t^{**}(i, d)]$  において,  $d^* \in D$  が最適政策であることより,  $\Psi_{t^{**}(i, d^*)}^c(i, d^*) \geq \Psi_{t^{**}(i, d^*)}^b(i)$  が成立する. したがって,  $V_0(i_0; d) > \Psi_0^b(i_0)$  が成立するような補修ルール  $d \in \hat{D}$  が存在する限り, 時間の経過とともに, 施設管理政策が「補修政策 → 廃棄保留政策 → 廃棄政策」という順に単調に変化する.

#### 4. 最適廃棄・補修モデルの解法

##### (1) モデルの基本構造

最適廃棄・補修モデル(18)を解くためには、1) 廃棄政策の当該期価値  $\Psi_t^a(i)$ , 2) 廃棄保留政策の当該期価値  $\Psi_t^b(i)$ , 3) 補修ルール  $d \in D$  の下における補修政策の当該期価値  $\Psi_t^c(i:d)$  を求めることが必要である。ここで、 $t$  期の意思決定問題において、その導出過程から明らかのように、 $\Psi_t^a(i)$ ,  $\Psi_t^b(i)$  は定数となる。そこで、最適廃棄・補修モデル(18)を

$$V_t(i:d) = \max \left\{ \max \{ \Psi_t^a(i), \Psi_t^b(i) \}, \Psi_t^c(i:d) \right\} \quad (i = 1, \dots, I; t = 0, 1, \dots) \quad (24)$$

と書き換える。その部分問題

$$V_t^b(i) = \max \left\{ \Psi_t^a(i), \Psi_t^b(i) \right\} = \max \{ -C, \Psi_t^b(i) \} \quad (i = 1, \dots, I; t = 0, 1, \dots) \quad (25)$$

においては、**3.(3)** で述べたように、任意の  $i$  に対して、

$$\begin{aligned} \Psi_{t^*(i)-1}^b(i) &> -C \\ \text{and } \Psi_{t^*(i)}^b(i) &\leq -C \end{aligned} \quad (26)$$

が成立するような健全度別廃棄時点  $t^*(i)$  が存在する。また、健全度別廃棄時点の間には、条件(11)の単調的関係が成立する。ここで、最終廃棄時点を  $t^* = t^*(1)$  で定義する。すなわち、最終廃棄時点  $t^*$  は、仮に対象とする施設の健全度が1であっても施設廃棄が選択される時点であり、施設利用期間に関する理論的な上限値を表している。最終廃棄時点  $t^*$  は、部分問題(25)に対して定義されたものであるが、全体問題(24)に関しても最終廃棄時点となっている。そこで、最終廃棄時点  $t^*$  より、逆向きに縮約化された最適廃棄・補修モデル(27)を再帰的に解くことにより、各期における最適管理政策を求めることができる。

つぎに、縮約化された最適廃棄・補修モデル

$$V_t(i:d) = \max \left\{ V_t^b(i), \Psi_t^c(i:d) \right\} \quad (i = 1, \dots, I; t = 0, 1, \dots) \quad (27)$$

を考える。問題(27)により、補修政策が終了する期が決定される。初期時点にさかのぼり、問題(21)を解くことにより最適補修ルール  $d^* \in D$  を求めることができる。なお、**図-1**に、以上の議論を集約し、最適廃棄・補修モデルの基本構造を示している。

##### (2) モデルの解法

最終廃棄時点  $t^*$  において、終端条件

$$V_{t^*}(j) = -C \quad (j = 1, \dots, I) \quad (28)$$

が成立する。ここで、 $t^* - 1$  期における期待純便益の割引当該期価値

$$\Psi_{t^*-1}^b(i) = v(t^* - 1) - c - \rho C \quad (29a)$$

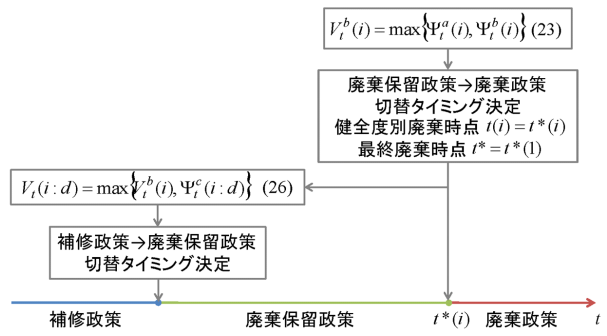


図-1 モデルの基本構造

$$\begin{aligned} \Psi_{t^*-1}^c(i:d) &= v(t^* - 1) - c_{t^*-1}^d - \rho C \quad (29b) \\ (i = 1, \dots, I) \end{aligned}$$

を定義する。その上で、 $t^* - 1$  期における最適値関数

$$V_{t^*-1}^b(i) = \max \{ \Psi_{t^*-1}^b(i), -C \} \quad (30a)$$

$$\begin{aligned} V_{t^*-1}(i:d) &= \max \{ V_{t^*-1}^b(i), \Psi_{t^*-1}^c(i:d) \} \quad (30b) \\ (i = 1, \dots, I) \end{aligned}$$

を求める。同様に、任意の  $t$  期における期待純便益の割引当該期価値を

$$\Psi_t^b(i) = v(t) - c - \rho \sum_{j=i}^I \hat{\pi}_{ij} V_{t+1}^b(j) \quad (31a)$$

(ただし  $t > t^*(i)$  のとき、 $\Psi_t^b(i) = -C$ )

$$\begin{aligned} \Psi_t^c(i:d) &= v(t) - c_t^d \\ &+ \rho \sum_{j=i}^I \hat{\pi}_{ij}^d V_{t+1}(j:d) \quad (i = 1, \dots, I) \end{aligned} \quad (31b)$$

と定義する。また、 $t$  期における最適値関数は、

$$V_t^b(i) = \max \{ \Psi_t^b(i), -C \} \quad (32a)$$

$$\begin{aligned} V_t(i:d) &= \max \{ V_t^b(i), \Psi_t^c(i:d) \} \quad (32b) \\ (i = 1, \dots, I) \end{aligned}$$

と定式化できる。以上のプロセスを初期時点まで繰り返すことになる。**図-2**には、アルゴリズムの概要を整理しているが、解法の手順は下記のように整理できる。

- ステップ1: 最終廃棄時点  $t^*$  を求める。
- ステップ2:  $d \in D$  を与件とする。
- ステップ3: 任意の  $i = 1, \dots, I, t = 0, \dots, t^* - 1$  に対して、割引当該期価値  $\Psi_t^b(i), \Psi_t^c(i:d)$  を求める。
- ステップ4: 式(32a)を用いて、最適値関数  $V_t^b(i) (i = 1, \dots, I)$  を求める。
- ステップ5: 式(32b)を用いて、最適値関数  $V_t(i:d) (i = 1, \dots, I)$  を求める。以上のプロセスを初期時点まで反復する。
- ステップ6: すべての  $d \in D$  に対して  $V_0(i_0:d)$  を求めた場合、 $\max_{d \in D} V_0(i_0:d)$  を与える  $d^* \in D$  を最適補

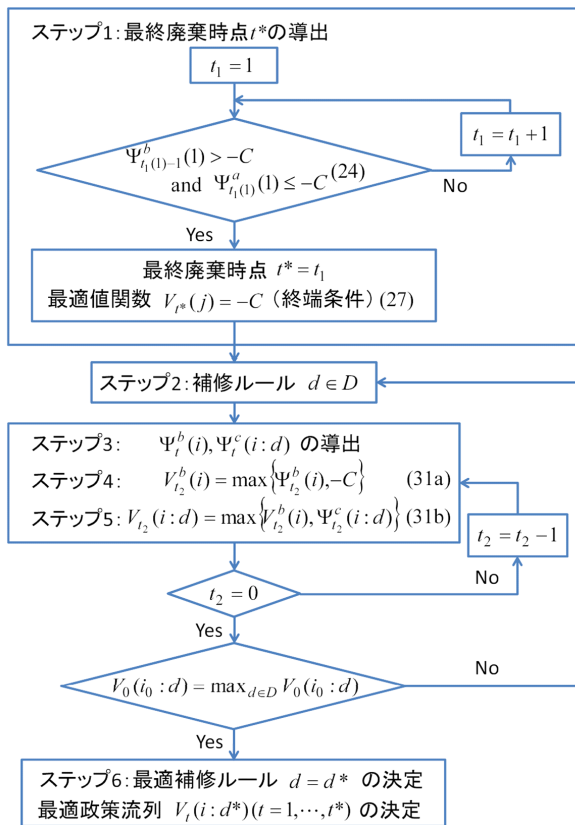


図-2 アルゴリズムの概要

修ルールとして選択する。そうでない場合、ステップ 2 に戻る。

## 5. 適用事例

### (1) 適用事例の概要

本研究で提案した最適廃棄・補修モデルを鳥取県 H 町の橋梁に関する管理問題に適用する。同町は中国山地に位置し、高齢化率が 48% に達する典型的な中山間地域である。同町の人口は現在約 5,000 人であり、対象とする橋梁は、長さ 20m、幅 8m の比較的短い橋梁であるが、同町における集落を連結する役割を果たしている。読者の理解を深めるために、同橋梁の地理的位置づけを模式的に図-3 に示している。集落 A と集落 B を結ぶ路線に同橋梁が敷設されており車での所要時間は 20 分であるが、近い将来集落 A が消滅する危機に直面している。橋梁は老朽化が一定程度進展しており、現時点においては使用限界に到達していないものの、必要な補修業務を実施するかどうかの問題になっている。仮に、同橋梁が廃棄された場合には点線で示す迂回ルートを通り、集落 B にたどり着くことが可能である。所要時間は約 30 分である。同町は山間部に位置しているため、大規模補修が必要となる多くの橋梁を有している。しかし、人口減少の進展とともに財源難が深刻化

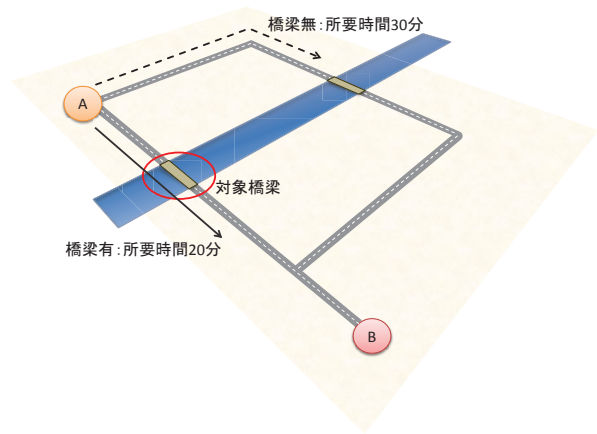


図-3 対象橋梁と迂回ルート

表-1 橋梁に関する各種条件

橋長	20m
幅員	8m
廃棄費用	11,200 千円
維持費用	450 千円/年
補修面積率	30%
初期使用便益	89,192 千円/年
便益半減期	10 年

注) 補修面積率は、補修対象となる橋梁の橋面積に対して実際に補修を実施する面積の割合を示したものである。

表-2 補修工法・費用条件

健全度	補修工法	補修単価	回復水準
2	表面被覆工法	13 千円 / m <sup>2</sup>	1
3	ひび割れ注入工法	50 千円 / m <sup>2</sup>	1
4	鋼版接着工法	150 千円 / m <sup>2</sup>	1
5	床版打替	350 千円 / m <sup>2</sup>	1

注) 回復水準は、補修後の健全度を示している。例えば、回復水準 1 は補修後の健全度が 1 に回復することを意味する。

することが予測される中で、既存橋梁の効率的な維持更新を実施することが課題となっている。その際、既存橋梁の中で基幹インフラとなる橋梁に関して、長期的には橋梁の廃棄も含めた維持更新計画を策定することが求められている。なお、本町において、分析対象とする橋梁の廃棄政策が検討俎上に上っているわけではなく、あくまでも筆者等による思考実験として本適用事例を実施していることを断っておく。

### (2) 分析条件の設定

本研究では、対象とする橋梁に関する目視点検データが十分に蓄積されておらず、また、適切な補修工法に関しても十分な検討がなされているわけではない。したがって、橋梁の 2 期間の健全度推移状態を表現するマ



表-3 走行時間短縮便益の設定<sup>20)</sup>

車種 $n$	時間価値原単位 $\alpha_n$ (円/分・台)	交通量 $Q_{m,n}$ (台/日)	走行時間 $T_{m,n}$ (分)	
			橋梁有 $T_{W,n}$	橋梁無 $T_{O,n}$ (迂回)
乗用車	40.1	200	20	30
バス	374.27	15	20	30
小型貨物車	47.91	125	20	30
普通貨物車	64.18	75	20	30

ルコフ推移確率行列を推計することが困難である。また、補修工法・費用に関する実績データがほとんど蓄積されていない。本研究では、最適廃棄・補修モデルの適用可能性の検証に重点を置くこととし、対象橋梁の割引当該期価値の算定にあたっては、筆者らの既往研究<sup>12),13)</sup>の中から類似の橋梁を選定し、筆者らがすでに推計したマルコフ推移確率と維持補修費用の算定結果を本事例においても参考にすることとする。

表-1 に示すように対象橋梁は、橋長 20m, 幅員 8m の橋梁である。橋梁は複数の部材で構成される複雑な構造系であり、特定部材の劣化と橋梁架替・廃棄の関係を明確に定めることは難しい。しかも、これまでの橋梁の架替や廃棄の要因を確認すると、劣化・損傷によるものは 10%~20%であり、改良工事や機能上の問題によるものが 70%~80%を占める<sup>19)</sup>。しかし、対象橋梁が位置する地域においては、今後、改良工事や機能向上を考慮する必要がないことから、橋梁の劣化・損傷に基づいて当該橋梁の施設管理政策を検討する。なお、具体的な橋梁部材として床版に着目する。これは、1) 劣化・損傷による架替・廃棄要因の中でも床版の劣化・損傷が、鋼橋および RC 橋の両橋において、ともに 30%~40%を占める<sup>19)</sup>、2) 床版は橋梁部材の中でも重要部材である、3) 既往研究<sup>12),13)</sup>において目視点検データが十分に蓄積されていることが理由である。当該橋梁に対する廃棄費用  $C$  に関しては、過去の実績値<sup>19)</sup>を参考に、比較的撤去費用のかからないコンクリート橋であることを考慮し、単価 70(千円/m<sup>2</sup>)として 11,200 千円と設定した。維持費用  $c$  に関しては、巡回や清掃などの最低限の維持管理費用として 450 千円/年を計上した。さらに、補修に関しては、補修面積率 30%と設定し、具体的に想定した補修工法と単価を表-2 に示す。

一方、対象橋梁の使用便益を、走行時間短縮便益を用いて定義する。走行時間短縮便益は国土交通省の費用対効果分析マニュアル<sup>20)</sup>に基づいて各車種の時間価値原単位から車両の走行時間を設定し、当該橋梁の有無に対する総走行時間費用の差として

$$BT = BT_O - BT_W$$

$$BT_m = \sum_n (Q_{m,n} \times T_{m,n} \times \alpha_n) \times 365 \quad (33)$$

と算定する。ここで、 $m$  を橋梁の状態（橋梁有の場合

表-4 マルコフ推移確率行列<sup>13)</sup>

健全度	1	2	3	4	5
1	0.9048	0.0928	0.0023	0.0000	0.0000
2	0	0.9512	0.0477	0.0010	0.0000
3	0	0	0.9575	0.0418	0.0008
4	0	0	0	0.9636	0.0364
5	0	0	0	0	1

W, 無の場合 O),  $n$  を車種とし、 $BT$ :走行時間短縮便益 (円/年),  $BT_m$ :橋梁の状態  $m$  の場合の総走行時間費用 (円/年),  $Q_{m,n}$ :橋梁の状態  $m$  の場合のルートにおける車種  $n$  の交通量 (台/日),  $T_{m,n}$ :橋梁の状態  $m$  の場合のルートにおける車種  $n$  の走行時間 (分),  $\alpha_n$ :車種  $n$  の時間価値原単位 (円/分・台) と定義する。筆者等による現地での実測データ (平成 21 年 10 月) に基づいて、交通量, 走行時間に関する入力データを表-3 のように設定した。このとき、走行時間短縮便益は 89,192 千円/年となり、この便益を当該橋梁の初期便益と設定することとする。施設の運用によって発生する将来時点における便益の流列を確定的に与えるものとするが、将来便益の流列には不確実性が存在するために、便益の流列に関して、複数のシナリオを作成し、5.(4) で感度分析を試みる。ここでは、同町による将来人口予測結果に基づいて、施設の使用便益の減少過程を指数関数を用いて表現する。具体的に初期便益を  $v(0)$  とした時、時刻  $t$  における施設の使用便益は、

$$v(t) = v(0) \times \exp\left(-\frac{1}{T} \log 2 \times t\right) \quad (34)$$

と表すことができる。 $T$  は使用便益の半減期であり、例えば ( $T = 10$ ) では 10 期後に施設の使用便益が初期使用便益の半分になることを意味する。

表-4 は劣化予測に用いたマルコフ推移確率行列を示している。現時点における当該橋梁の健全度は 3 (供用開始からの経過年数は 30 年である) であり、現時点以降に生起する平均的な劣化過程 (期待値パスと呼ぶ) を図-4 に示す。期待値パスの求め方に関しては参考文献 12) を参照して欲しい。健全度 3 から 4 に到達するまでの期待寿命が 23.0 年、同様に健全度 4 の期待寿命が 27.0 年であり、健全度 3 から 5 に到達する期待寿命は平

表-5 最適補修ルール

健全度	補修ルール			
	1 (最適補修ルール)	2	3	4
1	なし	なし	なし	なし
2	表面被覆工法	表面被覆工法	なし	なし
3	ひび割れ注入工法	なし	ひび割れ注入工法	なし
4	鋼板接着工法	鋼板接着工法	鋼板接着工法	なし
5	床版打替	床版打替	床版打替	床版打替
$V_0(3, d)$	851,597	850,980	851,575	851,061

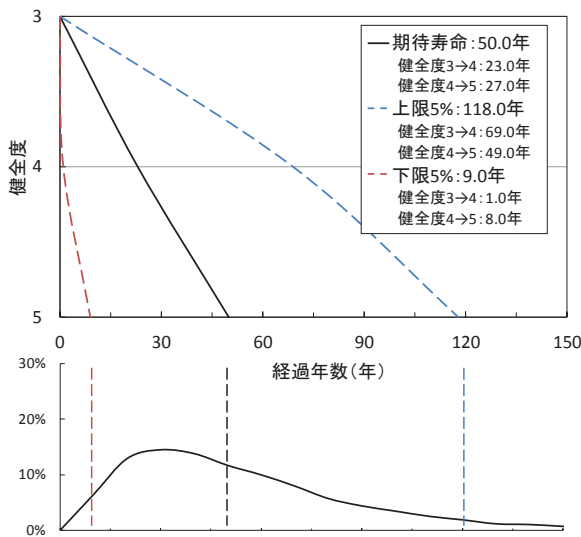


図-4 対象橋梁の期待値パスと期待寿命分布

均値で約 50.0 年（健全度 1 から 5 までは約 80.0 年）である。さらに、モンテカルロシミュレーションにより劣化過程サンプルパスの 90%信頼区間を算出した。その結果、期待寿命の下限 5%は 9.0 年、上限 5%では 118.0 年であった。上下限 5%に対応するサンプルパスも同図に併記する。

以上の条件に基づき、5.(3) では対象橋梁の割引当該期価値を算出し、最適管理政策を決定する。補修ルールとしては、各健全度に対して表-2 に示すような補修工法を想定した。同表には、各工法を採用した場合における補修単価も示している。さらに、補修工法の適用実績に基づく実務面を考慮して、各健全度における補修の有無を組み合わせることにより、表-5 に示すような補修ルールを想定した。問題 (21) を解くことにより、最適補修ルール  $d^*$  を求めることができる。同表には、各補修ルール  $d$  を適用した場合に獲得できる当該橋梁の期待純便益の割引現在価値  $V_0(3, d)$  を示している。現在時点において、補修費用と比較して使用便益が卓越しているため、補修ルールの違いによる割引現在価値に大きな差異が見出せない。しかし、当該自治体は補修費用の支出を負担するため、補修政策が採用

され続けている期間においては、補修費用を可能な限り小さく（結果として、割引現在価値をできるだけ大きく）するような補修ルールを採用することが望ましい。同表において、補修ルール 1 が当該橋梁の資産価値を最大化しており、最適補修ルールとして選択された。すなわち、補修期においては、健全度 2 においても、予防的に補修することが望ましい。なお、本研究で用いた将来便益に予測誤差が介在したり、橋梁の点検データが十分に蓄積されておらず、劣化予測モデルの特定化誤差が介在する可能性がある。そこで、5.(4) では、使用便益の将来シナリオや橋梁の劣化速度をパラメータと考えた感度分析を実施し、これらのパラメータ値の相違が割引当該期価値や最適管理政策に及ぼす影響を分析する。

### (3) 分析結果の考察

5.(2) に示した入力情報のもとで、式 (26) で定義される最終廃棄時点  $t^*$  は 115 年となる。前述したように、最終廃棄時点は、仮に橋梁の健全度が 1 の状態で推移したとしても、橋梁を廃棄した方が望ましくなるような極限的な状態を表している。換言すれば、最終廃棄時点は、使用便益の視点から考えた橋梁の寿命の理論的な上限値を表しており、廃棄・補修モデル (27) を再帰的に解くための終端時点を表している。現実には、橋梁の劣化が進展するため、最終廃棄時点  $t^*$  よりも早い時点で橋梁を廃棄するという事象が起こり得る。最終廃棄時点  $t^*$  を終端時点として最適廃棄・補修モデル (27) を再帰的に解くことにより、 $t$  期の期首に健全度  $i$  が観測された条件の下で「廃棄政策」、「廃棄保留政策」、「補修政策」を採用し、かつ当該期以降に最適補修ルール  $d^*$  と最適管理政策を採用することによって得られる期待純便益の割引当該期価値  $\Psi_t^a(i)$ ,  $\Psi_t^b(i)$ ,  $\Psi_t^c(i; d^*)$  を逐次算出した。図-5 には、現時点（図中の経過年数 0 年）における当該橋梁の健全度が 3 であり、かつ  $t$  期においても健全度 3 が継続しているときに、 $t$  期に各政策を採用した場合に実現する割引当該期価値  $\Psi_t^a(3)$ ,  $\Psi_t^b(3)$ ,  $\Psi_t^c(3; d^*)$  を示している。各期において、3 つの施設管理政策の中から、割引当該期価値が最大になる政策を健

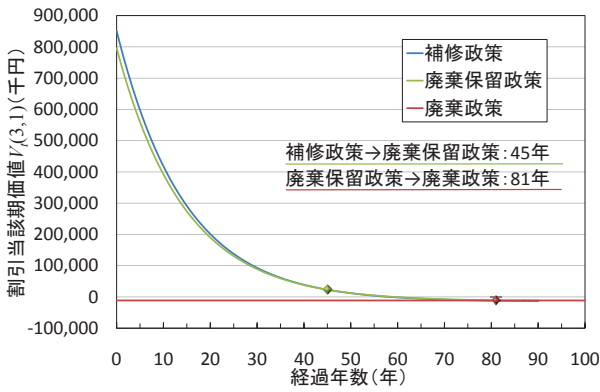


図-5 健全度3に対する最適管理政策

健全度3に対応する最適管理政策として選定する。図-5より、最適管理政策が時間の経過にともなって「補修政策 → 廃棄保留政策 → 廃棄政策」の順に推移していることが理解できる。時間の経過に伴って、使用便益が低下していくため、現時点からの経過年数45年で仮に健全度が3であっても、補修政策から廃棄保留政策に切り替わり、経過年数81年で廃棄保留政策から廃棄政策に切り替わる。さらに、現時点を起点とする将来90年間における各期において、それぞれの健全度が観測されたときに、最適管理政策を採用したときに実現する割引当該期価値の最大値（最適関数値）を、流列として整理した結果を表-6に示している。ただし、同表においては、紙面の都合上、2年ごとに最適関数値を示している。表中の青色は補修政策が、緑色は廃棄保留政策が、赤色は廃棄政策がそれぞれ最適管理政策として選ばれていることを表している。当然のことながら、健全度3の割引当該期価値の流列は、図-5において最適管理政策を採用した場合の割引当該期価値の流列と一致する。同表において、たとえば健全度5の場合、経過年数54年後の時点において、割引当該期価値が-8,920千円となっている。期待純便益の割引当該期価値が負の値をとっているが、廃棄費用がC=-11,200千円であることより、割引当該期価値が-11,200千円より大きい値をとる54年までは橋梁を廃棄しない結果となっている。また、健全度1に対しては補修が行われないので表については省略している。同表から基本的な特性として、健全度が小さい（橋梁が健全である）ほど、廃棄保留政策が採用される期間が長くなる一方で、健全度が大きい（劣化が進んでいる）ほど廃棄政策が採用される年数が早くなるということが読み取れる。図-6には、現時点を起点とする時間軸上の各期において仮想的に健全度1~5の状態が観測された場合を想定し、その期以降に最適廃棄・補修政策を適用した場合に実現する割引当該期価値の推移状況を示している。同図においては、最適管理政策が切り替わる期も併記してい

表-6 最適管理政策と割引当該期価値(単位:千円)

経過年数	供用年数	割引当該期価値				
		健全度2	健全度3	健全度4	健全度5	
0	30	853,373	851,597	846,797	837,197	
2	32	741,125	739,349	734,549	724,949	
4	34	643,410	641,634	636,834	627,234	
6	36	558,345	556,569	551,769	542,169	
8	38	484,295	482,519	477,719	468,119	
10	40	419,832	418,056	413,256	403,656	
12	42	363,717	361,941	357,141	347,541	
14	44	314,868	313,092	308,292	298,692	
16	46	272,346	270,570	265,770	256,170	
18	48	235,332	233,556	228,756	219,156	
20	50	203,112	201,336	196,536	186,936	
22	52	175,067	173,291	168,491	158,891	
24	54	150,657	148,881	144,081	134,481	
26	56	129,410	127,634	122,834	113,234	
28	58	110,919	109,143	104,343	94,743	
30	60	94,827	93,051	88,251	78,651	
32	62	80,823	79,047	74,247	64,647	
34	64	68,638	66,862	62,062	52,462	
36	66	58,037	56,261	51,461	41,861	
38	68	48,815	47,039	42,239	32,639	
40	70	40,795	39,019	34,219	24,619	
42	72	33,863	32,039	27,239	17,639	
44	74	27,837	25,959	21,159	11,559	
46	76	22,583	20,876	15,863	6,263	
48	78	18,002	16,475	11,490	1,649	
50	80	14,007	12,624	8,320	-2,370	
52	82	10,523	9,252	5,528	-5,871	
54	84	7,485	6,298	3,059	-8,920	
56	86	4,837	3,707	865	-11,200	
58	88	2,528	1,434	-1,096	-11,200	
60	90	517	-561	-2,864	-11,200	
62	92	-1,233	-2,311	-4,474	-11,200	
64	94	-2,756	-3,841	-5,957	-11,200	
66	96	-4,080	-5,174	-7,343	-11,200	
68	98	-5,231	-6,325	-8,661	-11,200	
70	100	-6,232	-7,306	-9,938	-11,200	
72	102	-7,107	-8,120	-11,200	-11,200	
74	104	-7,873	-8,854	-11,200	-11,200	
76	106	-8,542	-9,546	-11,200	-11,200	
78	108	-9,119	-10,214	-11,200	-11,200	
80	110	-9,607	-10,871	-11,200	-11,200	
82	112	-10,024	-11,200	-11,200	-11,200	
84	114	-10,422	-11,200	-11,200	-11,200	
86	116	-10,811	-11,200	-11,200	-11,200	
88	118	-11,200	-11,200	-11,200	-11,200	
90	120	-11,200	-11,200	-11,200	-11,200	

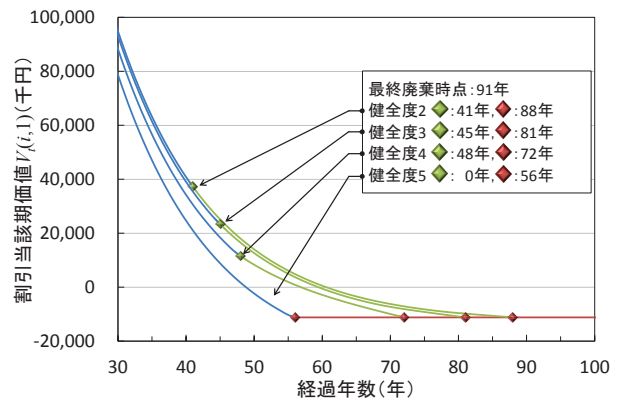


図-6 各健全度に対する最適管理政策

る。図-6より、健全度2,3,4では「補修政策 → 廃棄保留政策 → 廃棄政策」の順で各政策が採用されている。一方で、健全度1に関しては補修が行われず、常に当該期価値を最大にする最適値関数を採用するため、健全度1で廃棄保留政策に切り替わることはない。健全度5に関しては、廃棄保留政策が健全度5に到達した時点で橋梁を廃棄する政策であるために、廃棄保留政策が採用されることなく、直ちに廃棄政策が採用される結果となる。

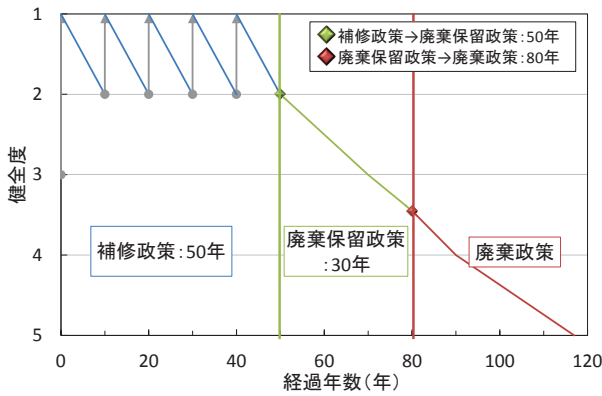


図-7 期待値パスと最適管理政策

図-7には、対象橋梁床版の劣化が期待値パスに従って推移する場合を想定し、最適管理政策を適用した場合に実現する劣化・補修過程を示している。図の青、緑、赤色で示す曲線は、それぞれ補修政策、廃棄保留政策、廃棄政策が採用される期間において実現する劣化・補修過程を示している。補修による健全度の回復を灰色で示す。現時点において、当該橋梁の健全度は3であるが、補修ルール1(表-5参照)が最適補修ルールとして適用されるため、橋梁はただちに補修され健全度が1に回復する。また、現時点から約10年で床版が健全度2へ推移する。10年経過した期では補修政策が採用されるため、健全度2の床版に対して再補修が実施され、健全度1へと回復する。補修前後の劣化速度が同一であると仮定すると、その後、当該橋梁に対して40年経過時点まで繰り返し補修が行われる。しかしその後、最適管理政策が補修政策から廃棄保留政策へと切り替わるために、50年以降では補修が見送られる。廃棄保留政策の間は補修が実施されないため、健全度は徐々に低下し、現時点から80年経過した期で、当該橋梁は廃棄される。

以上のように、仮に橋梁の劣化過程が期待値パスに従って推移する場合、最適管理政策は、時間の経過に伴って「補修政策 → 廃棄保留政策 → 廃棄政策」の順に推移していくことが理解できる。同図の劣化・補修過程は、あくまでも橋梁の劣化過程に関する1つのサンプルパス上で展開する劣化・補修・廃棄履歴を示しているに過ぎない。劣化過程が表-4に示すような確率的なマルコフ連鎖モデルで表現される場合、橋梁の劣化過程に関して多様なサンプルパスを記述することができる。サンプルパスが変化すれば、それに伴って劣化・補修過程も当然ながら変化する。

健全度1から5に関して期待劣化パスの90%信頼区間を求めるとサンプルパスは平均期待寿命の0.5倍から3.0倍の間で変動する。図-8には、平均期待寿命の0.5倍と3.0倍の速度で劣化過程が推移する場合を取り

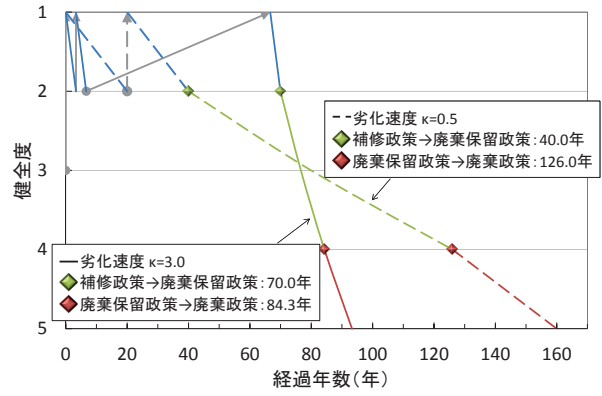


図-8 劣化サンプルパス (90%信頼区間) と最適管理政策

上げる。図の青、緑、赤色は、それぞれ補修政策、廃棄保留政策、廃棄政策の採用される期間を示す。劣化過程が3.0倍の速度で推移する場合、健全度は3.3年で健全度2に推移し補修が行われる。その後、当該橋梁に対して67年経過時点まで繰り返し補修が行われる。その後現時点から70年で健全度2に到達し、廃棄保留政策へと切り替わる。さらに14.3年が経過した期(経過年数84.3年)で健全度5に到達し、橋梁は廃棄される。逆に、劣化過程が0.5倍の速度で推移する場合、現時点でただちに補修を実施したのちに20年経過した期で再度補修が行われる。さらに40年経過時点で健全度2に推移し廃棄保留政策へと切り替わる。そして、126年経過した期で健全度4に到達し、当該橋梁は廃棄されることになる。

#### (4) 感度分析

##### a) 劣化シナリオに関する感度分析

対象橋梁においては、過去に点検結果の蓄積がない。そこで、類似の橋梁のデータを用いて推計したマルコフ推移確率をベンチマークとして用いている。しかし、橋梁をとりまく使用・環境条件により劣化過程は多様に変動し得る。マルコフ推移確率は多段階指数劣化ハザードモデル<sup>12)</sup>を用いて推計することが可能である。多段階指数劣化ハザードモデルでは、劣化速度がハザード率により一意的に表現できる。以下では、多段階指数劣化ハザードモデルのハザード率を感度パラメータと考え、対象橋梁の劣化速度の多寡が当該橋梁の最適管理政策に与える影響を分析した。多段階指数劣化ハザードモデルの詳細に関しては、参考文献12)に譲ることとする。図-9には、ベンチマークとして用いたハザード率 $\lambda$ に対して、ハザード率を比例的に変化させた修正ハザード率 $\tilde{\lambda} = \kappa\lambda$ を用いて求めた健全度3の割引当該期価値を示している。 $\kappa$ はハザード率に対する調整パラメータ(感度パラメータ)であり、同図では $\kappa = 1$ の場合がベンチマークと対応している。調

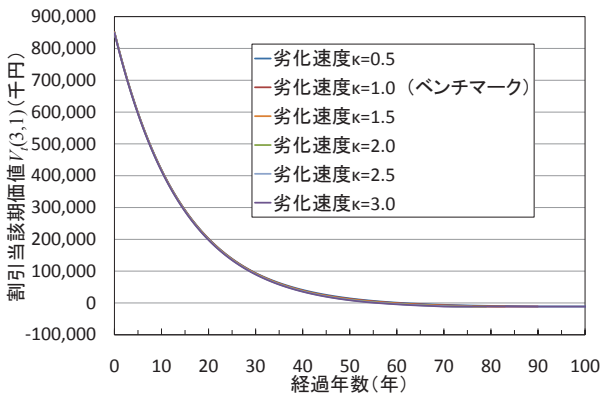


図-9 劣化速度による感度分析 (健全度 3)

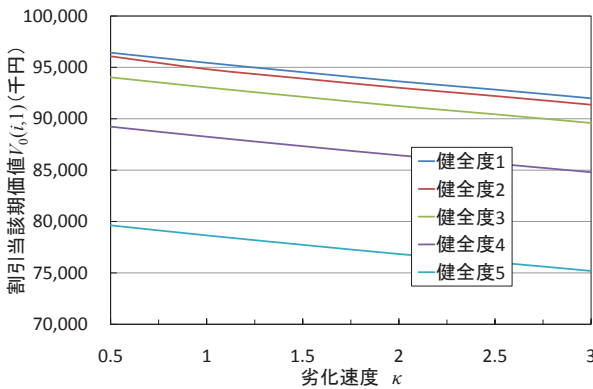


図-10 現時点 (供用開始から 30 年) における割引当該期価値

整パラメータを用いて、ハザード率を相対的に 0.5 倍 ( $\kappa = 0.5$ )~3.0 倍 ( $\kappa = 3.0$ ) まで変化させ、割引当該期価値がどのように変化するかを分析した結果を示している。これは、図-4 において、劣化サンプルパスの 90%信頼区間がその平均値の 0.5 倍から 3 倍の間で変動していたことを参考としている。劣化速度 (ハザード率  $\lambda$ ) の多寡によって、割引当該期価値はそれほど変動していない。これは本研究においては使用便益が補修費用等と比較して相対的に大きいことに起因している。ただし、最終的には廃棄政策を採用したときの割引当該期価値である -11,200 千円に収束する。また、いずれのケースにおいても、補修ルール 1 が最適補修ルールとして選択されており、補修期間中は予防補修政策が望ましい結果となっていることを付記しておく。

つぎに、現時点における劣化速度と割引当該期価値の関係を図-10 に示すが、健全度が低下するに従って割引当該期価値も減少していることがわかる。さらに、図-11 には、劣化速度の違いによる最適管理政策の切替タイミング (補修政策 → 廃棄保留政策) の変化を示す。いずれの健全度においても、劣化速度が小さくなるほど切替タイミングが早まる結果になっている。一般的に、劣化速度が減少すると当該橋梁の当該期価値

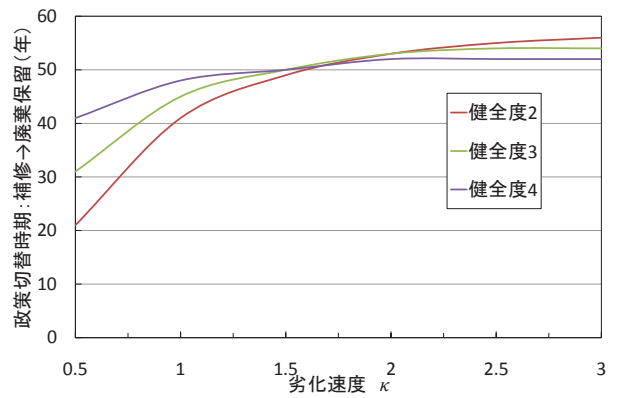


図-11 政策切り替え時期 (補修政策 → 廃棄保留政策)

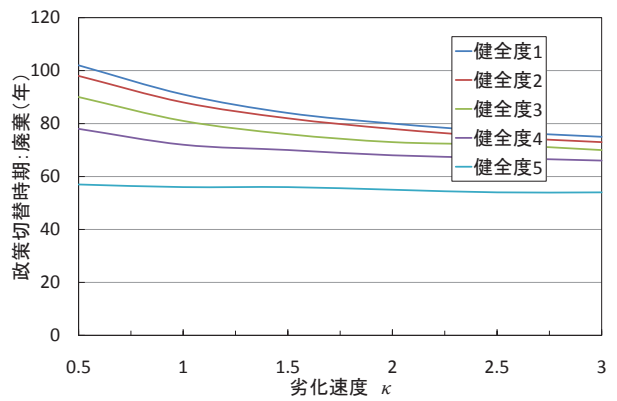


図-12 政策切り替え時期 (廃棄保留政策 → 廃棄政策)

は通常増加する。このことは、劣化速度が減少すれば、式 (32a) の右辺第 3 項の  $\hat{\pi}_{ij}^{d^*} V_t(j : d^*)$  が大きくなることから理解できる。しかし、劣化速度が相対的に遅い橋梁では、補修が必要となる期が遅くなるが、その間に橋梁の使用便益も小さくなる。橋梁の劣化が進展し補修が必要となる期に到達しても、橋梁補修によって得られる純便益が減少してしまっている。その結果、劣化速度が相対的に遅い橋梁では、比較的早い段階で廃棄保留政策を採用することが望ましい結果となっている。つぎに、図-12 は、廃棄保留政策から廃棄政策への切替タイミングを示している。劣化速度が増加するに従って、いずれの健全度においても一様に切替タイミングが短縮されており、劣化が早い橋梁ほど廃棄されるまでの寿命が短くなっている。

#### b) 便益減少シナリオに関する感度分析

本研究においては、橋梁の使用便益の減少シナリオを確定的に与えた。しかしながら、橋梁が生み出す将来便益には不確実性が存在し、将来便益の低下シナリオが橋梁の割引当該期価値に大きく影響を与えることが容易に予想できる。本研究では、将来便益の低下過程が式 (34) に従うことを想定するとともに、将来便益の減少速度の違いを「使用便益が半減するまでの所要時

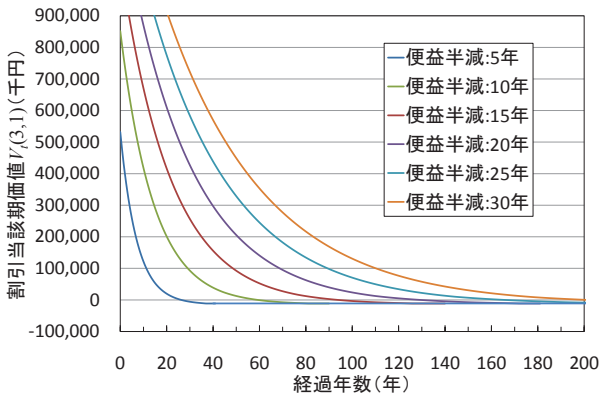


図-13 便益減少速度による感度分析

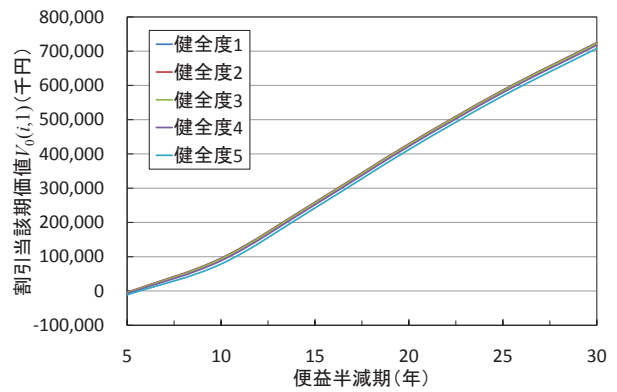


図-14 現時点(供用開始から30年)における割引当該期価値

間(以下、便益半減期と呼ぶ)を用いて表現する。そのうえで、半減期を感度パラメータと考え、将来便益の減少速度が割引当該期価値に及ぼす影響を分析した。図-13は、便益半減期を感度パラメータとする割引当該期価値と経過年数との関係を示している。同図では半減期10年をベンチマークケースとして、5年から30年まで変動させている。なお、橋梁の健全度は3である。ベンチマークケースと比較して、相対的に半減期が長くなる(便益の低下速度が遅くなる)ほど、割引当該期価値が大きくなるのがわかる。さらに、図-14には、現時点(供用開始から30年)に着目し、各健全度と割引当該期価値の関係を便益半減期を感度パラメータとして整理した結果を示す。同図より、便益半減期が長くなるにつれて、割引当該期価値が増加することが理解できる。ただし、現時点においては、健全度1,2,3の割引当該期価値には大きな差異は認められない。さらに、図-15と図-16には、便益半減期の変化が、施設管理政策の切替タイミングに及ぼす影響を示している。便益半減期が長くなるにつれ、補修政策から廃棄保留政策へ、廃棄保留政策から廃棄政策へ切り替えられる期(管理者が本解析結果に対する合理的な判断に基づいて切り替えを行うであろう期)が遅くなるのがわかる。

### (5) 政策的示唆

多くの中山間地において、橋梁の廃棄が検討されているような過疎集落では住民の高齢化が進展している。集落の中には住民の集団移転が検討されている場合もある。多くの集落においては住民の高齢化の速度(需要の減少速度)の方が、橋梁の劣化速度より大きい場合が少なくない。このような地域では、最低限の維持業務を行いながら、可能な限り橋梁を維持することが望ましい。対象橋梁の老朽化が進展している場合においても、橋梁の使用が危険な状態に到達する直前まで、橋梁を維持することが望まれる。橋梁の維持費用が便

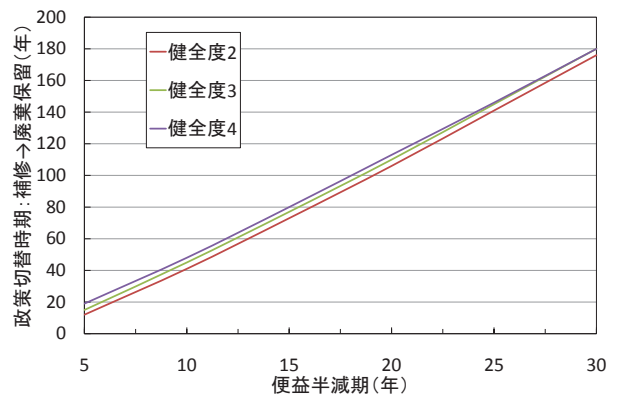


図-15 政策切替タイミング(補修政策→廃棄保留政策)

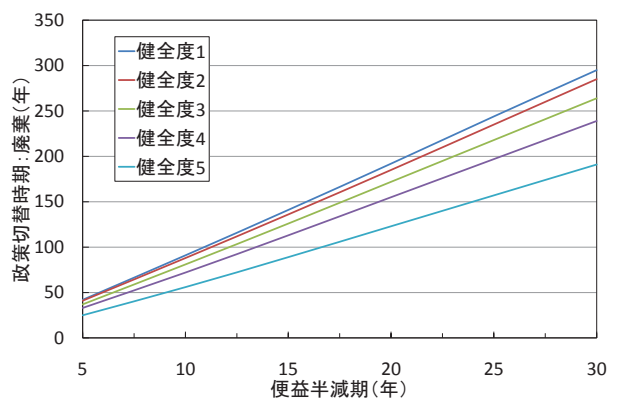


図-16 政策切替タイミング(廃棄保留政策→廃棄政策)

益を上回るような極端な状態において、経済性の観点から橋梁の廃棄政策が望ましいケースが発生する。この場合においても、居住者による清掃等の協力が得られる場合には、式(7)中の  $c$  が小さくなる、あるいは0となることから、橋梁の廃棄を保留することが望ましい。社会基盤施設は一度廃棄すれば、それ以降の期で便益を発生することができないという不可逆性が存在する。このため、施設の利用が不可能になる(危険となる)という極限的な状況を除いて、施設利用から便益

が発生する限り、維持費用の低減化を図ることにより、施設利用を継続するという政策が経済合理性の面からも望ましいと考える。

## 6. おわりに

本研究では、施設需要の減少と劣化過程の進展により、将来時点において施設需要が確定的に減少するような場合を想定し、対象とする施設の最適廃棄タイミングとそれまでの最適管理政策を検討する方法論を提案した。社会基盤施設は耐久性を有しているために、直ちに施設廃棄を実施するのではなく、安全性、経済性に問題がなければ継続的に運用することが可能である。このような観点から、1) 施設を直ちに廃棄する、2) 必要最低限の維持管理のみを実施する、3) 施設の補修を継続的に実施する、という3つの施設管理政策をとりあげた。その上で、施設需要や劣化状態を考慮し、施設管理政策を最適に転換するようなアセットマネジメント政策を求める最適廃棄・補修モデルを提案した。実証分析の結果、施設需要、劣化状態と対応して最適廃棄タイミングを決定できることを明らかにした。さらに、時間の経過に伴って、最適補修政策の水準が低下していくことが判明した。本研究で提案した方法論そのものは現実問題に対しても直接的に適用可能であると考えられるが、分析の詳細については基礎研究の段階である部分(例えば、施設需要)も存在するために、今後以下のような研究課題が残されている。第1に、本研究では施設需要が確定的に減少するトレンドを有する場合を想定していた。そのため、上述の3つの施設管理政策に対して、「補修政策 → 廃棄保留政策 → 廃棄政策」という適用順序を一意的に決定することができた。しかし、需要トレンドが確定的な減少トレンドを持たない場合、施設管理政策の適用順序を一意的に決定することはできない。この場合、政策のスイッチング順序とそのタイミングを同時に決定するような最適廃棄・補修モデルを定式化することが必要となる。第2に、施設需要の不確実性を考慮する必要がある場合、施設需要と劣化過程という2つの不確実性を同時に考慮に入れた動的計画モデルを開発することが必要である。施設需要の将来予測が困難である場合は、施設需要のモニタリング結果に基づいて、動的意思決定問題をベイズ修正するような方法論の開発が必要となる。さらに、本研究でとりあげた政策以外にも、施設廃棄を前提とした意思決定問題に移行することを保留し、当面の間、定常的政策を適用するというシナリオを採用することも可能である。問題の特性に応じて、本研究で提案した最適廃棄・補修モデルを多方面に拡張することが可能である。第3に、本研究では、過疎地域の

自治体を対象とした場合、過度に複雑な補修ルールを提案することは実際的ではないという理由に基づいて、時間を通じて一定の補修ルールを採用するという前提の下に最適廃棄・補修モデルを定式化した。しかし、施設便益が時間とともに減少する場合、時間依存的な非定常補修ルールを考えることもできる。このような非定常補修ルールを用いた最適廃棄・補修モデルに関する分析も理論的には興味のある課題である。最後に、現実の施設廃棄問題においては、本研究でとりあげた安全性、経済性だけでなく、代替施設の利用可能性、災害時におけるリダンダンシー等をはじめとして、多くの評価基準を用いて総合的に検討することが必要であることは言うまでもない。

なお、本研究の一部は文部科学省「若手研究者の自立的な研究環境整備促進」事業によって大阪大学グローバル若手研究者フロンティア研究拠点にて実施された。また、本研究の一部は社団法人近畿建設協会「平成21年度研究助成」を受けて実施した。

## 参考文献

- 1) 例えば, White, D.J.: *Markov Decision Process*, Wiley, pp.130-146, 1993.
- 2) 例えば, Eckles, J.E.: Optimal maintenance with incomplete information, *Operations Research*, Vol.16, pp.1058-1067, 1968.
- 3) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research*, Part B, Vol.27B, pp.425-438, 1993.
- 4) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol.28, pp.55-62, 1994.
- 5) 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.
- 6) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 7) Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.
- 8) 坂井康人, 慈道充, 貝戸清之, 小林潔司: 都市高速道路のアセットマネジメントーリスク評価と財務分析ー, 建設マネジメント論文集, 土木学会, Vol.16, pp.71-82, 2009.
- 9) 青木一也, 小田宏一, 児玉英二, 貝戸清之, 小林潔司: ロジックモデルを用いた舗装長寿命化のベンチマーキング評価, 土木技術者実践論文集, Vol.1, pp.40-52, 2010.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.68-82, 2005.
- 13) 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の最適補修戦略, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.

- 14) 小林潔司: 分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性, 土木学会論文集, No.793/IV-68, pp.59-71, 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) Dixit, A. K. and Pindyck, R. S.: *Investment Under Uncertainty*, Princeton University Press, 1994.
- 17) Trigeorgis, L.: *Real Options, Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*, The MIT Press, 1996.
- 18) 森村英典, 高橋幸雄: マルコフ解析, 日科技連, 1979.
- 19) 玉越隆史, 大久保雅憲, 市川明広, 武田達也: 橋梁の架替に関する調査結果 (IV), 国土技術政策総合研究所資料, No.444, 2008.
- 20) 国土交通省道路局都市・地域整備局: 費用便益分析マニュアル, 2008.

(2011. 5. 26 受付)

## THE OPTIMAL SCRAPPING AND MAINTENANCE MODEL OF INFRASTRUCTURE CONSIDERING DETERIORATION PROCESS

Kengo OBAMA, Kiyoyuki KAITO, Kazuya AOKI, Kiyoshi KOBAYASHI and Taiki FUKUDA

In this study, the authors propose a methodology for designing optimal scrapping and maintenance policies for infrastructures that are to be demolished due to the demand decline or the deterioration progression. Infrastructures are durable, and can be used continuously as long as there are no problems in safety or economic performance. This study is focused on the three scrapping and maintenance policies: (1) to demolish infrastructures immediately, (2) to maintain them under the minimum maintenance, and (3) to repair them constantly. Then, the authors propose optimal scrapping and maintenance models for designing asset management policies considering the demand and deterioration of infrastructures. In addition, the effectiveness of the proposed optimal scrapping and maintenance models is investigated through a case study.