劣化予測に基づく
舗装の修繕計画シミュレーションプログラムの開発

松林　卓[*1]　　青木　一也[*2]
崎田　直都[*3]　　貝戸　清之[*4]

要　　旨

本研究は，人口減少の進行や財政制約の増大に伴い，効率的かつ戦略的なインフラ維持管理が求められる社会的背景を踏まえ，道路舗装を対象とした劣化予測型の修繕計画シミュレーションプログラムを開発したものである．プログラムはPythonで構築され，マルコフ劣化ハザードモデルとモンテカルロシミュレーションを用いて舗装の将来劣化を予測し，補修・更新費用およびサービス水準の推移を評価する．汎用的な「自治体モデル」と，実務の評価指標や意思決定フローを反映した「有料道路モデル」の2種類を構築した．さらに，予算設定，サービスレベル設定，補修戦略比較への活用を想定し，補修予算および劣化速度を変化させた感度検証を実施した．その結果，予算増加により舗装状態が改善し，劣化速度増加により舗装状態が悪化するという理論的に妥当な傾向を確認した．

キーワード　アセットマネジメント／劣化予測／マルコフ劣化ハザードモデル／ライフサイクルコスト

目　　次

１．開発の背景と目的
２．プログラムの概要
３．プログラムの特徴
４．感度検証
５．本開発技術の拡張性
６．まとめ

DEVELOPMENT OF A PAVEMENT MAINTENANCE PLANNING SIMULATION PROGRAM BASED ON DETERIORATION PREDICTION

Taku　MATSUBAYASHI　　**Kazuya　AOKI**
Naoto　SAKITA　　**Kiyoyuki　KAITO**

Synopsis:

This study developed a Deterioration Prediction-Based pavement maintenance planning simulation program in response to the growing need for efficient and strategic infrastructure management under population decline and fiscal constraints. Developed using Python, the program employs a Markov deterioration hazard model and Monte Carlo simulation to predict future pavement deterioration and evaluate maintenance costs and service levels. Two models were implemented: a generic municipal model and a toll-road model incorporating performance indicators and decision-making processes used in practice. Sensitivity analyses were conducted by varying maintenance budget levels and deterioration rates to examine the program's applicability to budget planning, service level management, and maintenance strategy evaluation. The results confirmed theoretically consistent trends, with pavement conditions improving as maintenance budgets increased and deteriorating as deterioration rates increased.

＊１本店　ＩＣＩ総合センター　　＊２インフロニア・ホールディングス株式会社
＊３本店　事業戦略本部　　＊４大阪大学大学院　工学研究科

1. 開発の背景と目的

我が国では，少子高齢化の進展に伴い人口構造が大きく変化している．特に生産年齢人口は 1995 年をピークに減少に転じており [1]，労働力不足の深刻化や財政制約の増大が社会的課題となっている．このような社会経済状況の変化は，社会基盤施設の維持管理・更新を担う人的資源および財源の確保を困難にしており，インフラマネジメントのあり方に大きな影響を及ぼしている．

一方，高度経済成長期に集中的に整備された社会基盤施設の多くは，建設後 50 年以上が経過し，老朽化対策が喫緊の課題となっている．このため，従来の事後保全型維持管理から予防保全型維持管理への転換が進められるとともに，PPP/PFI 等による民間活力の活用による効率的な維持管理手法の導入が推進されている．さらに近年では，道路・河川・上下水道といった施設を個別に管理する従来の手法に加え，地域全体のインフラ資産を対象として総合的な最適化を図る分野横断的なアセットマネジメントの重要性が高まっている [2]．

しかしながら，人口減少の進展や厳しい財政状況を踏まえると，既存インフラを従来と同等の水準で維持・更新し続けることは困難になりつつある．そのため，インフラストックの適正化を目的として，施設の集約化・再編やダウンサイジングを含む戦略的なアセットマネジメントへの転換が求められている [3]．

インフラのアセットマネジメントにおいては，ライフサイクル費用の最小化を目指した補修・更新計画の策定が基本となる．そのためには，将来の施設状態および維持管理費用を適切に予測することが重要であり，特に劣化予測が中核的な役割を担う．劣化予測手法は大別して力学的手法と統計的手法の２つに分類される．力学的手法は理論的な裏付けに優れる一方で，多くの入力データを必要とするため適用範囲に制約がある．これに対し，統計的手法は点検データを活用できることから実務への適用性が高く [4]，近年では，インフラ資産全体を対象としたマクロな劣化予測だけでなく，個々の施設を対象としたミクロな劣化予測手法も提案されている [5]．

補修・更新計画の策定においては，将来の劣化進行を考慮しながら，費用とリスクのトレードオフを踏まえた合理的な意思決定が求められる．しかし，将来の劣化や予算状況には多くの不確実性が存在するため，定量的根拠に基づく意思決定は必ずしも十分に行われていない．また，施設の供用停止やサービス水準の低下を伴う施策を実施する場合には，住民や利用者の理解を得るための社会的受容性の確保も重要な課題となる．そのため，維持管理方針の違いが将来の費用負担やサービス水準に及ぼす影響を定量的に評価し，その結果を客観的な根拠として提示することにより，意思決定の透明性向上と合意形成の促進を図ることが必要である．

以上の背景を踏まえ，本研究では道路舗装を対象として，劣化予測に基づき補修・更新費用およびサービス水準の将来推移を複数の維持管理シナリオの下で評価可能なシミュレーションプログラムを開発した．さらに，各シナリオにおける費用負担とサービス水準の関係を可視化・定量化することで，合理的な意思決定および戦略的な維持管理計画の策定を支援することを目的とした．

2. プログラムの概要

2.1 基本的なシミュレーションの流れ

道路舗装の補修・更新計画の策定においては，舗装の劣化状況に加え，交通利用状況，行政が求める機能・性能水準，舗装構成などの幾何構造といった複数の要因を総合的に考慮する必要がある．本プログラムは，これらの判断に必要となる，点検データに基づく将来劣化の推定および，それに基づく補修・更新費用の算定処理をモジュール化したものである．主な処理の流れを**図-1** に示す．

プログラムの実行にあたっては，まず Excel に入力された点検データ，施工単価，補修・更新ルール等を読み込み，初期の舗装状態を設定する．次に，1 年単位での逐次計算を実施する．この計算では，舗装区間ごとに翌年度

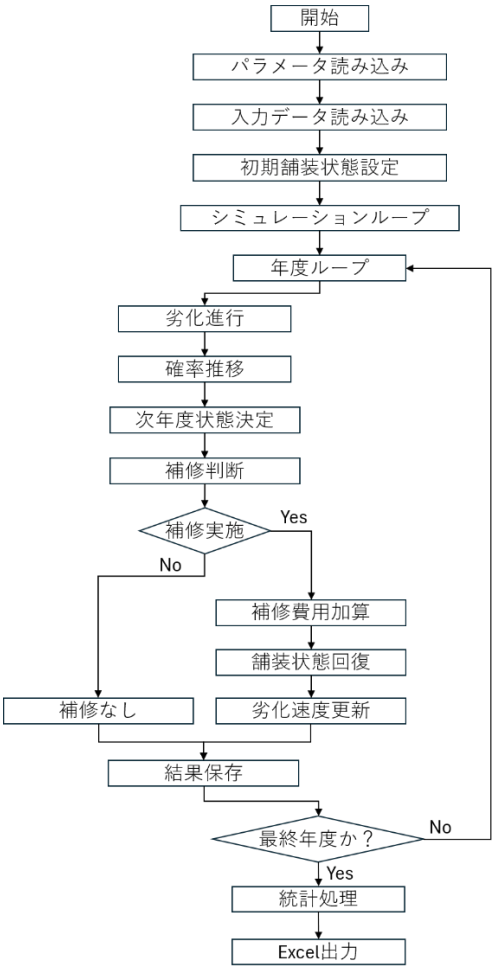


図-1 シミュレーションの流れ

の劣化状態を推定し，その結果に基づいて補修実施の要否を判定する．補修または更新を実施する場合には，採用工法に応じた費用を加算するとともに，舗装状態を回復させ，新たな劣化速度を設定する．これらの処理を設定された最終年まで繰り返し，全期間の計算終了後に統計処理を行い，結果を Excel に出力する．

劣化状態の推定には，マルコフ劣化ハザードモデルに基づくモンテカルロシミュレーションを用いている．マルコフ劣化ハザードモデルは，インフラの劣化が時間の経過とともに進行する過程を確率的に表現する統計モデルである [6]．一方，モンテカルロシミュレーションは，乱数を用いた試行を多数回繰り返すことで結果の分布を推定する手法である [7]．本プログラムでは，補修実施後の舗装状態は初期状態に回復するものとして扱う．なお，交通量の急変や災害といった外的要因は考慮していない．

2.2 採用したプログラミング言語と構築したモデル

本開発では，汎用性および保守性の観点から，プログラミング言語として Python を採用した．Python は拡張性が高く，機能追加や仕様変更に対して柔軟に対応可能であるため，本研究で想定する将来的な運用環境の変化にも適している．

また，今後の適用範囲の拡大や運用方法の多様化に伴い，入力データおよび出力形式の変化が想定される．このため，現段階ではユーザーインターフェース（UI）を固定したソフトウェアとしては実装せず，柔軟に改良・拡張可能な構成としている．

本研究で構築したモデルは，**表-1** に示す「自治体モデル」と「有料道路モデル」の 2 種類である．自治体モデルは，多様なインフラ管理者の条件に対応可能な基盤モデルとして設計し，汎用性を重視している．一方，有料道路モデルは，実在する有料道路の維持管理実務において用いられている健全性評価指標および補修判断フローを反映し，基本モデルを用途別にカスタマイズしたものである．各モデルの特徴については 3 章で述べる．

2.3 プログラムの活用方法の想定

本プログラムでは，予算制約の有無を条件として設定し，将来における舗装状態の推移および維持管理費用の変化を定量的に評価できる．シミュレーション結果の一例を**図-2** に示す．図中の横軸は経過年数，縦軸の棒グラフは補修・更新費用の累積または当該年費用を，折れ線グラフは劣化指標に対するリスク値を表す．このリスク値とは，ひび割れ率やわだち掘れ量などの劣化指標について，所定の管理基準を満たさない未対応区間の割合を意味する．

本プログラムを活用することにより，インフラ管理者は主に以下の三つの観点から合理的な意思決定を行うことが可能となる．

表-1　構築したモデル

自治体モデル	有料道路モデル
・多様なインフラ管理者の条件に対応可能な基盤モデルとして設計 ・汎用性を重視	・実務で用いられている評価指標や意思決定フローを反映 ・自治体モデルをカスタマイズ

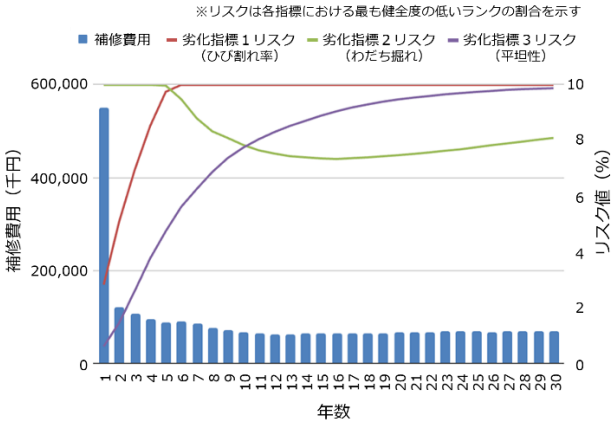


図-2　シミュレーション結果の一例

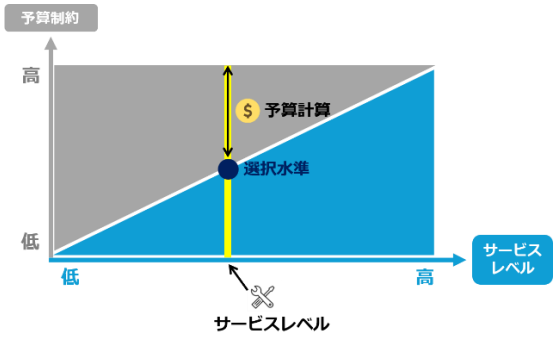


図-3　予算とサービスレベルの関係

(1) 予算設定の妥当性の検討

予算制約を設定した場合，年間の補修・更新費用を一定とした条件下で，時間の経過に伴う劣化リスクの変化を把握することができる．管理者は，あらかじめ定めたサービスレベル（維持すべき性能水準）に対応する管理基準値と本リスク値を比較することで，現行の予算水準が所要のサービスレベルを満たし得るかを定量的に評価できる．これにより，予算の過不足や見直しの必要性を客観的に検討する根拠が得られる．

(2) サービスレベルの設定

一般に，インフラ維持管理における予算とサービスレベルの間にはトレードオフの関係が存在する（**図-3**）．すなわち，限られた財源の下では，サービスレベルを高く維持するほど必要な予算は増大する．一方で，近年の税収減少や財政制約の強まりを踏まえると，従来のサービスレベルを維持できない場合も想定される．本プログラムでは，劣化指標に対する未対応区間の割合を指標と

しているため，許容する未対応割合を調整することで，サービスレベル低下の影響を定量的に評価できる．これにより，サービスレベルの見直しに関して，説明責任を伴う合理的な判断が可能となる．

(3) 補修戦略の比較

本プログラムでは，補修の実施タイミングや工法の違いに応じた複数のシナリオを設定し，それぞれの舗装状態および費用の将来推移を比較することができる（**図-4**）．例えば，劣化の初期段階で計画的に補修を行う予防保全型と，一定程度劣化が進行した後に対応する事後保全型とを比較することにより，長期的なライフサイクルコストや補修回数，さらには舗装状態の安定性への影響を評価できる．このような分析結果は，コストと性能の両面を踏まえた最適な維持管理方針の選定に資するものである．

3. プログラムの特徴

本プログラムは，劣化状態の定量化と補修判断のロジックに特徴がある．以下では，健全度ランクへの変換手法および補修意思決定ロジックについて，それぞれ具体的に説明する．

3.1 健全度ランクへの変換

本プログラムでは，舗装の劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルにより表現している．このモデルは，劣化状態を離散的な状態へ分類することを前提としているため，劣化指標が連続値のままでは直接利用できない．そのため，各種の劣化指標をあらかじめ段階的な「健全度ランク」に変換する処理を行う必要がある．具体例として，劣化指標がひび割れ率，わだち掘れ，平たん性であった場合の健全度ランクへの変換の例を**表-2** に示す．

なお，有料道路モデルにおいては，補修意思の決定はMCI 値（Maintenance Control Index）を用いて行っている実務上の制約があることから，ひび割れ率，わだち掘れ，平たん性それぞれの値から計算される MCI 値（式[1]～式[4]のうち最小値）に対して健全度ランクへの変換を行っている．以下では，自治体モデルとの混同を避けるため，MCI ランクと呼ぶ．**表-3** に劣化指標と MCI ランクとの関係を示す．

$$MCI = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2} \quad [1]$$

$$MCI_0 = 10 - 1.51C^{0.3} - 0.30D^{0.7} \quad [2]$$

$$MCI_1 = 10 - 2.23C^{0.3} \quad [3]$$

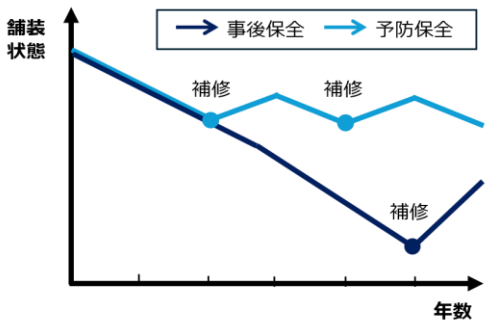
$$MCI_2 = 10 - 0.54D^{0.7} \quad [4]$$

ここで，

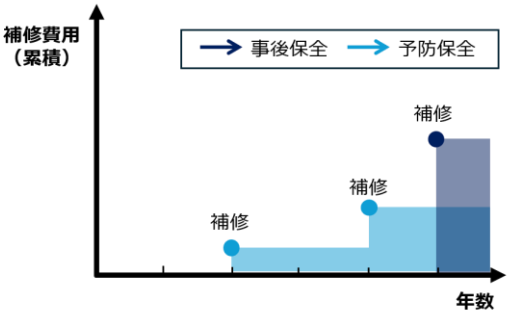
C：ひび割れ率（%）

D：わだち掘れ量（mm）

σ：平たん性（mm）



a) 舗装状態と年数の関係



b) 補修費用と年数の関係

図-4 シナリオによる舗装状態ならびに補修費用の相違の模式図

表-2 健全度ランクの設定例（自治体モデル）

劣化指標：ひび割れ率		劣化指標：わだち掘れ		劣化指標：平たん性	
健全度ランク	判定条件	健全度ランク	判定条件	健全度ランク	判定条件
1	a ≤ 0	1	a ≤ 5	1	a ≤ 0
2	0 < a ≤ 10	2	5 < a ≤ 10	2	0 < a ≤ 1
3	10 < a ≤ 20	3	10 < a ≤ 15	3	1 < a ≤ 3
4	20 < a ≤30	4	15 < a ≤ 20	4	3 < a ≤ 5
5	30 < a	5	20 < a	5	5 < a

表-3 MCI ランクの設定（有料道路モデル）

MCIランク※	判定条件
4	5 ≤ a
3	4 ≤ a < 5
2	3 ≤ a < 4
1	a < 3

※4が最も良好、1が最も劣化

3.2 補修意思決定のロジック

本プログラムでは，健全度ランクに基づいて補修・更新の要否を判断するだけでなく，実務的な制約条件を考慮した意思決定ロジックを組み込んでいる．本節では，共通のロジックと有料道路モデル特有のロジックに分けて説明する．

(1) 共通のロジック

自治体モデルおよび有料道路モデルに共通する基本的

な補修判定の考え方は以下のとおりである．まず，各区間について算出された健全度ランクが，あらかじめ設定された閾値を超えた場合に補修対象と判定する．ここで重要なのは，複数の劣化指標を用いる場合には，それぞれのランクのうち最も劣化が進んだ指標を基準として評価する点である．これは，安全性およびサービス水準の観点から，最も劣化の激しい要因が全体性能を規定すると考えるためである．

さらに，本プログラムでは，「年間予算」および「劣化が著しい区間の割合」の制約条件がある場合に補修対象であっても補修を実施しない判断がなされるロジックが組み込まれている．このようなロジックにより，理論的に最適な補修計画ではなく，実行可能性を考慮した現実的な意思決定が再現される．

(2) 有料道路モデル特有のロジック

有料道路モデルでは，より詳細かつ実務的な判断を可能とするため，複数の追加条件を組み込んでいる．

まず，補修・更新の要否の判定では，MCI に基づく健全度ランクに加えて「当該区間が橋梁上であるか」や「特定のランプやインターチェンジを含むか」の条件を考慮して判定される．これらの条件を反映した判定フローは**図-5** に示す通りであり，構造条件や交通機能を踏まえた多面的な判断が可能となっている．

補修実施が決定した後，次に検討されるのが修繕方法である．本プログラムでは，1 層施工または 2 層施工のいずれかを選択するロジックを実装している．この判断は「路線の属性」，「当該区間が特定のランプに含まれるか否か」，「ひび割れ率」といった要素に基づいて行われる．その判定フローは**図-6** に示す通りであり，劣化の進行度と交通条件の双方を考慮した設計となっている．

修繕方法が決定した後，使用材料を判定する．使用材料は，施工区間の位置条件（IC やランプ該当性など）に応

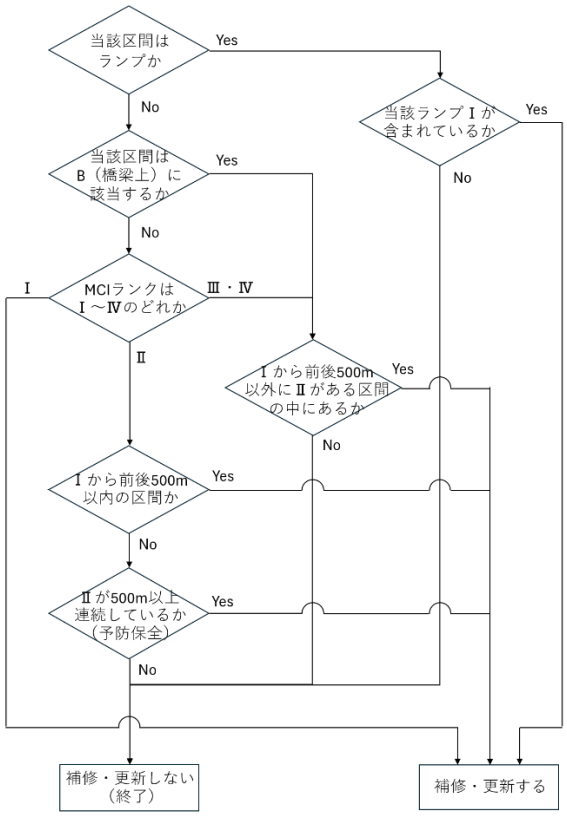


図-5　補修・更新の要否判定のフロー（有料道路モデル）

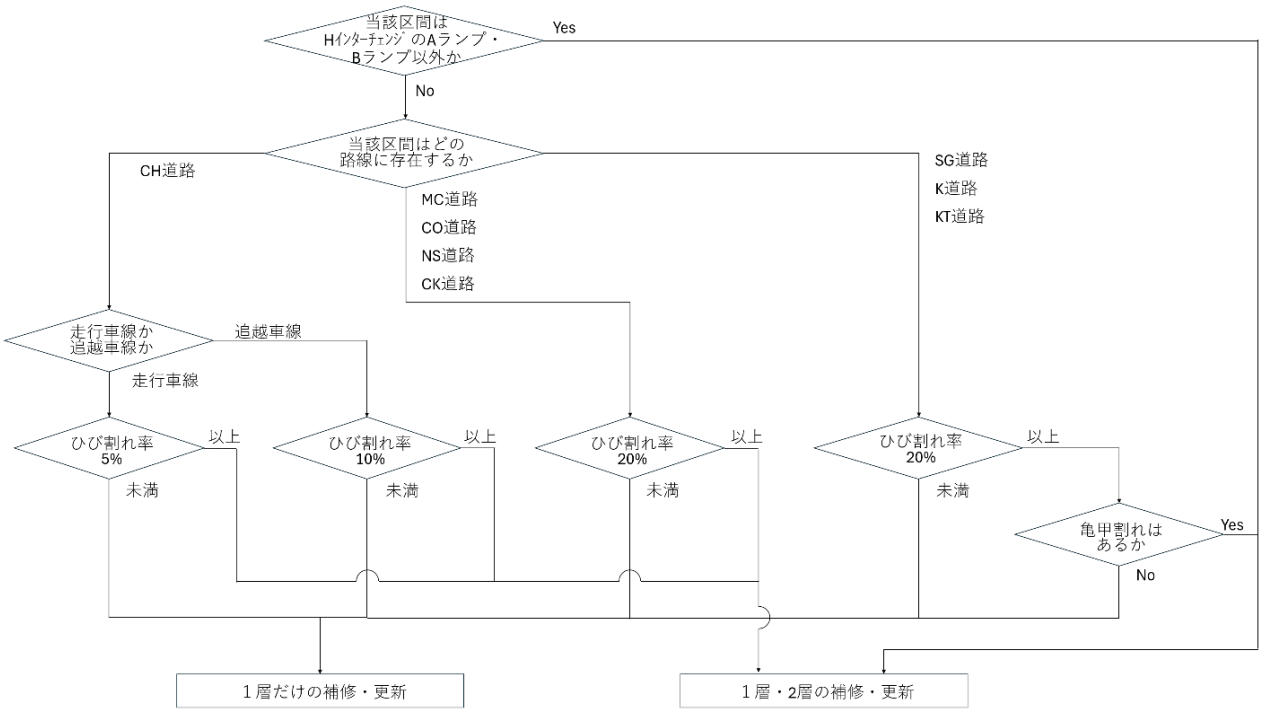


図-6　修繕方法決定のフロー（有料道路モデル）

じて決定される．これにより，交通負荷や環境条件に適合した材料選択が可能となる（**図-7** 参照）．

最後に，施工を考慮した判断として，同時施工を考慮できるロジックを組み込んでいる．同時施工とは，補修対象区間に隣接する区間を含めて一体的に施工する手法である．工事では，交通規制や施工準備に伴う固定費用がかかるため，単一区間のみを施工するよりも隣接区間をまとめて施工した方が効率的となる場合がある．この点を踏まえ，本プログラムでは，「2 つの補修対象区間の間に 1 区間が存在する」，「当該中間区間が補修対象の一段階手前まで劣化している」条件を満たす場合（**図-8**）に同時施工を実施する．このロジックにより，ライフサイクルコストの削減と施工効率の向上を同時に実現している．

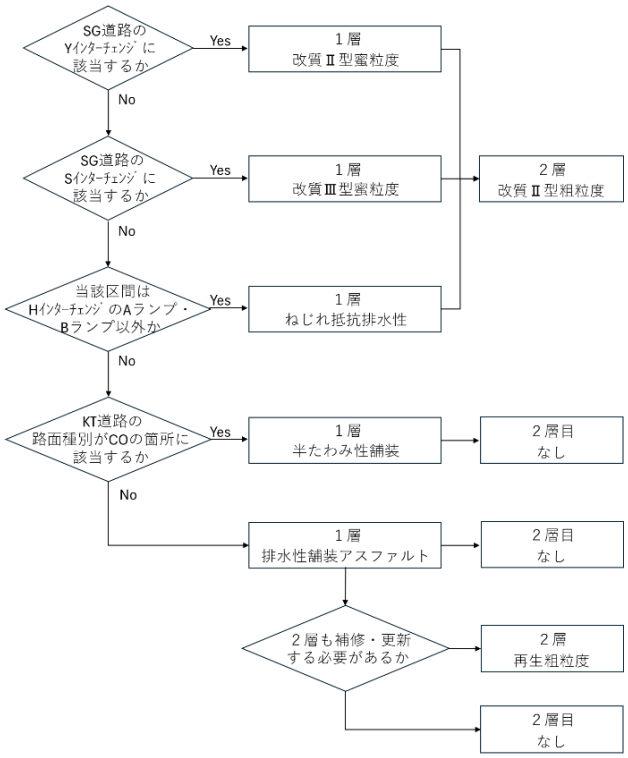


図-7　有料道路モデルのフロー_修繕使用材料の決定

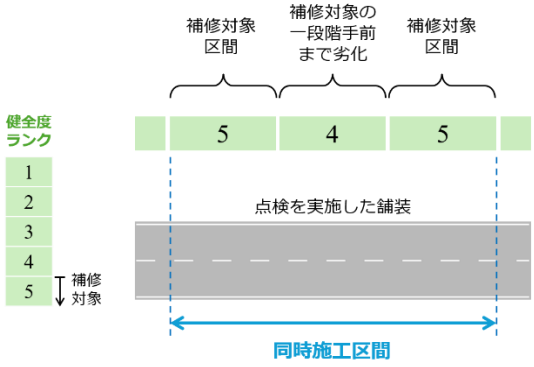


図-8　同時施工区間の考え方

4. 感度検証

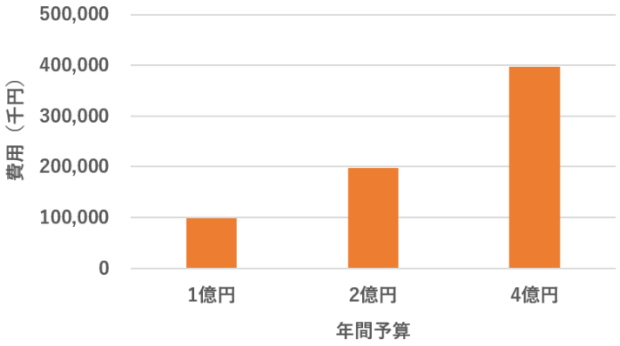
本プログラムに対し，理論上結果が明らかな条件を与えた際のアウトプットが理論と同様の傾向を示すか否かを確認することを通じ，感度の検証を行った．

4.1 補修予算に対する感度検証

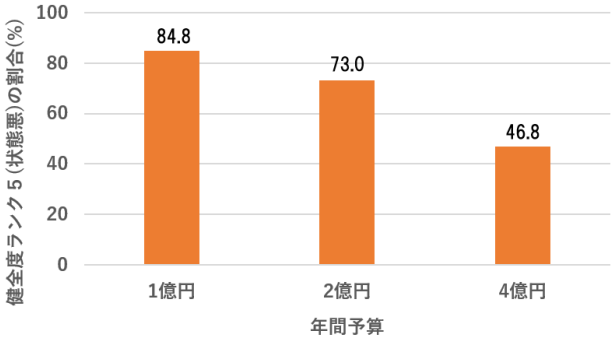
(1) 自治体モデル

補修予算の大小は，舗装の状態に直接的に影響を与える．すなわち，補修予算が少なければ舗装状態はより悪化し，補修予算が多ければ舗装状態はより健全になる．この傾向がプログラム上の条件設定で再現されるか否かを確認した．年間予算の制約を 1 億円，2 億円，4 億円の 3 パターン設定し，それ以外の条件を同一としてそれぞれシミュレーションを実施した．シミュレーション期間は一般的に土木構造物の寿命と言われる 50 年間とした．

シミュレーション結果の例として，50 年目における補修費用ならびに舗装状態が悪い区間の割合（ひび割れ率の健全度ランクが 5 の割合）の応答を**図-9** に示す．年間予算の制約が 1 億円の場合，舗装状態が悪い区間の割合が 84.8%である一方，年間予算が多くなるほどその割合は小さくなり，4 億円の場合は 46.8%となった．これより，本モデルは予算制約に対して妥当な応答を示すことが確認された．



a) 年間予算ごとの補修費用



b) 年間予算ごとの状態が悪い区間の割合

図-9　補修予算に対する感度検証結果
（自治体モデル，50 年目）

(2) 有料道路モデル

有料道路モデルに対しても自治体モデルと同様，年間予算の制約を 1 億円，2 億円，4 億円の 3 パターン設定し，それ以外の条件を同一としたシミュレーションをそれぞれ実施した．シミュレーション期間も自治体と同様 50 年間である．

シミュレーション結果の例として，50 年目における補修費用ならびに舗装状態が悪い区間の割合（MCI ランクが 1 の割合）の応答を**図-10** に示す．結果，年間予算の制約が 1 億円の場合，舗装状態が悪い区間の割合は 96.7%である一方，4 億円の場合には 86.7%となっており，自治体モデルと同様，補修予算が多ければ舗装状態はより健全になる傾向が確認された．

4.2 劣化速度に対する感度検証

(1) 自治体モデル

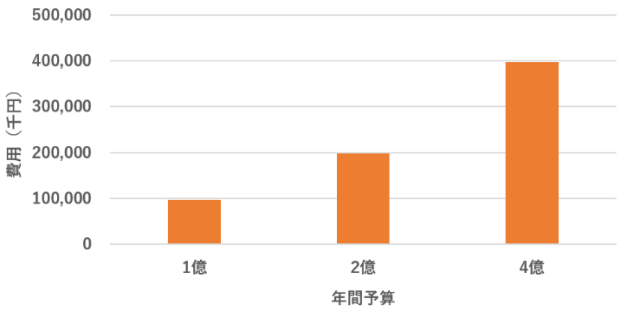
劣化速度の相違は，舗装の状態に直接的に影響を与える．すなわち，補修費用が一定の場合，劣化速度が早ければ舗装状態はより悪化し，劣化速度が遅ければ舗装状態はより健全になる．この傾向がプログラム上の条件設定で再現されるか否かを確認した．年間予算の制約を 2 億円に固定した上で，劣化速度を「遅い（0.5 倍）」「標準（1 倍）」「速い（2 倍）」の 3 パターン設定し，それ以外の条件を同一としてそれぞれシミュレーションを実施した．シミュレーション期間は 50 年間とした．

シミュレーション結果の例として，50 年目における補修費用ならびに舗装状態が悪い区間の割合（ひび割れ率の健全度ランクが 5 の割合）の応答を**図-11** に示す．劣化速度が遅い（0.5 倍）場合，舗装状態が悪い区間の割合が 52.9%である一方，劣化速度が速くなるほどその割合は大きくなり，劣化速度が速い（2 倍）場合は 84.2%となった．これより，本モデルは劣化速度に対して妥当な応答を示すことが確認された．

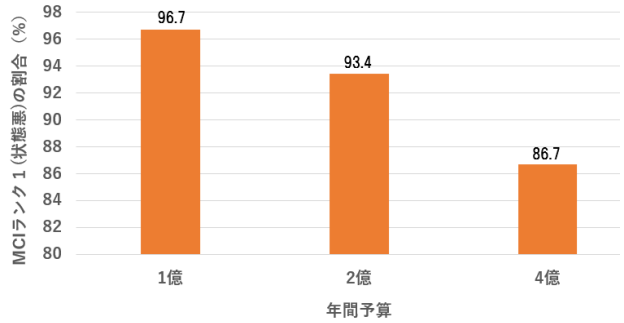
(2) 有料道路モデル

有料道路モデルに対しても自治体モデルと同様，年間予算の制約を 2 億円に固定した上で，劣化速度を「遅い（0.5 倍）」「標準（1 倍）」「速い（2 倍）」の 3 パターン設定し，それ以外の条件を同一としてそれぞれシミュレーションを実施した．シミュレーション期間も自治体と同様 50 年間である．

シミュレーション結果の例として，50 年目における補修費用ならびに舗装状態が悪い区間の割合（MCI ランクが 1 の割合）の応答を**図-12** に示す．劣化速度が遅い（0.5 倍）の場合，舗装状態が悪い区間の割合が 92.0%である一方，劣化速度が速くなるほどその割合は大きくなり，劣化速度が速い（2 倍）場合は 96.9%だった．これより，本モデルは劣化速度に対して妥当な応答を示すことが確認された．

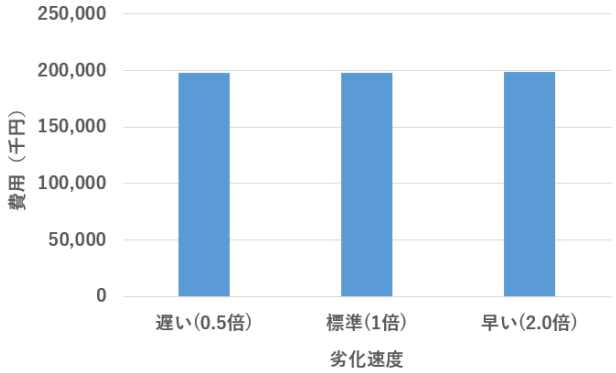


a) 年間予算ごとの補修費用

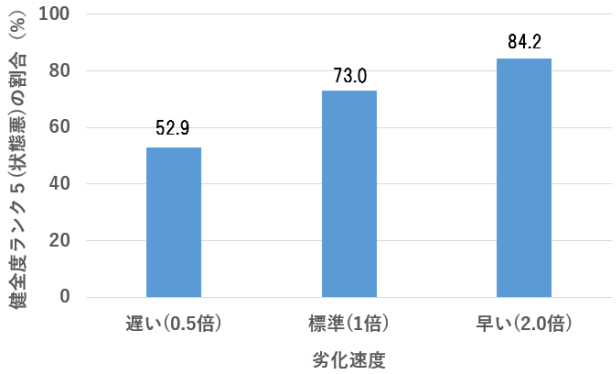


b) 年間予算ごとの状態が悪い区間の割合

図-10 補修予算に対する感度検証結果
（有料道路モデル，50 年目）

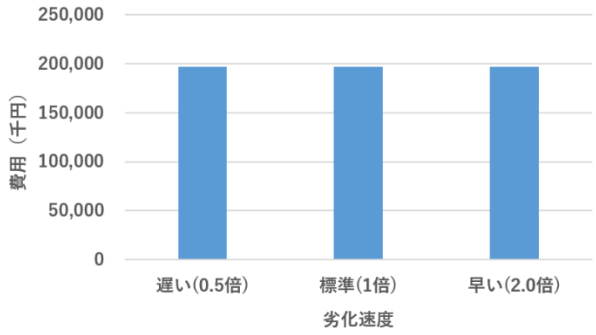


a) 劣化速度ごとの補修費用

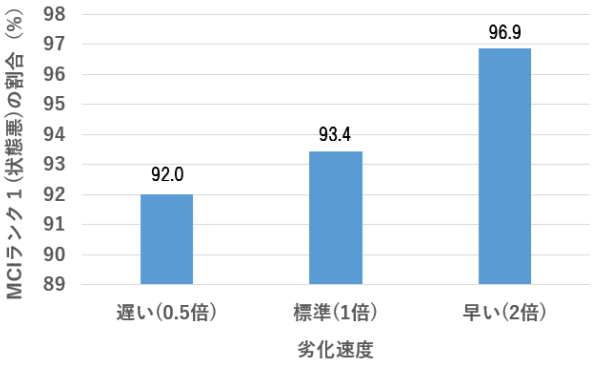


b) 劣化速度ごとの状態が悪い区間の割合

図-11 劣化速度に対する感度検証結果
（自治体モデル，50 年目）



a) 劣化速度ごとの補修費用



b) 劣化速度ごとの状態が悪い区間の割合

図-12　補修予算に対する感度検証結果
（有料道路モデル，50 年目）

5. 本開発技術の拡張性

本研究で構築した舗装修繕計画シミュレーションプログラムは，インフラマネジメントの高度化に資する極めて高い拡張性を有している．その特徴の一つに，将来の劣化過程や事業環境に伴う不確実性を確率論的に記述し，インフラ管理に内在するリスクの定量的評価を可能としている点にある．これにより，多様なシナリオや仮説に対して，将来起こりうる状態推移やリスク顕在化のプロセスをシミュレーションすることができる．こうした特性は，特に官民連携事業の制度設計において有用である．客観的な予測結果を用いることで，官民の適切なリスク分担に基づく契約形態の検討が可能となる．さらには，民間委託に伴う新技術の導入やマネジメント手法の変化が，長期的なインフラ管理に及ぼす効果を事前評価するための予測モデルとしての活用も期待される．

さらには，本開発技術は，インフラ運営における意思決定の完全な自動化や業務の効率化を目指しているものではなく，意思決定者や技術者が現場経験から培ったノウハウや暗黙知を仮説としてモデルに組み込み，その結果を確率的な信頼度とともに提示する意思決定支援ツールとして考えることができる．シミュレーションモデルにより出力された結果は絶対的な解ではなく，インフラ管理の専門家等によって解釈，検証されることにより，現場の意思決定に適用される．このように，現場の経験知と数理モデルを融合させることで，インフラ管理における意思決定プロセスを高度化させるとともに，契約スキームを含めた事業体系のあり方を検討するための情報提供ツールとして，本技術は幅広い領域への展開が期待される．

6. まとめ

本研究では，道路舗装を対象とした劣化予測に基づく修繕計画シミュレーションプログラムを開発し，汎用的な活用を想定した自治体モデルと，実務で用いられている評価指標や意思決定フローを反映した有料道路モデルの 2 種類を構築した．また，補修予算および劣化速度を変化させた条件下でシミュレーションを実施することによる感度検証を実施した．その結果，予算の増加に伴い舗装状態が改善し，劣化速度の増加に伴い舗装状態が悪化するという理論的に妥当な傾向が確認された．

今後は，実データを用いたさらなる検証を進めるとともに，交通量変動や災害影響などの外的要因の導入，他のインフラ分野への適用拡大の検討を進める予定である．本プログラムが，インフラ管理者による予算計画の立案，サービスレベルの設定，補修戦略の比較検討を支援し，持続可能なアセットマネジメントの実現に寄与することを期待する．

参考文献

1) 総務省：令和 4 年版 情報通信白書，2022
2) 国土交通省：インフラ長寿命化計画（行動計画），2021
3) 社会資本整備審議会・交通政策審議会 技術分科会 技術部会：総力戦で取り組むべき次世代の「地域インフラ群再生戦略マネジメント」―インフラメンテナンス第 2 フェーズへ―，2022
4) 小林潔司，田村敬一（編著）：実践 インフラ資産のアセットマネジメントの方法，理工図書，p.104，2015
5) 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
6) 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，pp.336-355，2007
7) 星谷勝：『確率論手法による構造解析』，鹿島出版会，1973