

下水道施設の更新・維持計画における優先順位決定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といえる。また、社会的情勢をみると、少子高齢化や人口減少により、より一層の財政状況の逼迫が予想される。それゆえに、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、事業者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、市民へのサービス向上と説明責任を果たす上でも重要となってきている。

しかしながら、下水道の事業者については、概ね市町村を単位としており、比較的小規模なものが多い。このため、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行っていくか、また限られた財源の中で適切なレベルのサービスを提供できるのか、について定量的な検証を前提とした議論があまり進んでおらず、大方は目前の修繕等、短期的な視点にとどまっている。それゆえに、施設の更新や維持管理に関するスキームを確立していくことは、事業者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。

そこで、本研究では、京都府長岡京市における下水道施設を対象として、まず事業全般の状態を把握する。そして、事業者としての下水道施設の更新・維持計画の考え方についてまとめた上で、モデル化を行う。

具体的には、第2章では、長岡京市の下水道施設における概況を述べた上で、運営に対する費用や収入、管路ごとの敷設延長についてまとめる。

第3章では、事業者としての下水道施設の更新・維持計画について、予算制約を考慮した上で社会的総費用が最小となるという考え方を基本に、その概要を記述する。

第4章では、社会的総費用を定量的に把握するための重要なファクターである管路の故障率の定義について記述する。

第5章では、社会的総費用を算出する上での各費用を定式化するとともに、更新時期や更新の対応方法を決定するモデルについて記述する。

最後に、本論文をまとめ、今後の課題について整理する。

2. 現状把握

(1) 概況

長岡京市は、京都盆地の南西部に位置する面積19.18km²、人口約8万人の都市である¹⁾。京都市や大阪市の間に位置し、古くからのベットタウンが広がり、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。

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217.9km²⁾ (2010年4月1日現在)、下水道普及率は96.9% (2008年4月1日現在)³⁾ となっている。

なお、長岡京市から排出される下水(汚水)の処理は、京都府が管理する流域下水道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が基本である。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。

(2) 運営に関する費用

運営に関する費用として、以下の4項目①～④が挙げられる。

① 維持管理費

管路・マンホールの破損やつまりに対する緊急維持業務、
 管路の清掃といった維持管理業務に係る費用である。

② 流域下水道分担金

長岡京市から排出される下水の処理は、京都府が管理する流域下水道の処理場で行っているため、処理場に流れる流量に応じ、市から府に対して支払う分担金である。

③ 建設費

管渠・マンホールやポンプ場を新たに建設するための費用である。

④ 起債償還費

維持管理・分担金・建設の支出に際し、市からの起債を行っているが、その償還に関する費用である。

図-1に年次ごとの運営に関する費用（維持管理費・流域下水道分担金・建設費）の内訳を示す。1995年をピークに建設費は減少しているが、維持管理費や流域下水道分担金はほぼ横ばいか増加傾向にあり、費用に占める割合が年々増加し、大きな負担となっていることがわかる。

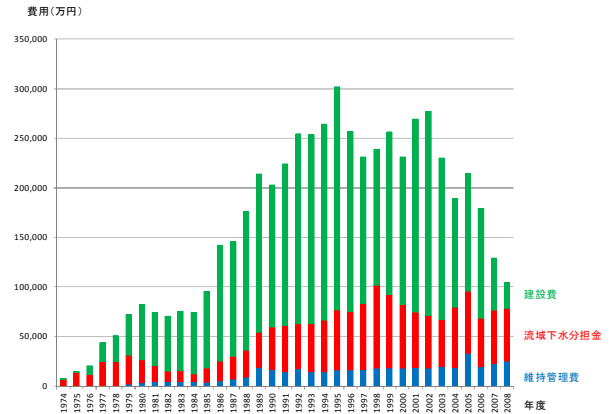


図-1 年次ごとの運営に関する費用内訳

(3) 運営に関する収入

運営に関する収入として、以下の4項目①～④が挙げられる。

① 使用料

工場や住宅からの排水量に応じ、下水道施設の利用料金として徴収する料金である。

② 国庫補助

建設に際し、国から支出される補助金である。

③ 市税

建設や維持管理に際し市から投入される税金である。

④ 起債

維持管理・分担金・建設に際しての市の起債である。

図-2に運営に関する収入A（使用料+国庫補助+市税）・収入B（使用料+国庫補助）と費用（維持管理費+流域下水道分担金+建設費）の推移を示す。

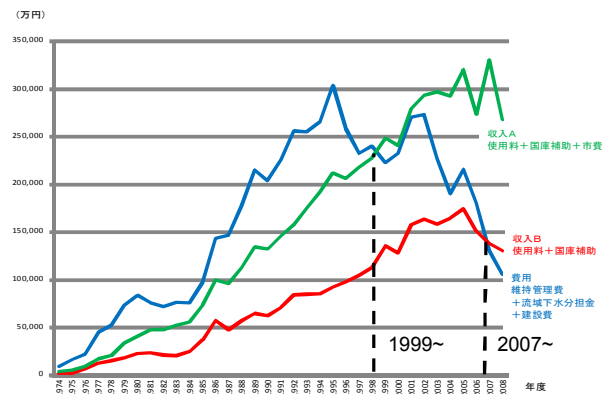


図-2 年次ごとの運営に関する費用・収入

運営については、1999年度以降収入Aが費用を上回る状態に、2007年度以降収入Bが費用を上回る状態となっている。すなわち、現状では、運営に関する収入（使用料+国庫補助）で、費用（維持管理費+流域下水道分担金+建設費）を賄える状態となっている。

(4) 管種と敷設延長

図-3に管種ごとの敷設延長を示す。陶管（TP）が最も多く全体の43.1%を占めており、次に硬質塩化ビニール管（VU），ヒューム管（HP）となっている。

主要幹線ではヒューム管（HP）が主に敷設されており、枝線では陶管（TP）や硬質塩化ビニール管（VU）が主に敷設されている。

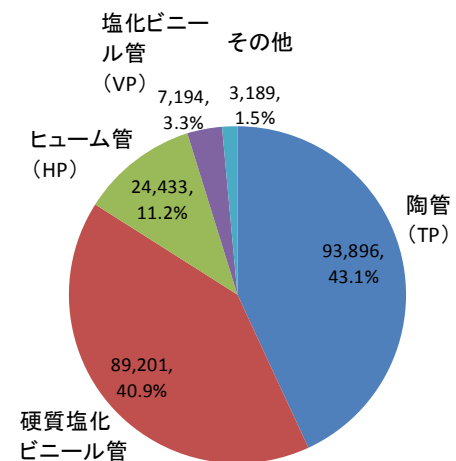


図-3 管種ごとの敷設延長

3. 事業者としての下水道施設の更新・維持計画の考え方

述べたように、長岡京市は汚水処理施設をもたないため、事業者としてアセットマネジメントの対象となる施設は主に管路となる。また、下水道事業が開始されてから37年が経過しており、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今後数多く発生する。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施設を使用できる状態にすることが要求されている。

それゆえに、事業者として管路資産全体を常に健全な形で保有するためには、管路にかかる費用について計画期間内における管路網全体での総額（以下では社会的総費用と記す）を最小にすることが求められている。ここで管路にかかる費用とは、更新費用・管路破損による修繕作業費用・管路破損による被害額・点検調査や清掃等の保守作業費用の合計と定義する。

そして、社会的総費用を最小とするために、管路網のうち、どの管路をどの時期にどのような対応を行っていくかが重要となる。対応方法については、次のケースを想定する。

対応方法0：修繕のみで更新しない

対応方法1：旧施設を撤去せず長寿命化更新する

対応方法2：旧施設を撤去して新設更新する

どの時期に更新するかについては、予算制約を考慮した上で社会的総費用が最小となるように対応する。次に、どの管路をどの時期にどのような対応を行っていくか、を定量的に把握するためには、管路の故障率を設定する必要がある。なぜなら、長期間管路の更新を行わない場合、更新費用は減少するものの、管路の故障率が増加していくために管路破損による修繕作業費用や管路破損による被害額が増加した結果、社会的総費用が増加すると考えられるためである。次章では管路の故障率についてモデル化を行う。

4. 管路の故障確率密度関数のモデル化

管路の故障確率密度関数を $f(t)$ とすると、時期0から時期 t までの間に故障する確率は、累積故障分布関数

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad \dots (1)$$

と表される。したがって、時期 t まで故障しない確率は $1 - F(t)$ であり、時期 t まで正常に動作してきた管路が、引き続き時期 $t + dt$ の時間内に故障する条件付き確率は

$$\frac{f(t)}{1 - F(t)} dt \quad \dots (2)$$

と表される。ここで関数

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad \dots (3)$$

は寿命が時期 t だけ続いた後、次の瞬間に故障が生じる率を表しており、これを管路の故障率⁴⁾と呼ぶ。式(1)を(3)に代入し、境界条件 $F(0) = 0$ を用いると、

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^t h(\tau) d\tau\right\} \quad \dots (4)$$

と表される。そして時期 t における管路の故障確率密度関数 $f(t)$ は

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = h(t) \cdot \exp\left\{-\int_0^t h(\tau) d\tau\right\} \quad \dots (5)$$

と表され、一般的には下記で示すようなワイブル分布に近似される。

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\} = \alpha t^{\beta} \exp\left(-\frac{\alpha}{\beta+1} \cdot t^{\beta+1}\right) \quad \dots (6)$$

$$h(t) = \frac{m}{\eta^m} \cdot t^{m-1} = \alpha t^{\beta} \quad m: \text{形状パラメータ}, \eta: \text{尺度パラメータ}$$

これより、布設時期 S_0 (現時期0より以前とする) の管が時期 s に更新される場合の時期 t における故障率 $h(t)$ は、次式で与えられる⁵⁾⁶⁾。

$$h(t) = \alpha(t - S_0)^{\beta} \quad (S_0 \leq 0 \leq t \leq s) \quad \dots (7)$$

$$h(t) = \alpha'(t - s)^{\beta'} \quad (s < t \leq S)$$

ここで、 S : 計画期間の最終時期, α, β : 更新前の管路の係数, α', β' : 更新後の管路の係数を表す。

式(7)を式(5)に代入し、更新前の管路 i の係数 α_i, β_i , 対応方法 m にて更新後の管路の係数 $\alpha'_{i,m}, \beta'_{i,m}$, 布設時期 S_{0i} を用いて、更新を行わない場合の管路 i の故障確率密度関数 $f_i(t)$ は

$$f_i(t) = \alpha_i(t - S_{0i})^{\beta_i} \exp\left\{-\frac{\alpha_i}{\beta_i+1}(t - S_{0i})^{\beta_i+1}\right\} \quad (0 \leq t \leq S) \quad \dots (8)$$

時期 s に対応方法 m にて更新される場合の管路 i の故障確率密度関数 $g_{i,s,m}(t)$ は

$$g_{i,s,m}(t) = \alpha_i(t - S_{0i})^{\beta_i} \exp\left\{-\frac{\alpha_i}{\beta_i+1}(t - S_{0i})^{\beta_i+1}\right\} \quad (0 \leq t \leq s) \quad \dots (9)$$

$$= \alpha'_{i,m}(t - s)^{\beta'_{i,m}} \exp\left\{-\frac{\alpha_i}{\beta_i+1}(s - S_{0i})^{\beta_i+1} - \frac{\alpha'_{i,m}}{\beta'_{i,m}+1}(t - s)^{\beta'_{i,m}+1}\right\} \quad (s < t \leq S)$$

で与えられる。

次に式(8) (9)を横軸に時期、縦軸に故障確率密度関数を図示したものを、図-4に示す。更新しない場合、故障確率密度関数は時期がたつにつれ増加していくが、更新した場合は更新時期 s において一旦故障確率密度関数が0となり、再び時期がたつにつれ増加していくことがわかる。

5. 更新時期対応決定モデル

管路網を対象として更新を行う際には、予算制約の中で社会的総費用が最小となるように更新時期や対応方法を決定する。以下にその決定モデルを示す。

(1) 前提条件

管路網は I 本の管路から構成されるものとし、管路 i ($i = 1, 2, \dots, I$) について、計画期間内 ($0 \sim S$) において更新するものは多くても1回とする。つまり、管路について、計画期間内に更新しない場合を $\lambda_i = 1$, する場合を $\lambda_i = 0$, また時期 s に対応方法 m ($m = 1, 2$) の更新する場合を $X_{i,s,m} = 1$, 更新しない場合を $X_{i,s,m} = 0$ とすると、次式が成立する。

$$\lambda_i + \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^2 X_{i,s,m} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, I) \quad \dots (10)$$

(2) 更新費用 $TC_{t,1}$

更新費用については、管路の口径や管種、対応方法によって異なり、また更新時期によらないものとする。つまり、管路における対応方法 m での更新費用を $C_{i,m}$ とすると、時期 t における管路網での更新費用 $TC_{t,1}$ は次式のように表される。

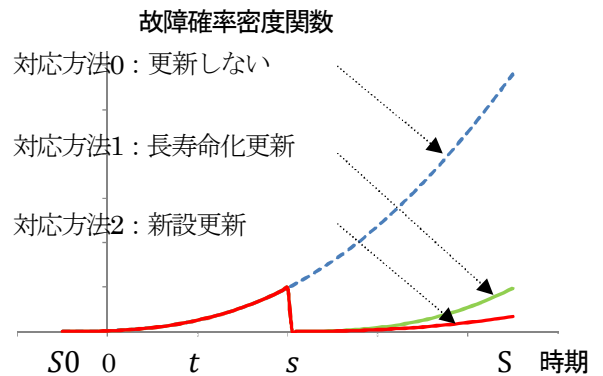


図-4 時期と故障確率密度関数

$$TC_{t,1} = \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^2 C_{i,m} X_{i,t,m} \quad \dots (11)$$

(3) 管路破損による修繕作業費用 $TC_{t,2}$

管路*i*の故障確率密度関数 $A_i(t)$ を、式(8) (9)を用いて以下のように表す。

$$A_i(t) = \lambda_i \cdot f_i(t) + \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^2 X_{i,s,m} \cdot g_{i,s,m}(t) \quad \dots (12)$$

これから、管路*i*の時期*t*における破損1件あたりの単位修理費を $p_{i,t}$ とすると、時期*t*における管路網での管路破損による修繕作業費用 $TC_{t,2}$ は次式のように表されるものとする。

$$TC_{t,2} = \sum_{i=1}^I p_{i,t} \cdot A_i(t) \quad \dots (13)$$

(4) 管路破損による被害額 $TC_{t,3}$

管路*i*が時期*t*に破損した場合、管路の上流に位置する利用者が被害を受けるものとする。1件の破損による利用者一人あたりの被害額を q で表すと、時期*t*における管路破損による被害額 $TC_{t,3}$ は、管路*i*の上流に位置する利用者数 $U_{i,t}$ を用いて次式のように表される。

$$TC_{t,3} = \sum_{i=1}^I q \cdot A_i(t) \cdot U_{i,t} \quad \dots (14)$$

なお、管路*i*の上流に位置する利用者数 $U_{i,t}$ は、管路*i*に接続して利用している人数 $PoP_{i,t}$ と、管同士の間接関係を表す $\delta_{i,j}$ を用いて、次式で算出する。

$$U_{i,t} = \sum_{j=1}^I PoP_{j,t} \cdot \delta_{i,j} \quad \dots (15)$$

ここで、 $\delta_{i,j}$ は管路*j*が管路*i*より上流に位置するとき1、それ以外を0とする

(5) 点検調査や清掃等の保守作業費用 $TC_{t,4}$

点検調査や清掃等の保守作業費用は、管路破損による修繕作業費用に比例するものとし、時期*t*における管路網での保守作業費用 $TC_{t,4}$ を次式で表す。

$$TC_{t,4} = \sum_{i=1}^I k_t \cdot p_{i,t} \cdot A_i(t) \quad \dots (16)$$

(6) 予算制約 Bud_t

利用者から徴収する使用料から流域下水道分担金を引いたものを予算とし、次式のように表すものとする。

$$Bud_t = \sum_{i=1}^I PoP_{i,t} \cdot F_t - Q_t \cdot PR_t \quad \dots (17)$$

ここで、 F_t ：時期*t*における利用者一人当たりの使用料、 Q_t ：時期*t*における流域下水道への流量の合計
 PR_t ：時期*t*における単位流量あたりの処理費用

(7) 更新時期対応決定モデル

目的関数は、計画期間内における社会的総費用が最小となるものとして、次式で表す。

$$\sum_{t=1}^S (TC_{t,1} + TC_{t,2} + TC_{t,3} + TC_{t,4}) \rightarrow \min \quad \dots (18)$$

制約条件は、式(10)ならびに次式に示す予算制約式である。

$$\lambda_i + \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^2 X_{i,s,m} = 1 (i = 1, 2, \dots, I) \quad \dots (10)$$

$$TC_{t,1} + TC_{t,2} + TC_{t,4} \leq Bud_t \quad (t = 1, 2, \dots, S) \quad \dots (19)$$

したがって、本モデルは $I(2S + 1)$ 個の 0, 1 の変数 $X_{i,s,m}, \lambda_i$ に対し、 $I + S$ 個の制約式で解く線形計画問題となる。

6. まとめ

本研究では、下水道施設の適切なアセットマネジメントの必要性を認識し、施設管理や維持更新のスキームを提示すべく、京都府長岡京市の事例を挙げて更新時期対応決定に関する簡便なモデルの構築を行った。

モデルを用いて定量的な評価を行う上で課題となるのは、まず管路の故障率を決定する各種パラメータの設定である。これについては、社会的基盤施設の劣化の実態把握について、地域横断的・時系列的なアプローチが必要となってくると考える。次に、破損 1 件あたりの単位修理費・1 件の破損による利用者一人あたりの被害額等の原単位の設定である。これについては、長岡京市における事業の実態把握やアンケート調査により、値を推定する必要があると考える。

最後に、下水道管の破損は、埋設される道路の交通や安全に影響を及ぼすとともに、流下機能に支障が生じると地域環境の悪化や市民の日常生活の利便性が損なわれることが危惧される。それゆえ、下水道のシステムを長期間維持しつづけるための科学的根拠に基づく実用的なアセットマネジメントモデルの提示を行うことは、地域の方々への説明責任を果たす一つの契機になると考える。今後は、説明変数の精査やデータ精度の向上、モデルの改良等により、アセットマネジメント導入の機運となるような取り組みを進めたい。

【謝辞】

本研究を遂行するにあたり、長岡京市上下水道部の皆様には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- [1]長岡京市 HP, <http://www.city.nagaokakyo.kyoto.jp/>
- [2]長岡京市:長岡京市下水道総合監理システム
- [3]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
- [4]新体系土木工学 2 確率・統計解析 第 4 章 確率過程, 土木学会編
- [5] 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. 07
- [6] 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. 07
- [7]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, 2008 vol14
- [8]国土交通省国土総合研究所下水道研究部下水道研究室: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
- [9] (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. 11
- [10] 小島延連・中根進:ローテーション管理データを用いた管きよの物理的耐用年数の推定, 2010 年度下水道研究発表会 II-5-1-7
- [11] 白柳博章・北村幸定:下水道施設の最適更新・維持計画の策定指針に関する基礎的研究, 一社会的基盤施設における公共経営マネジメントシステムの構築とその運用に向けて一, 第 43 回土木計画学研究発表会(春大会), 2011. 05