動的計画法を用いた老朽化施設のストックマネジメント技術に関する研究 －下水道管路施設と道路舗装を対象として－

APPLYING DYNAMIC PROGRAMING TO ASSET MANAGEMENT STRATEGIES -SEWERAGE PIPES AND ROAD PAVEMENT

杉本泰亮 *・谷本圭志 **・灘　英樹 ***・細井由彦 **
Yasuaki SUGIMOTO, Keishi TANIMOTO, Hideki NADA and Yoshihiko HOSOI

Recently, it has become of critical importance to manage deteriorating sewerage and road facilities efficiently and strategically. The purpose of the study was to develop a model based on the Markov decision process to derive an optimal group maintenance policy so as to minimize lifecycle cost. The model was then applied in a case study of an area and was demonstrated to successfully estimate lifecycle cost using statistical data such as pipe replacement cost, road pavement rehabilitation cost, and the state of deterioration of pipes and road pavement.

Keywords : *life-extension, dynamic programming, sewerage pipes, road pavements, lifecycle cost maintenance policies*

1.　はじめに

我が国では、道路、空港、港湾、下水道などの膨大な社会資本が蓄積されており、その多くは高度経済成長期に集中的に整備され、今後、更新の時期を迎える。一方で、社会資本を管理・運営する地方自治体の財政状況は厳しく、本格的な少子・高齢化、人口減少時代を迎えるなかで、長期的な投資余力の減少も懸念される。このため、限られた予算の下で効率的かつ効果的な老朽化施設の長寿命化修繕計画を策定することが求められる。

とりわけ、下水道管路と道路舗装施設は、ストックが膨大であり、また交通による荷重や下水道管内の汚濁物質など、他の社会資本施設と比較して、物理的・化学的に厳しい環境に置かれることも多く、急激な劣化を生じる条件が整いやすいことからも、望ましい長寿命化修繕計画を講じる意義が大きい。

そこで本稿では、下水道管路と道路舗装施設を対象に、老朽化した施設に対し「新しく取り替える」、「現状を維持する」など、長寿命化修繕計画を策定するうえでの、具体的な維持管理方策を決定するための評価手法を提案する。

以下では、まずストックマネジメントを実現するための必要なツールの一つである「LCC 最小化」と、従来の評価手法を踏まえた後に、動的計画法を用いた本稿のアプローチを述べる。次いで、動的計画法を用いた評価手法について説明する。さらに、地方自治体における長寿命化修繕計画の策定事業に適用することを想定し、モデルを構築して、数値データを用いたモデル分析を行うことで、本稿の評価手法の妥当性を検証する。

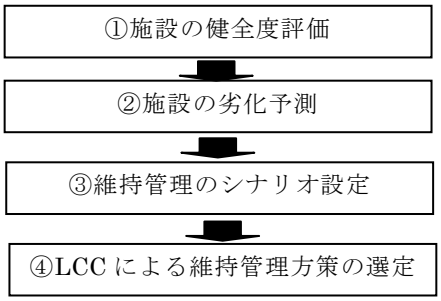
*　技術本部　中央研究所　総合技術開発部
**　鳥取大学大学院　工学研究科
***　鳥取県　境港市役所

2.　アプローチ

(1) LCC 最小化

効率的なストックマネジメントを実施するための有用なツールの一つに、ライフサイクルコスト（以下、LCC）最小化の考え方がある。LCC 最小化の考え方は、下水道長寿命化支援制度や、維持管理指針・マニュアルなど幅広く導入されており、実際の維持管理修繕計画 [1] にも適用されている。

一般的な、LCC 最小化に基づく施設の維持管理方策の検討は、**図－1** の流れで進められる。①から④の具体的な手続きを併せて示す。



図－1　一般的な LCC 評価手法の流れ

① 施設の健全度評価

対象施設の点検・調査を行い、建設年次や老朽化などに係るデータを基に現在の施設の老朽化の程度（健全度）を評価する。

② 施設の劣化予測

健全度や点検・調査データに基づき、今後どのようなスピードで劣化していくかを推定する劣化予測式を作成する。劣化予測式は、ワイブル分布などの統計解析や、後述するマルコフ劣化モデルを適用することで作成される。

③ 維持管理のシナリオ設定

施設の機能保全を目的とした維持管理水準（目標）を設定し、健全度との関係を整理する。さらに、施設の点検間隔、更新間隔などの維持管理方策のシナリオを設定する。

④ LCC による維持管理方策の選定

施設の維持管理水準を担保したうえで、シナリオごとに LCC を評価し、LCC が最も小さいシナリオを選定する。最終的に､そのシナリオに基づく維持管理方策を採用する。

ここで、一般的な LCC 評価手法では LCC は、シナリオで設定された施設の点検間隔や更新間隔の値に影響されるため、シナリオを追加することで、新たに LCC が最小である維持管理方策が見つかる可能性もある。この課題を解決するためより合理的な手法を用いて、維持管理方策を求めることが必要となる。

(2) 動的計画法

近年、社会資本の維持管理は、ストックマネジメントの分野において研究の蓄積がなされている。しかしながら、学術的な研究は、この分野が台頭する以前より、オペレーションズリサーチや信頼性工学の分野で多くの研究がなされてきた[2),3)]。

代表的な研究の一つとして、劣化状態を離散的な状態変数で記述するマルコフ決定モデルがある。マルコフ決定モデルは、これまで自治体等で蓄積された施設の点検履歴を反映させることが可能であり、ストックマネジメント分野においても､施設の劣化予測に導入されてきた経緯があり、これまで多くの研究蓄積[4),5),6)]がある。

ここで、劣化予測を求めた施設に対し、「どの」劣化状態にある施設に対して、「いつ」点検や更新を講じるべきかといった維持管理方策は､膨大な組み合わせが考えられ、LCC が最小となる最適な維持管理方策を決定することは難しい。

この課題に対して、動的計画法（dynamic programming）を取り入れたモデルが提案されている[2)]。動的計画法は、カーナビゲーションの経路検索システムなど、主に情報システム分野で活用が進んでいる、一方、長寿命化修繕計画策定に関するストックマネジメント技術として検討された事例は見つかっていない。

そこで本稿では、下水道管路施設と道路舗装施設を対象に、「どの」劣化状態にある施設を、「いつ」点検や取替え工事をすべきかを具体的に評価するモデルを提案する。

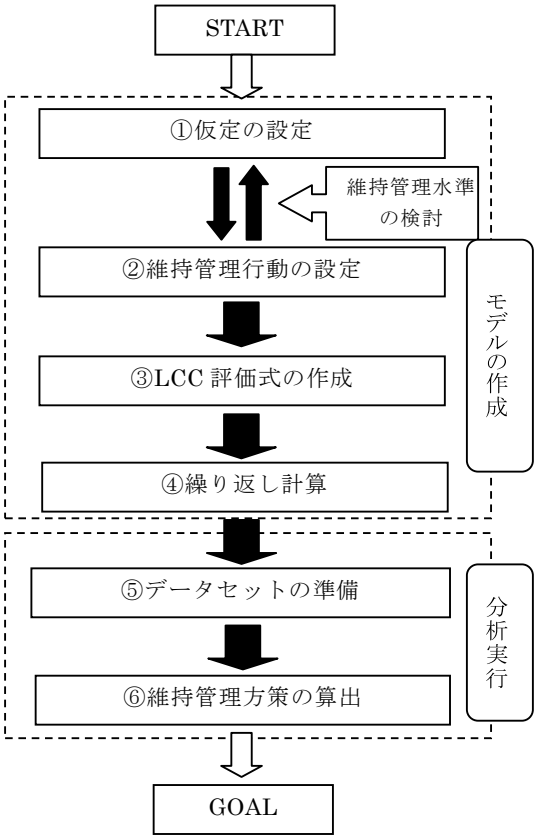
3. 動的計画法を用いた維持管理方策

(1) 対象施設

下水道管路施設（以下　下水道）と、道路舗装施設（以下　道路）を対象とした、動的計画法を用いた評価手法を示す。

(2) 評価の流れ

基本的な評価の流れを**図－2** に示す。大きく、維持管理方策を求めるためのモデル作成の部分と、作成したモデルを用いて、具体的な数値を入力し、分析実行して、維持管理方策を求める 2 つの部分で構成される。



図－2 動的計画法を用いた評価の流れ

(3) モデル

本稿では、下水道と道路施設に着目し、**表－1** に示した 3 つのモデルを取り上げる。MODEL1、MODEL2 は、道路・下水道を個別に評価したモデルであり、MODEL3 は、ある道路下に埋設された下水道と両者の施設を包括的（集

合的）に捉えて評価するものである。各モデルの具体的な内容は次章に示す。なお、ここで取り上げるモデル以外についても、①対象とする施設、②施設の特性、③データの蓄積状況等を踏まえ、モデルの仮定や、LCC 評価式を適時変更することで、モデルを発展させることは可能である。

表－1　維持管理方策のモデル

モデル	対象施設	考慮する点
MODEL1	道路舗装	・施設の更新有無
MODEL2	下水道管路	・施設の更新有無 ・点検間隔
MODEL3	道路・下水道	・施設の更新有無 ・状態の点検間隔 ・両方の施設更新タイミング

（4）評価方法

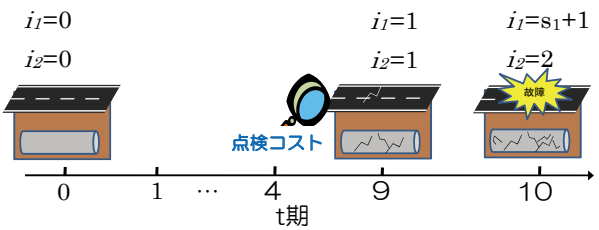
1）仮定の設定

劣化状態

対象施設に対して劣化状態を設定する。例えば道路・下水道の劣化状態をそれぞれ、i_1、i_2 と表すと、劣化状態 i_1、i_2 は $0 < i_1 < s_1 + 1$、$0 < i_2 < s_2 + 1$ を満たす離散的な値とし、数字が大きいほど劣化が進行しているものとする。ここで、$i_1=0$、$i_2=0$ は新品の状態であり、$i_1=s_1+1$、$i_2=s_2+1$ は故障状態とする。また、施設は、1 年や 10 年などの一定間隔（以下、t 期）で観測され、施設の特徴によっては劣化状態の観測に点検コストが必要となる場合もある。

劣化状態について例を**図－3** に示した。図中の $t=0$ 期では、道路・下水道とも劣化状態は 0（新品）であり、t 期の経過と共に劣化状態が進行する。$t=10$ 期において、道路の劣化状態が $i_1= s_1+1$ となり、道路が故障したことを表している。

具体的に本稿では、下水道の故障状態は、道路陥没発生による交通傷害や公衆衛生の低下とし、劣化状態は、管路内の不具合の程度を取り上げる。また、道路の故障状態は、舗装のわだち掘れに対する苦情発生、道路の劣化状態では、舗装のわだち・ひび割れ程度を取り上げる。



図－3　劣化状態の例

劣化状態の推移確率

劣化状態は、t 期の経過によって、確率的に進行するものとする。例えば、今期の下水道の劣化状態が i_2 である時に、次期のそれが j_2 である確率を $p2(i_2, j_2)$ とする。これを劣化状態の推移確率と呼び、劣化状態の推移確率は、マルコフ劣化モデルを利用し、施設の点検調査結果と直近の更新からの経過年数から成るデータを用いることで求められる。

維持管理コスト

劣化状態に対し、維持管理コストを設定する。コストの設定は、過去の点検・更新に関する維持管理実績や積算資料に基づき行う。加えて、劣化状態が「故障状態」で、施設を放置する場合のコストを、無限大と仮定することで、施設の維持管理水準を担保させる。

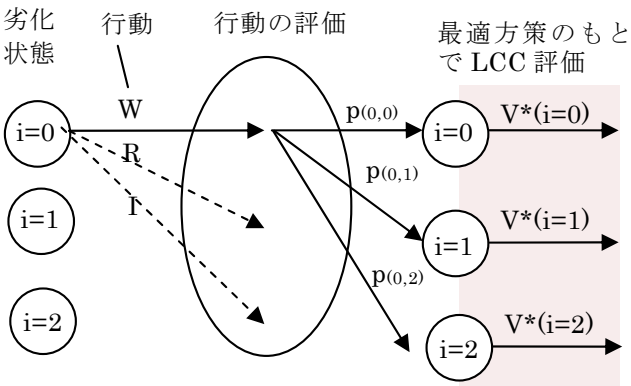
2）維持管理行動の設定

維持管理方策の意思決定は、ある 1 人の評価者（分析者）によって行われるとする。分析者は、例えば「今期における施設の劣化状態」や「前回点検したときの劣化状態とその経過時間」の情報に基づき、今期は「何もしない」、「点検する」、「施設を更新する（新しく取り替える）」といった維持管理行動を決定する。なお、「施設を更新する」行動をとった場合、次期において、その施設の劣化状態は、確定的に劣化状態 0（新品）になるとする。

ここで、維持管理行動や、前節の「モデルの仮定」は、施設の維持管理水準を考慮して設定する。例えば、道路舗装設の場合、「路面のひび割れ程度」による快適性・安全性を踏まえ、劣化状態等の定義に反映させる。

3）LCC 評価式の作成

劣化状態が進行していない状態で、「施設を更新」し続ける場合は、施設の LCC は高くなり、逆に劣化状態が進行しているにもかかわらず「更新しない」場合は、施設が故障して結果的に維持管理費用が増加し、LCC が高くなることになる。このトレードオフを考慮するために、維持管理行動のそれぞれに対して、LCC 評価式を算定し、動的計画法の基本的な考え方である「最適性の原理」を用いる。「最適性の原理」について、基本的な考え方を**図－4** に示す。



※以後、最適な維持管理方策を行う

図－4　最適性の原理

図中について、ある施設の劣化状態に対して、維持管理行動を決定する。その行動について評価し、以降は確率的に次の劣化状態に推移していく。ここで、遷移後の未来の維持管理行動は、未来永劫、最適な維持管理方策で実施されていくと仮定し、現在の劣化状態 i であるとき、その後最適な維持管理方策をとった時の総期待割引コストを $V(i)$ とすると、維持管理行動に対する LCC 評価式は、現在の行動に対する評価値と行動後の $V(i)$ の加算値で算定できる。具体的な LCC 評価式の算定については、次章に示す。

4）繰り返し計算

モデルを閉じる条件として、最終的には、式(1)を満たす問題を解く。

$$V(i) = \min\ [\text{各維持管理行動の評価値}] \qquad (1)$$
$$i=0,1,2\cdots s,s+1$$

この式を解く方法は、逐次近似法による繰り返し計算によって求められる。具体的には、初期値として、適当な $V(i)^0$ を与えて、$V(i)^{n+1} - V(i)^n$ が、十分小さい値になるまで繰り返し計算で求めることができる。

5）データセットの準備

作成したモデルを実行するためのデータセットを準備する。①劣化状態、②劣化状態の推移確率、③維持管理コストに対して具体的なデータを準備する。実務への適用を踏まえ、利用可能なデータの例を**表－2** に示す。

集合的維持管理（MODEL3）では、「ある道路下には、この属性を持つ下水道が埋設されている」といった、施設の位置情報が必要となる。近年、GIS を用いた管理システムの導入が進められており、このメリットを活かし、施設の位置情報を整理することで、MODEL3 の実務への適用も期待できる。

表－2 適用可能な入力データの例

	道路の維持管理（MODEL1）	下水道の維持管理（MODEL2）	集合的維持管理（MODEL3）
劣化状態	・路面に生じる変状	・管路の不具合状態	・路面の変状 ・管路の不具合状態
劣化状態の推移確率	・道路台帳（経過年数） ・道路目視、映像撮影結果	・下水道台帳（経過年数） ・下水道管内調査データ	・位置情報をもったMODEL1と2の情報
維持管理コスト	・維持管理費用の実績値 ・舗装の打ちかえ工事単価	・日常の管理費用 ・管路の取替え工事単価 ・管路内の調査点検費用	・MODEL1と2の情報 ・一度に補修することで縮減できるコスト
参考資料	・道路維持修繕要綱（日本道路協会） ・舗装設計施工指針（日本道路協会）	・下水道維持管理指針（日本下水道協会） 下水道管路施設の緊急点検実施マニュアル（案）	

6）維持管理方策の算出

以上の手続きを踏まえて、維持管理方策を算出する。具体的な計算エンジンは、Excel 等の表計算ソフトを用いることで算出できる。

4. 数値実験

3 章で取り上げた動的計画法を用いた LCC 評価手法における 3 つのモデル（MODEL1、MODEL2、MODEL3）について、その妥当性および有効性を検証するため、仮想的に老朽化した施設の長寿命化修繕計画策定に関する事業を想定し、具体的な数値等を用いて試算した。

（1）道路舗装を対象とした維持管理モデル（MODEL1）

1）仮定の設定

モデルの仮定の設定を以下に示す。

・道路延長が 20m、幅員 8m の道路舗装を対象とする。
・道路の劣化状態は、路面のひび割れの程度とする。
・道路の劣化状態を観測する間隔（t 期）は 5 年とする。
・劣化状態の観測にはコストが必要ないとする。

2）維持管理行動の設定

分析者は、「今期における道路の劣化状態」の情報に基づいて LCC が最小となるように次の 2 つの維持管理行動のいずれかを選択するとした。

W：何もしない
R_1：道路舗装を更新する

3）LCC 評価式の作成

各行動（W: 何もしない、R_1：道路舗装を更新する）に対する LCC 評価式を式（2）、（3）に示した。

$$W(i_1) = l_1(i_1) + \beta \sum_{j=i}^{s_1+1} p_1(i_1, j_1) V(j_1) \qquad (2)$$

$$R_1(i_1) = c_1(i_1) + \beta V(0) \qquad (3)$$

ここで、道路の劣化状態が i_1 である時、道路を補修しないコスト（維持コスト）を $l_1(i_1)$、道路の劣化状態が i_1 である時、道路を更新する場合の工事費用（更新コスト）を $c_1(i_1)$、現在劣化状態が i_1 であり、次期に劣化状態 j_1 になる確率を $p_1(i_1, j_1)$ とする。また、β は 1 期あたりの割引因子 β（$0< \beta \leqq 1$）を表す。今期の道路の劣化状態が i_1 であるときに、将来無限遠まで最適な選択をとり続けた場合の LCC を $V(i_1)$ と表す。

4) 繰り返し計算

分析者はLCCが最小となる行動を選択することから、式(4)が成立する。$V(i_1)$に適当な数値を与えて、逐次近似法による繰り返し計算によりLCCの最小値及び、その時の維持管理方策を算出できる。

$$V(i_1) = \min[R_1(i_1),\ W(i_1)] \qquad (4)$$

5) データセットの準備

① 劣化状態

劣化状態は、「道路維持修繕要領」等を参考に、舗装のひび割れの程度に応じて設定する。ここでは、ひび割れがないものや軽微なものを劣化状態(i_1=0)、損傷が激しく再構築と判断されたものを故障状態である劣化状態(i_1=3)とする。

② 劣化状態の推移確率

既往研究[8]を参考として、ある小規模自治体における布設経過年数と、ひび割れ程度の実績データを整理し、マルコフ劣化モデルを用いて推定した道路舗装の劣化推移確率の結果を**表－3**に示す。

表－3 道路の劣化推移確率

$p_1(i_1,j_1)$	0	1	2	3
0	0.994	0.006	0	0
1	0	0.929	0.071	0
2	0	0	0.920	0.080
3	0	0	0	1

③ 維持管理コスト

劣化状態別の維持管理コストは、舗装打ちかえ工法の単価や、実績等を用いて設定できる。本稿では、ある小規模自治体の実績値を参考に設定した、道路の劣化状態別の更新コストを**表－4**に示す。

ここで、道路を新しく更新する場合は、劣化状態に関係なく、コストが一定とした。一方、「何もしない」選択行動の場合は、劣化状態が進行するほど、維持コストがかかるとした。

ここで、公共サービス水準の確保を考慮するため、劣化状態が故障状態（i_1=3）の場合は、必ず「道路を更新する」行動をとるとして、故障状態における「W：何もしない」場合のコストを十分大きな値に設定することで対応した。

表－4 道路の劣化状態別更新コスト

（万円）

施設	コスト	劣化状態			
		0	1	2	3
道路舗装	何もしない場合の維持コスト	3.0	3.7	6.6	-
	更新する場合のコスト	15.0	15.0	15.0	15.0

※－:計算上は十分大きな値を代入した。

6) 維持管理方策の算出

式(2)、式(3)に入力データの**表－3**、**表－4**を代入し、式(4)による逐次近似法によるアルゴリズムを用いて計算した結果を**表－5**に示す。なお、割引因子βは、0.82とした。

表中において、例えば、分析者が観測した道路の劣化状態が、i_1=1であるとき、「何もしない」行動のほうが「道路を更新する」行動よりもLCCが小さいため、最適な維持管理行動は「W:何もしない」ことを表している。仮に、次期、施設を観測した時、道路の劣化状態が、i_1=2である場合、最適な維持管理方策は、「R_1:道路を更新する」となる。

劣化状態が進行するほど、「道路を更新する」行動が選定されており、合理的な結果が得られたことを確認できた。

表－5 道路舗装の維持管理方策の分析結果

道路舗装の劣化状態	最適な維持管理方策	LCC	
		何もしない W	道路を更新する R_1
0	W	16.7	28.7
1	W	22.3	28.7
2	R_1	30.2	28.7
3	R_1	123.6	28.7

※W:何もしない、R_1:道路を更新する

(2) 下水道管路を対象とした維持管理方策（MODEL2）

1) 仮定の設定

モデルの仮定の設定を以下に示す。

- 管路延長が20m、土被りが2m、口径が200mmである鉄筋コンクリート管路1スパンを対象とする。
- 下水道の劣化状態は管路内の「破損」の程度とする。
- 下水道の劣化状態を観測する間隔（t期）は5年とする。ただし、観測には一定のコスト（点検コスト）がかかり、観測しない場合、劣化状態は不明とする。

2) 維持管理行動の設定

分析者は、「下水道の劣化状態が把握できた直近にその状態が何であり、何期前に把握できたか」の情報に基づいて、LCCが最小となるように以下に示す維持管理行動のいずれかを選択する。

W：何もしない
R_2：下水道を更新する
G：下水道を点検する

3) LCC評価式の作成

各行動（W:何もしない、R_2：下水道を更新する、G：下水道を点検する）に対するLCC評価式を以下に示す。

ここで、下水道が故障状態の場合は、道路陥没等により、劣化状態が確認できる（点検コストが必要ない）ことを考慮するため、LCC評価式は、通常時と故障時の2つに区別した。

【下水道の劣化状態が通常時（$i_2 \neq s_2+1$）】

$$W(i_2/t)=\frac{\sum_{j_2=i_2}^{s_2} p_2(i_2,j_2/t)l_2(j_2)}{\sum_{j_2=i_2}^{s_2} p_2(i_2,j_2/t)} + \beta[\bar{\delta}(i_2/t+1)V(j_1,i_2/t+1)+\delta(i_2/t+1)V(j_1,s_2+1/0)] \quad (5)$$

$$R_2(i_2/t)=\frac{\sum_{j_2=i_2}^{s_2} p_2(i_2,j_2/t)c_2(j_2)}{\sum_{j_2=i_2}^{s_2} p_2(i_2,j_2/t)}+\beta V(0/0) \quad (6)$$

$$G(i_2/t)=I+\frac{\sum_{j_2=i_2}^{s_2} p_2(i_2,j_2/t)V(j_2/0)}{\sum_{j_2=i_2}^{s_2} p_2(i_2,j_2/t)} \quad (7)$$

【下水道の劣化状態が故障時（$i_2 = s_2+1$）】

$$R_2(i_2/t)=c_2(s_2+1)+\beta V(0/0) \quad (8)$$

$$W(i_2/t)=l_2(s_2+1)+\beta V(s_2+1/0) \quad (9)$$

・なお、t 期までに下水道が故障せず、かつ、t+1 期に故障する確率を($i_2|t$+1)とすると、式(10)、また、t+1 期に故障しない確率($i_2|t$+1)を式(11)で表される。

$$\delta(i_2/t+1)=\frac{\sum_{j_2=i_2}^{s_2} p_2(i_2,j_2/t)p_2(j_2,s_2+1)}{\sum_{j_2=i_2}^{s_2} p_2(i_2,j_2/t)} \quad (10)$$

$$\bar{\delta}(i_2/t+1)=1-\delta(i_2/t+1) \quad (11)$$

ここで、下水道の劣化状態が i_2 である時、「何もしない」時のコストを $l_2(i_2)$、下水道の劣化状態が i_2 である時、「下水道を更新」する場合のコストを $c_2(i_2)$、下水道の点検コストを I とする。今期の下水道に関して正確に劣化状態を特定した直近の期が t 期前でかつ、そのときの劣化状態が i_2 であったときの、今期から将来無限遠まで最適な選択をとり続けた場合の LCC を V(i_2/t) とする。下水道を更新した場合、次期の劣化状態は確定的に劣化状態 0 に回復し、更新しなかった場合は次期までに劣化状態が確率的に進行する。

4）繰り返し計算

分析者は LCC が最小となる行動を選択することから、式(9)が成立する $V(i_2)$ に適当な数値を与えて、逐次近似法による繰り返し計算により LCC の最小値をおよびその時に維持管理方策を求める。

$$V(i_2/t) = \min[W(i_2/t), R_1(i_2/t), G(i_2/t)] \quad (12)$$

5）データセットの準備

① 劣化状態

劣化状態は、下水道管路内点検調査データの調査判定基準である「破損」の損傷度合いに応じて設定する。具体的には、破損がないものを劣化状態（i_2=0）、破損が大きく、管路が欠落している状態を劣化状態（i_2=3）とする。

② 劣化状態推移確率

既往研究[8]を参考に、布設経過年数と下水道管路内調査データを整理し、マルコフ劣化モデルを適用することで推定した下水道の劣化推移確率を**表－6** に示す。

表－6 下水道管路の劣化状態推移確率

$p_2(i_2j_2)$	0	1	2	3
0	0.905	0.087	0	0
1	0	0.808	0.185	0
2	0	0	0.916	0.084
3	0	0	0	1

③ 維持管理コスト

劣化状態別の維持管理コストは、開削工法における管路の取替工事費用の実績値や、管路故障時における直接被害額を参考に設定した下水道の劣化状態別更新コストを**表－7** に示す。

ここで、「何もしない」場合、下水道の維持管理コストは無視できるとして、コストは発生しないとする。また、劣化状態が故障状態 (i_2 = 3) の場合は、下水道の更新を行う際、道路陥没事故の発生等も考えられ、故障個所付近の管渠も取り替える必要があると仮定し、通常に管路を更新する場合よりもコストを高く (665 万円) 設定する。

ここで、劣化状態が故障状態 (i_2 = 3) の場合は、公共サービス水準の確保を考慮するため、必ず「R_2：下水道を更新する」行動をとるとして、故障状態における「W：何もしない」場合のコストを十分大きな値に設定することで対応した。

表－7 下水道の劣化状態別更新コスト

（万円）

施設	コスト	劣化状態			
		0	1	2	3
下水道管路	何もしない場合の維持コスト	0.0	0.0	0.0	-
	更新する場合のコスト	130.0	130.0	130.0	665.0
	管路の点検コスト	3.2			

※－：計算上は十分大きな値を代入した。

6) 維持管理方策の算出

式(5) ～式(11)に入力データである**表－6**、**表－7**の値を代入し、式(12)による逐次近似法による繰り返し計算のアルゴリズムを用いて計算した結果を**表－8**に示す。なお、割引因子 β は、0.82 とした。また、評価期間の設定では、下水道が確率 1 で故障状態になる期間、t=100(500 年)までとして計算した。

表－8について、下水道の劣化状態を把握した直近の期からの経過時間が 2 期(t=2)、およびその劣化状態が、i_2=1 であった場合、最適な維持管理方策は「W: 何もしない」を表している。t 期が経過して、t=3 期(15 年後)での、最適な維持管理方策は「G: 下水道を点検する」であることから、下水道の劣化状態が i_2=1 と判明した場合は、15 年に 1 度の間隔で、管路内点検調査を行うことが、LCC 最小化の観点から望ましい分析結果となる。

下水道の劣化状態が進行しているほど、「R_2：下水道を更新する」行動が選定され、また、試験的に点検コストを低く設定した場合、「G：下水道を点検する」行動が多く選定されるなど合理的な結果が得られた。

表－8 下水道の維持管理方策の分析結果

(t=5年)

劣化状態	t(劣化状態を把握した直近の期からの経過時間)					
下水道管路	0	1～2	3～8	9～21	22～99	100
0	W	W	W	G	G	R_2
1	W	W	G	G	R_2	R_2
2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2
3	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2

※W:何もしない、R_2:下水道管路を更新する、G:下水道管路を点検する。

(3) 集合的維持管理方策（MODEL3）

1) モデル紹介

前節で取り上げたモデルは、個別の道路・下水道施設を対象したものである。これら同種の構造物群を対象とした評価手法は、マクロの視点では、LCC が最小となる維持管理方策を実現することに限界がある。例えば、道路舗装の修繕工事を実施したすぐ後に、下水道管路の更新するため、修繕した舗装の掘削工事を行い、再び舗装の敷き直しを実施する事例もある。この問題を解決するためには、それぞれの管理主体がタイミングを合わせて同時に更新するなど、道路と下水道管路を集合的な維持管理方策を講じる必要がある。

近年、集合的維持管理方策を検討した先進的な研究事例がある[7),8)]。ここでは、谷本[7)]のモデルに基づく、道路・下水道を集合的に維持管理を行うための、具体的な維持管理方策を紹介する。

モデルの作成手続き（仮定の設定、維持管理行動の設定、LCC 評価式の作成）は、谷本の考え方に基づいた。

LCC が最小となる維持管理方策の分析結果を**表－9**に示す。なお、分析する際に用いた入力データは**表－3**、**表－4**、**表－6**、**表－7**を用いている。

表－9について、下水道の劣化状態を把握した直近の期からの経過時間が 2 期（t=2）および、その時の道路の劣化状態が i_1=2、把握していた時の下水道の劣化状態が i_2=0 である場合に、LCC が最小となる維持管理方策は「R_1: 道路舗装だけを更新する」であることを表している。

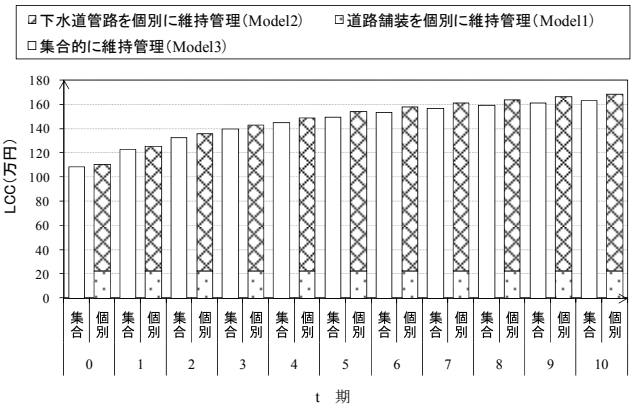
また仮に、把握していた時の下水道の劣化状態が i_2=2 であった場合、表中から「R_{12}：道路と下水道管路を同時に更新する」維持管理方策が選ばれることから、下水道管路と道路舗装両施設の劣化状態が進行している場合は、集合的な維持管理方策を講じるほうが効率的である結果となった。

2) LCC での比較評価

集合的維持管理方策を実施するメリットを定量的に評価するため、道路と下水道を集合的に維持管理した場合と個別に維持管理した場合の LCC を比較した。具体的には道路・下水道の劣化状態が、i_1= 1、i_2= 1 の場合について、各モデルの試算結果である**表－5**、**表－8**、**表－9** の LCC を用いて比較した。

LCC の比較結果を**図－5**に示す。縦軸は LCC（万円）であり、横軸は下水道の劣化状態が把握された t=0 から 10 期を示している。図中の「集合」は、集合的維持管理方策のモデル（MODEL3）で得られた LCC であり、「個別」は、道路・下水道個別で評価したモデル（MODEL1、MODEL2）の LCC の加算値である。

「集合」、「個別」で比較した場合、集合的維持管理方策で得られた LCC が、「個別」で評価した場合の LCC よりも小さくなる結果となった。集合的維持管理方策モデル（MODEL3）は、「個別」の維持管理と比較して、LCC 最小化の観点からより効率的であることが定量的に評価できた。



図－5 集合・個別の LCC の比較(i_1= 1, i_2= 1)

表－9 道路舗装と下水道管路施設の集合的維持管理方策の分析結果

(t=5年)

劣化状態		t 期（劣化状態を把握した直近の期からの経過時間）								
道路舗装	下水道管路	0	1	2	3	4～5	6～18	19	20～99	100
0	0	W	W	W	W	W	G	G	G	R_2
	1	W	W	G	G	G	G	G	G	R_2
	2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2
	3	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2	R_2
1	0	W	W	W	W	W	G	G	G	R_{12}
	1	W	W	G	G	G	G	G	R_{12}	R_{12}
	2	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}
	3	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}
2	0	R_1	R_1	R_1	R_1	G	G	G	G	R_{12}
	1	W	W	G	G	G	G	R_{12}	R_{12}	R_{12}
	2	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}
	3	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}
3	0	R_1	R_1	R_1	R_1	G	G	G	G	R_{12}
	1	R_1	G	G	G	G	G	R_{12}	R_{12}	R_{12}
	2	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}
	3	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}	R_{12}

※W:何もしない、R_1:道路舗装だけを更新する、R_2:下水道管路だけを更新する、R_{12}:道路と下水道管路を同時 に更新する、G:下水道管路を点検する。

5. おわりに

本稿では、道路舗装と下水道管路を対象として、LCC最小化の観点から、動的計画法を用いた維持管理方策を評価する手法を提案し、具体的なモデルを3つ取り上げて、施設の更新や点検を行う維持管理行動を分析した。モデル分析の結果、劣化が進行しているほど、「施設を更新する」選択行動が有意になり、また下水道の劣化状態を把握した時期からの経過年が長いほど、「下水道を点検する」選択行動が有意となり、合理的な結果が得られた。

本稿では、実務への適用を目指して、仮想的な事業体を取り上げ、数値実験により、妥当性のある維持管理方策が得られるか検討を行った。今後は、実際のデータを用いて、実用性のあるモデルに発展させていく。具体的には、モデルの分析結果と、実際にステークホルダーが判断した維持管理方策を比較することで、モデルの実用性を検討する。

また、本稿の提案手法は、大都市の事業体のようなステークホルダーが多く介入し、意思決定過程が複雑になる場面は、適用することが難しい。

一方で、中小規模の事業体では、施設の長寿命化修繕計画に係わるステークホルダーが1人、または数人であることから、本提案手法は、維持管理方策における意思決定支援技術としての有用性が高いと考えられる。

上記の課題点を踏まえ、今後、実用性のあるストックマネジメント技術に発展させていくためには、中小規模の事業体を中心とした積極的な情報公開、研究協力を求めていく必要がある。

参考文献

1) 例えば、青森県県土整備部道路課：青森県橋梁アセットマネジメント基本計画、2007
2) 三根久、河合一：信頼性・保全性の数理、朝倉書店、1982
3) White, D.J.:Markou Decision Process, Wiley, pp.130-146, 1993
4) 貝戸清之、鎌田敏郎、大谷明、山中明彦：下水道コンクリート管渠のストックマネジメント、下水道協会誌 Vol.47. No577, pp78-87, 2010
5) 貝戸清之、熊田一彦、林秀和、小林潔司：階層型指数劣化ハザードモデルによる舗装ひび割れ過程のモデル化、土木学会論文集 F, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007
6) J. Dirsen and F.H.L.R.Clements 2008 Probabilistic modelling of sewer deterioration using inspection data, Water Science & Technology, IWA, 57, pp1635-1641
7) 谷本圭志、杉本泰亮、宮本慎也、灘英樹、細井由彦：道路と下水道管路施設における集合的維持管理手法の検討、土木計画学研究・講演集、Vol43、2011
8) 谷本圭志、杉本泰亮、宮本慎也、灘英樹、細井由彦：集合的維持管理方策に関するモデル分析 - 道路舗装と下水道管路を対象として -、土木学会論文集 G（環境）、Vol.67、No.6（環境システム研究論文集　第39巻）、pp Ⅱ_83- Ⅱ_91、2011