

# 長岡京市での下水道施設のアセットマネジメントを考慮した 管路更新・補修の方法やサイクルに関する基礎的研究

奈良県

白柳 博章\*

摂南大学理工学部都市環境工学科

北村 幸定

## 1. はじめに

近年、水道・下水道・電気・ガス・道路といった社会的共通基盤施設ストックの膨大な蓄積とともにその老朽化の進行が危惧されており、それは、日常の快適な市民生活を脅かしつつある。また、東南海・南海地震や活断層地震による災害や、局地的豪雨による浸水被害等といった自然災害に関するリスクも増大し、更なるリスクが蓄積している。他方、社会的情勢をみると、少子高齢化や人口減少により、利用料金や税収の低迷といった財政状況の逼迫が予想され、今後、日本全体で上下水道合わせて120兆円（下水道80兆円、上水道40兆円）を越えるとされる資産の適正な維持管理・改築更新の確実な実施に向けた事業推進等がこれからの大きな課題となっている。快適な市民生活の維持を図るためには、サービスレベル維持を鑑みつつ、事業体として施設の更新や維持管理の費用を最小化していく議論を進めることが、説明責任を果たす上でも重要となってきている。

アセットマネジメントの既往研究は多数あるが、その中で、宮坂ら<sup>1)</sup>の研究においては、マネジメントシステムを構築するにあたっての枠組みとして、目標と手段の因果関係を明示する「ロジックモデル」と民間ノウハウを活用する「契約型システム」の導入による公共経営（NPM : New Public Management）型マネジメントを構築することが重要であるとともに、その効果的な運用にあたっては、評価計画に基づくマネジメントサイクルを構築・運用することが重要であると主張している。しかしながら、下水道の事業体については、概ね市町村を単位としており、比較的小規模な所が多い。そのようなところでは、長期的な視点から下水道施設の更新や維持管理をどのように進めていくか、また限られた財源の中でどのようなサービスレベルを提供できるか、について定量的な検証を前提とした議論が進めにくく、短期的な視点にとどまりがちである。それゆえに、短期的・長期的な視点から施設の更新や維持管理に関するスキームを確立することは、事業体として施設のアセットマネジメントを実践する上で重要であると考えられる。

そのような状況の中で、2011年9月、国土交通省国土総合研究所より下水道事業へのアセットマネジメント導入支援を目的として、下水道施設維持管理指針（以下、指針）<sup>2)</sup>に準拠した管路劣化データベース（以下、国総研DB）<sup>3)</sup>が公開された。それを活用し、松宮ら<sup>4)</sup>の研究では健全度予測式の推定や改築事業量予測を定量的な観点から行っている。しかし健全度予測式は管種・管径によらず敷設年数のみを説明変数としているため、管種や管径、敷設箇所の違いによる劣化度の違いは表わしていない。また藤生<sup>5)6)</sup>の研究では残存率にワイブル分布を適用することにより、敷設年数と緊急度ごとの延長割合の時系列での変化を定量的に算出している。しかしどのようなレベルで施設の更新を行っていくか、費用や便益の観点から論じるまでには至っていない。

その中でも、貝戸ら<sup>7)</sup>の研究は、コンクリート管渠に着目して、管渠の劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルで記述し、その期待寿命を推計する方法を提案した上で、管渠の目視調査や修繕・改築更新に関する最適改築修繕計画を、リスクを考慮した形で期待ライフサイクル費用の最小化に基づいて決定する方法論を提示し、大阪市の実データへ適用することにより、ストックマネジメントに資する基礎的情報を提供している。しかしながら今回対象とした長岡京市における下水道管路における管種ごとの延長割合は陶管・塩ビ管で84.0%を占め、Co管はわずかに11.2%にすぎず、陶管・塩ビ管の劣化過程を定量的に把握することが重要であると考えられる。

そこで、本研究では、京都府長岡京市における下水道事業を対象として、下水道施設のアセットマネジメント

を考慮した管路更新サイクルや工法提示に関する基礎的研究を行うことを目的とする。具体的には、第2章にて長岡京市における下水道事業の現状と課題を概説する。そして、第3章にて、国総研のデータベースを元に、管・スパンの劣化度に関する定量的な指標を提案した上で、マルコフ連鎖を用いた劣化過程モデルの構築ならびに推定し、その結果をまとめる。第4章では、長岡京市の下水道管路のデータベースに適用することにより、主要幹線・抽出調査枝線における劣化評価を行った上で、第5章にて管路更新・補修の方法やそのサイクルについて考察する。最後に、第6章にて、本研究のまとめを行うとともに、下水道施設においてアセットマネジメントを実践するための課題について整理する。

## 2. 長岡京市における下水道事業の現状と課題

長岡京市は、京都盆地の南西部に位置する面積19.18km<sup>2</sup>、人口約8万人の都市である<sup>8)</sup>。京都市や大阪市の間に位置し、古くからのベッドタウンが広がり、名神高速道路や国道171号沿いに工場が数多く立地している。なお、長岡京市における下水道事業は1974年に開始されており、下水道管渠の総延長は219.695km<sup>9)</sup> (2014年4月1日現在)、下水道普及率は99.6% (2014年4月1日現在)<sup>10)</sup> となっている。長岡京市が管理する下水道管渠全体では、陶管 (TP) が最も多く全体延長の43.1%を占めており、次に塩ビ管 (VP) の40.9%、Co管 (HP等) の11.2%の順となっている。また主要幹線は23.8km (全体延長の10.9%) を占め、その内訳はCo管 (HP等) の72.3%、塩ビ管 (VP) の20.4%となっている。また、長岡京市から排出される下水(汚水)の処理は、京都府が管理する桂川右岸流域下水道事業の洛西処理場が担当しているため、市が管理する施設は管路・マンホールやポンプ場である。汚水の処理費については、市から府に対する流域下水道分担金で対応している。

京都・大阪のベッドタウンである当市においては1970～80年代に急激に人口が増加したのに合わせて、下水道普及事業が急ピッチで進められた。また、事業体における収入や費用の状況は、1999年度以降、総収入 (使用料+国庫補助+市債) が総費用 (維持管理費+流域下水道分担金+建設費) を上回り、2000年度以降、使用料が維持運営費 (維持管理費+流域下水分担金) を上回ってはいるが、今後は人口減少と下水処理量の減少に伴う総収入の減少、下水道施設の劣化量の増大に伴う維持管理費の増加が予測され、現状の維持管理方法では急激に下水道施設の劣化が進行し支障なく快適に施設を使用できない状態になる懸念が高まっている。

下水道事業が開始されてから37年が経過しており、今後標準的な耐用年数である50年に到達し、更新を必要とする施設が数多く発生する。さらに下水道普及率がほぼ100%となっていることから、施設に求められるサービスレベルとして、下水道を利用する人々が常時支障なく快適に施設を使用できる状態にすることが要求されている。

どの管路をどの時期にどのように対応するかを定量的に決定する方法として、管路の劣化度が一定水準以上にならないようにするために、一定水準に到達する前に更新等の施策を講じるとともにその水準を量的に定めることが重要となってくる。これは言い換えればインフラのリスク管理における管理水準の設定を定量的に行う必要があることを意味しており、そのために、次章では管路の劣化度を数量的に評価する指標の提案と劣化過程モデルを構築する。

## 3. 管の劣化確率の提案と劣化過程モデルの構築

### 3.1 使用データ

本研究では、国総研DB<sup>2)</sup>を用いて管・スパンの劣化確率の提案を行った上で、マルコフ連鎖に基づく劣化過程モデルの構築と推定を行う。国総研DBには管種 (陶管・Co管・塩ビ管他)、管径、取付管本数、道路種別、歩車道区部、排水種別、土被りといったデータの他、調査項目については、表-1に示すように、

大項目1の構造関連（小項目1～6）と大項目2の水理関連（小項目7～項目10）でそれぞれ指針<sup>3)</sup>に基づくランクで判定がなされている。

本研究にて管の劣化確率推定に用いるデータは、国総研DBのうち小項目すべてについて調査がなされており、かつ項目に不備のないものを抽出した。陶管・Co管・塩ビ管合わせて25,967スパン、511,629本、727,086mである。

### 3.2 管の劣化確率の提案と算出方法

本節では、管の劣化確率の提案を行った上で、その算出方法について述べる。

スパン $s$ に属する管はすべて経過年数 $T$ 、管種 $k$ とし、管の状態が小項目 $n$ について状態 $m$ と評価される確率 $p_{k,n,m,T}$ は、調査データから式(1)のように求める。

$$p_{k,n,m,T} = S_{s,n,m} / TS_s \quad (1)$$

$p_{k,n,m,T}$ : 経過年数 $T$ での管種 $k$ のスパン $s$ において小項目 $n$ の状態が $m$ と判定される確率

$S_{s,n,m}$ : スパン $s$ において小項目 $n$ の状態が $m$ と判定されている管の本数

$TS_s$ : スパン $s$ に属する管の総本数、 $k$ :管種 ( $k = 1$ : 陶管,  $k = 2$ : Co管,  $k = 3$ : 塩ビ管)

$n$ :小項目 (表1に示す:  $n = 1, 2, \dots, 10$ ),  $T$ :布設からの経過年数 ( $T = 0, 1, \dots$ )

$m$ :状態 ( $m = 0$ : 正常,  $m = 1$ : ランクc (軽度),  $m = 2$ : ランクb (中度),  $m = 3$ : ランクa (重度))

管種 $k$ で構成されるスパン $s$ の大項目 $N$ において、小項目 $n$ が1項目でも状態 $m$  ( $m = 1, 2, 3$ ) 以上と判定される劣化確率を $P_{k,N,m,T}$ とすると、本研究で提案する管の劣化確率は、スパンに属する管の総本数に関係なく比較できるよう管1本あたりに相乗平均にて換算することにより、式(2)のように定義する。

$$P_{k,1,m,T} = 1 - \left\{ \prod_{n=1}^6 \left( 1 - \sum_{r=m}^3 p_{k,n,r,T} \right)^{1/TS_s} \right\} \quad P_{k,2,m,T} = 1 - \left\{ \prod_{n=7}^{10} \left( 1 - \sum_{r=m}^3 p_{k,n,r,T} \right)^{1/TS_s} \right\} \quad (2)$$

$N$ :大項目 (表1に示す:  $N = 1$ : 構造関連,  $N = 2$ : 水理関連)

### 3.3 マルコフ連鎖を用いた劣化過程モデルの構築<sup>1)</sup>

管種 $k$ の管路の状態変数を式(3)のようなベクトル $\bar{P}_{k,N,T}$ で表す。

$$\bar{P}_{k,N,T} = \begin{pmatrix} \bar{P}_{k,N,0,T} \\ \bar{P}_{k,N,1,T} \\ \bar{P}_{k,N,2,T} \\ \bar{P}_{k,N,3,T} \end{pmatrix} \quad \bar{P}_{k,N,0} = \begin{pmatrix} \bar{P}_{k,N,0,0} \\ \bar{P}_{k,N,1,0} \\ \bar{P}_{k,N,2,0} \\ \bar{P}_{k,N,3,0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$\bar{P}_{k,N,m,T}$ : 経過年数 $T$ での管種 $k$ の管路において大項目 $N$ の状態が $m$ と判定される劣化確率の推定値  
式(1)の後半部は、布設した時 ( $T = 0$ ) には状態は必ず正常であることを示している。

表-1 視覚調査結果に対する判定基準

大項目N	小項目n(1~10)	管種k(1~3)	管渠内径	ランク(m=1~3)			
				c(軽度) m=1	b(中度) m=2	a(重度) m=3	
構造関連 (N=1)	1)管の腐食	-	-	表面が荒れた状態	骨材露出状態	鉄筋露出状態	
	2)上下方向のたるみ	-	700mm未満	内径の1/2未満	内径の1/2以上	内径以上	
		-	700mm以上 1650mm未満	内径の1/4未満	内径の1/4以上	内径の1/2以上	
		-	1650mm以上	内径の1/8未満	内径の1/8以上	内径の1/4以上	
	3)管の破損	1)陶管(TP)	-	-	軸方向のクラックが管長の1/2未満	欠落もしくは軸方向のクラックが管長の1/2以上	
		2)Co管(HP等) 3)塩ビ管(VP等)	-	-	軸方向のクラックで幅2mm未満	軸方向のクラックで幅2mm以上 欠落もしくは軸方向のクラックで幅5mm以上	
	4)管のクラック	1)陶管(TP)	-	-	-	円周方向のクラックでその長さが円周の2/3未満	円周方向のクラックでその長さが円周の2/3以上
		2)Co管(HP等) 3)塩ビ管(VP等)	-	-	円周方向のクラックで幅2mm未満	円周方向のクラックで幅2mm以上 欠落もしくは円周方向のクラックで幅5mm以上	
		1)陶管(TP)	-	-	ズレが50mm未満	ズレが50mm以上	脱却
	5)管の継手ずれ	2)Co管(HP等) 3)塩ビ管(VP等)	-	-	ズレが70mm未満	ズレが70mm以上	脱却
6)浸入水		-	-	にじんでいる	流れている	噴き出ている	
水理関連 (N=2)	7)取付管の突出	-	-	本管内径の1/10未満	本管内径の1/10以上	本管内径の1/2以上	
	8)油脂の付着	-	-	-	内径の1/2未満閉塞	内径の1/2以上閉塞	
	9)樹木根侵入	-	-	-	内径の1/2未満閉塞	内径の1/2以上閉塞	
	10)モルタル付着	-	-	内径の1割未満	内径の1割以上	内径の3割以上	

出典:「下水道施設維持管理指針-2003年度版-」(日本下水道協会)第3章 管路施設  
表3.2.8 視覚調査結果に対する判定基準の例

次に、経過年数 $T$ から経過年数 $T + \Delta T$ において、大項目 $N$ 、管種 $k$ の管路が状態 $x$ から状態 $y$ へ遷移する確率を $w_{k,N,x,y}$ とする。なお本研究では、実際の管の劣化確率の推移状態から判断して、ランクb（中度）・ランクa（重度）を共にランクa（重度）と安全側で判断することとし、式(4)のように遷移確率行列 $W_{k,N}$ として表記する。

$$W_{k,N} = \begin{pmatrix} w_{k,N,0,0} & w_{k,N,1,0} & w_{k,N,2,0} & w_{k,N,3,0} \\ w_{k,N,0,1} & w_{k,N,1,1} & w_{k,N,2,1} & w_{k,N,3,1} \\ w_{k,N,0,2} & w_{k,N,1,2} & w_{k,N,2,2} & w_{k,N,3,2} \\ w_{k,N,0,3} & w_{k,N,1,3} & w_{k,N,2,3} & w_{k,N,3,3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \alpha_{k,N} & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{k,N} & 1 - \beta_{k,N} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{k,N} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$\alpha_{k,N}$ ,  $\beta_{k,N}$  : 大項目 $N$ 、管種 $k$ の管路の状態が各々 $0 \rightarrow 1$ ,  $1 \rightarrow 3$ に遷移する遷移確率パラメータ

式(5)の後半部は、更新・修繕がない限り、状態が正常方向へ戻ることがないこと、重度と判定されればそれ以降は常に重度と判定され続けることを意味し、 $\alpha_{k,N}$ ,  $\beta_{k,N}$ ともいずれも0から1の間の値となる。また、これらのパラメータは経過年数によらず一定とする。

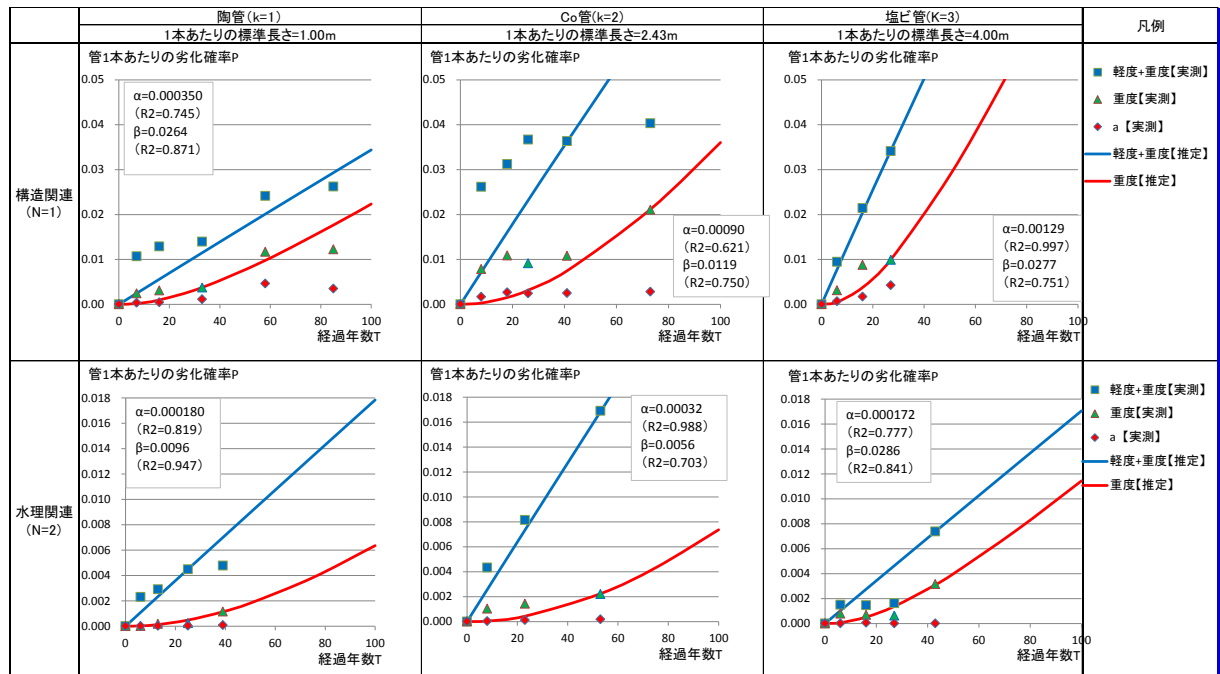
式(3) (4)より式(5)が成立する。

$$\bar{P}_{k,N,T+\Delta T} = W_{k,N} \bar{P}_{k,N,T} \quad (T = 0, \Delta T, \dots) \quad (5)$$

### 3.4 推定方法と結果

$\Delta T = 1$ として管種 $k$ 、大項目 $N$ ごとに式(5)に基づいて推定確率を算出し、管の劣化確率の実績値と推定値の決定係数が最大になるように、かつ推定誤差の絶対値の合計が最小となるように遷移確率パラメータ $\alpha_{k,N}$ ,  $\beta_{k,N}$ を推定した。管の劣化確率の実績値と推定値の散布図と遷移確率パラメータの推定結果を合わせて図-1に示す。

図-1 管の劣化確率の実績値と推定値の散布図と遷移確率パラメータの推定結果



ここで遷移確率パラメータ $\alpha$ はランクが正常から軽度+重度への遷移のしやすさ、 $\beta$ はランクが軽度から重度への遷移のしやすさを表している。すなわち構造関連では、 $\alpha$ が塩ビ管>Co管>陶管の順、 $\beta$ が塩ビ管>陶管>Co管の順となっていることから、1本の長さが長いものほど軽度+重度になりやすく、一旦軽度と判定されると、塩ビ管、陶管が重度に陥りやすいことがわかる。また水理関連では、 $\alpha$ がCo管>陶管>塩ビ管の順、 $\beta$ は塩ビ管>陶管>Co管の順となっているから、内面が比較的平滑でないCo管が軽度+重度になりやすく、一旦軽度と判定されると塩ビ管、陶管が重度に陥りやすいことがわかる。

### 3.5 基準長での劣化確率の提案と算出方法

前節より算出された遷移確率パラメータに基づき、スパンの劣化確率の提案を行った上でその算出方法について述べる。管路*i*での管種を*k<sub>i</sub>*、管種の平均長を*L<sub>k<sub>i</sub></sub>*、敷設年度を*tc<sub>i</sub>*、属するスパンを*s*とする。このとき、評価年度*t* (*t = tc<sub>i</sub>, …*) での管の大項目*N*において、状態*m* (*m = 1,2,3*) 以上と判定される基準スパンでの劣化確率  $\overline{PS}_{s,N,m,t}$  を、式(5)から算出される管1本あたりの劣化確率  $\overline{P}_{k_i,N,r,t-tc_i}$  を用いて、式(6)のように表わす。なお、本研究で提案する基準長での劣化確率は、統一した観点で数値比較を可能とするため、長岡京市での下水道幹線の1スパンあたりの平均延長41.5mを基準長*L\**として換算したものである。

$$\overline{PS}_{s,N,m,t} = 1 - \prod_{i \in S} \left( 1 - \sum_{r=m}^3 \overline{P}_{k_i,N,r,t-tc_i} \right)^{L^*/L_{k_i}} \quad (6)$$

## 4. 長岡京市における管路劣化状況の把握

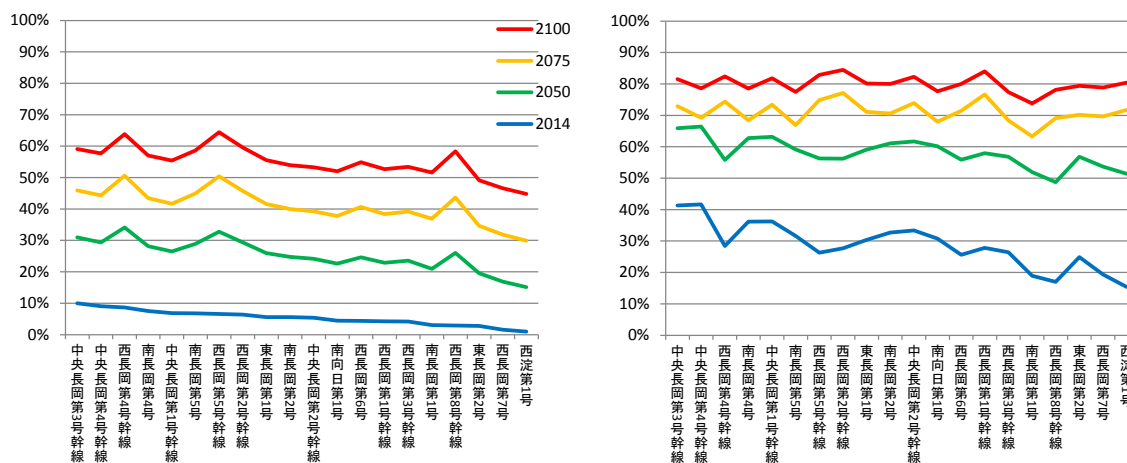
### 4.1 支線での管路劣化状況

長岡京市では有収率（水道使用量+工場水量を下水処理水量で除した値）が低い系統について、陶管ならびに塩ビ管の構造・水理状態を把握すべく、支線の一部を抽出して指針<sup>3)</sup>に基づくTVカメラによる目視調査をH23～H25年度にかけて実施している。構造関連の重度もしくは軽度+重度において、式(2)より算出される管の劣化確率が式(5)より推定される値よりも大きいスパンを劣化が進行している管路として、その割合を算出したところ、陶管では14.6% (25/171)、塩ビ管は25.0% (6/24) となった。 -

### 4.2 幹線での管路劣化状況

幹線については、長岡京市の下水道管路のデータベースを元に式(6)で算出される劣化確率を適用することにより、更新・補修を行わない場合の劣化確率の推移（2014,2050,2075,2100年度）を図-3に示す。

図-3 主要幹線の管路劣化状況(更新・補修を行わない場合)



幹線において、重度と判定されるスパンの劣化確率は、2014年度では最大でも10%であるが、2050年度には概ね20～30%、2100年度には概ね50%を超え、更新・補修を行わない場合には急激に劣化確率が增大する。また軽度+重度と判定されるスパンの劣化確率は2014年度でも概ね30%前後の数値となっている。

支線ならびに幹線の劣化状況から、現時点での長岡京市の下水道管路全体の劣化状態は、軽度から重度へ急激に移行している途中であると想定され、早急に計画的な更新・補修を立案し、それを着実に実行する段階であると考えられる。

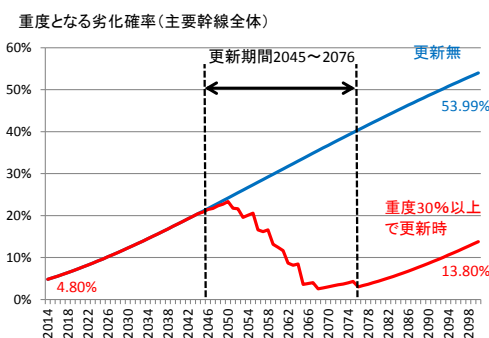
## 5. 更新・補修のサイクルや工法に関する検討

長岡京市の幹線を対象として、構造関連で重度となる劣化確率が30%を超えるまでに、更新・補修を行うものとしたときの更新サイクルについて検討を行った。図-4は更新無と有のときに幹線全体で重度となる劣化確率の推移を表したものである。更新時期は2045～2076年度で、この間に幹線をすべて更新した場合には、2100年における劣化確率は13.8%となり、更新しない場合の54.0%と比べて40.2%もの低減が図られる。また、管種ごとの更新サイクルは陶管で54年、Co管で72年、塩ビ管で56年となった。幹線

の場合は、一度問題が発生するとその影響が大きいため、管理水準を定めた上で更新・補修計画を立案することが望ましいと考える。しかしながら支線については、管理延長が長く全線を調査した上で更新・補修するには膨大な年数と費用を要するため、有収率の低い系統、過去の管破損や漏水の履歴、住民からの下水管異常に関する通報等を元に、調査や更新・補修箇所を限定し、効果的な更新・補修計画を立案することが望ましいと考える。

さらに、更新・補修工法について、陶管が劣化し更新・補修が必要となった場合には、水理の観点から塩ビ管での更新や管更生での補修が望ましい。また、陶管や塩ビ管の場合は土被りが浅いため、掘削した上での更新や管更生での補修といった工法が考えられるが、下水管の埋設状況（他の占用物件の有無や歩車道区部）により工事費用が大きく変化することを鑑みて工法検討を行う必要がある。Co管の場合には土被りが深いため、推進工法での更新や管更生での補修といった工法が考えられる。

図-4 更新の有無による劣化確率の推移



## 6. まとめと今後の課題

本研究では、統一した観点で数値比較を可能とした劣化確率の提案と劣化過程モデルの構築した上で、構造関連・水理関連の劣化確率を陶管・Co管・塩ビ管それぞれについて推定し有意な結果が得られた。そして、長岡京市における管路劣化状況を定量的に把握した上で、構造関連で重度となる劣化確率30%を基準に更新・補修の方法やサイクルに関する検討を行った結果、幹線をすべて更新した場合には、2100年における劣化確率は13.8%となり、更新しない場合の54.0%と比べて40.2%もの低減が図られることを明らかにした。

今後の課題として、長岡京市の支線・幹線も含めた上で、全体のライフサイクルコストが最小となるような更新・補修方法や更新・補修箇所の優先順位の決定方法、ならびに管理基準の設定に対するさらなる議論を進めた上で、持続可能な下水道の実用的な管理システムの構築を進めていきたい。

### 【参考文献】

- 1) 宮坂典男・岩田雄三，“社会資本における NPM 型マネジメントシステムの構築に関する研究”，『季刊 政策・経営研究』vol.4, 2008 年
- 2) (社)日本下水道協会，『下水道施設維持管理指針-2003 年度版- 第 3 章 管路施設』
- 3) 管渠劣化データベース <http://www.nilim.go.jp/lab/ebg/rekka-db.html>, 国土交通省国土技術政策総合研究所, 2011 年 9 月
- 4) 松宮洋介・吉田敏章・深谷渉・福田康雄，“下水道管渠におけるストックマネジメント導入に関する検討調査”，『国土交通省国土総合研究所平成 22 年度年報』, 国土交通省国土総合研究所下水道研究部下水道研究室
- 5) 藤生和也，“管渠マクロマネジメント解析における諸課題の検討”，『下水道協会誌』vol.50, No.609, 2013 年 7 月
- 6) 藤生和也，“管渠劣化に係る必要年間調査延長の算出及び調査箇所選定のための統計的手法”，『下水道協会誌』vol.50, No.605, 2013 年 3 月
- 7) 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, No.577, 2010 年 11 月
- 8) 長岡京市 HP, <http://www.city.nagaokakyo.kyoto.jp/>,
- 9) 長岡京市, 長岡京市下水道総合監視システム
- 10) 長岡京市, 京都府桂川右岸流域関連長岡京市公共下水道事業計画,
- 11) 土木学会編『新体系土木工学 2 確率・統計解析』第 4 章 確率過程
- 12) 上地進・細井由彦・増田貴則，“水利機能性を考慮した下水道管路の耐震化決定方法”，『下水道協会誌』vol.49, No.599, 2012 年 9 月
- 13) 森正幸・稲員とよの・小泉明・渡辺晴彦・沼田篤男，“水道管路の超長期的な更新投資の経済性評価に関する研究”，『水道協会雑誌』第 79 巻第 7 号 (第 910 号), 2010 年 7 月
- 14) 森正幸・稲員とよの・小泉明・渡辺晴彦・荒井康裕・沼田篤男，“水道管路更新事業の合理的計画方法に関する研究”，『水道協会雑誌』第 80 巻第 7 号 (第 922 号), 2011 年 7 月
- 15) (社)日本下水道協会，『下水道事業における費用効果分析マニュアル(案)』, 2006 年 11 月