Ⅰ－18　下水処理施設のアセットマネジメントシステム

Asset Management System for Sewage Structures

堀倫裕[1]・貝戸清之[2]・小林潔司[3]

Michihiro HORI, Kiyoyuki KAITO and Kiyoshi KOBAYASHI

抄録：本研究は，下水処理施設のトータルコスト最小化を達成する最適な点検・補修政策を決定するためのアセットマネジメントシステムの開発を目的とする．システム構築に際しては，下水処理施設に特有の問題点として，①下水処理施設が直列・並列的に配置された多数のサブ施設で構成された系統的施設であること，②点検・補修を実施するためにはサブ施設の供用を停止しなければならないこと，③サブ施設の停止が下水処理施設全体の停止につながる場合が少なくないこと，を指摘し，各部材に対する点検・補修の同期化を考慮した上で，トータルコスト最小化を実現する最適点検・補修政策の決定に留意した．適用事例においては，開発したアセットマネジメントシステムを用いて，直列的なサブ施設で構成される一般的な水処理系施設を対象としたシミュレーションを実施し，点検・補修の同期化を考慮することにより，トータルコストの低減が可能であることを示した．

Abstract: The purpose of this study is to develop an asset management system for determining the optimum inspection and repair policy to minimize the total costs for sewage systems. The intrinsic problems associated with the development of sewage systems include (1) that a sewage system is constituted by several subsystems arranged in series and in parallel, (2) that the operation of subsystems needs to be suspended, when inspected or repaired, and (3) that the suspension of subsystem operation sometimes leads to the interruption of the entire sewage system. The authors further extend the optimum inspection and repair policy to minimize the total costs by incorporating the synchronization of inspection and repair timings of each member. Using the developed asset management system, the authors conducted a simulation targeting general facilities for water treatment, which constitute a serial subsystem, and then suggested that it is possible to reduce the total costs, by synchronizing inspection and repair timings.

キーワード： 下水処理施設，アセットマネジメントシステム，点検・補修政策，同期化

Keywords : sewage structures, asset management system, inspection and repair policy, synchronization

1. はじめに

下水処理施設のアセットマネジメントにおいては，点検･補修に要するライフサイクルコストとリスク（損傷発生時の損失費用）の総和として定義されるトータルコストの最小化を達成する点検・補修政策を決定することが重要な課題である．

アセットマネジメントはこれまで様々な土木構造物への適用がなされ，システム化が図られてきた[1)-3)]．これらの土木構造物と比較したときに，下水処理施設に特有の問題点として，①下水処理施設が直列・並列的に配置された多数のサブ施設で構成された系統的施設であること，②点検・補修を実施するためにはサブ施設の供用を停止しなければならないこと，③サブ施設の停止が下水処理施設全体の停止につながる（リダンダンシーが確保されていない）場合が少なくないこと，があげられる．さらに，サブ施設を構成する部材群は異なる耐久性を有するだけでなく，劣化機構が多様で未解明な現象も多い．したがって，下水処理施設を効率的に運営していくためには，各施設の点検・補修周期の同期化を考慮したトータルコストの最小化を図る必要がある．

本研究では，以上の問題意識の下，下水処理施設のアセットマネジメントシステムを構築する．具体的には，直列的なサブ施設で構成される水処理系施設を対象に，個々のサブ施設の劣化進行をマルコフ過程によって表現する．つぎに，個々のサブ施設の点検・補修周期の同期化を考慮した水処理系施設全体の点検・補修計画の立案方法を提案する．さらに，標準的な水処理系施設全体を対象としたケーススタディを実施して，

1 ：正会員 工修 大成建設株式会社 原子力本部 原燃サイクル部
（〒163-0606 新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル，E-mail: hori@ce.taisei.co.jp）
2 ：正会員 博（工）大阪大学特任講師 大学院工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点
（〒565-0871 吹田市山田丘 2-1，E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp）
3 ：フェロー会員 工博 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: kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp）

同期化政策の有用性を考察する．なお，本研究では，シミュレーションに基づきトータルコストの最小化を検討する手法（リスクを考慮したライフサイクル評価手法（以下，「LCC/RM 評価手法」と記す））をベースとするが， LCC/RM 評価手法の方法論の詳細については，堀らの研究 [4]を参照されたい．以下，**2.**で本研究の基本的な考え方を述べる．**3.**で下水処理施設のアセットマネジメント手法について述べ，**4.**でアセットマネジメントシステムの概要を説明する．**5.**で直列的なサブ施設で構成される水処理系施設を想定したシミュレーションを実施する．

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 下水道アセットマネジメントの動向

我国の下水道は, 昭和 38 年に始まる第一次下水道整備五箇年計画以降，計画的かつ急ピッチな整備がなされてきた．その結果，1980 年代には 30%台であった下水道処理人口普及率（下水道利用人口／総人口）は，平成 18 年度末時点で 70.5%に達し，管路延長は約 39 万 km，処理場数は約 2,000 箇所にのぼるなど，膨大な社会資本ストックを形成してきた [5]．下水道の分野においても，これまでの社会資本ストックの増大と経年劣化の進行に伴い，近い将来，維持管理費の増大と膨大な更新需要の発生が予測されている．今後，適正な維持管理および更新がなされない場合，排水・処理機能の突然の停止や管渠の破損による道路陥没発生などにより，大きな社会的損失が発生することが懸念される．すでに，管路施設の老朽化等に起因する道路陥没は増加傾向にあり，平成 18 年度の発生件数は約 4,400 箇所にのぼっている状況である．

現状では，多くの下水道事業者は，経営的に極めて厳しい財政状況に置かれており，一般会計からの基準外の費用繰入等により事業運営がなされている．下水道事業債の借入残高も 33 兆円を超え, その元利償還費は下水道管理費の約 7 割を占めるに至っている. 現在, 経営の健全化・効率化へ向けて鋭意努力が重ねられているが，今後，既存ストックの老朽化に伴う維持管理費用・再構築費用の増加，高齢化・人口減少等の影響による使用料収入の減少等も予想される中，さらなる財政状態の悪化が懸念されており，一層の経営基盤の強化が求められているところである．

今後，下水道の適正なサービス水準を維持しつつ，下水道事業の経営状況を改善し，安定的・持続的な事業運営を達成していくためには，維持補修費用・再構築費用の縮減，企業債償還計画の適正化，予算の平準化，下水道料金の適正化にあたって必要となるアカウンタビリティの確保などの実現に寄与する支援ツールの開発が必要になる．このような状況のもと，下水道の分野においても，アセットマネジメント導入への要請が高まりつつある．

以上のような背景を踏まえ，下水道分野におけるアセットマネジメント導入へ向け，すでにいくつかの研究が蓄積されている [6)-8)]．また行政側においても，いくつかの検討が実施されつつある．特に，平成 19 年 3 月には「アセットマネジメント手法導入検討委員会最終報告書」（下水道事業団・アセットマネジメント手法導入検討委員会）[9)]が，また平成 20 年 3 月には「下水道事業におけるストックマネジメントの基本的な考え方（案）」（下水道事業におけるストックマネジメント検討委員会）[10)]が公表され，下水道施設へのアセットマネジメント導入における基本的な考え方・方向性が示された．さらに平成 20 年度には，国土交通省により，下水道施設の長寿命化に寄与する施策にインセンティブを与える「下水道長寿命化支援制度」が創設された [11)]．本制度は，ライフサイクルコストの最小化の観点から，長寿命化計画の策定に要する経費を補助対象とし，当該計画に位置付けられた計画的な改築について補助を行うものである．

しかしながら，下水処理施設のアセットマネジメントに関する研究・検討は，いまだ緒についたばかりであり, 本格的なアセットマネジメントの実現に向けて, 検討すべき多くの課題が存在する．後述するように，下水処理施設のアセットマネジメント問題は，一般土木構造物のそれとは異なる特殊性を有している．下水道アセットマネジメントにおいては，これらの特殊性を考慮したアセットマネジメント戦略の立案手法を構築することが重要である．

(2) 下水処理施設の特殊性

下水処理施設は，複数の構造物や様々な設備・機器等からなる大規模かつ複合的なシステムを構成している．下水処理方式にはいくつかの種類があるが，以下では，最も一般的な処理方式である標準活性汚泥法による下水処理を想定して議論を進める．下水処理施設の一般的な施設構成を**図-1** に示す．下水処理施設を構成するサブ施設は，大きく水処理系と汚泥処理系に大別される．水処理系は，一般に，沈砂池・ポンプ井，分配槽，最初沈殿池，反応タンク，最終沈殿池，塩素混和池で構成される．一方，汚泥処理系は，一般に，汚泥濃縮槽，汚泥消化槽，濃縮汚泥貯留槽，余剰汚泥貯留槽，返流水槽で構成される．

図-1 から理解できるように, 下水処理施設は, 直列・並列に配置された複数のサブ施設群からなる複合的なシステム構成をしている．大規模な下水処理施設は，最初沈殿池から最終沈殿池までの水処理系列を複数有しており，処理能力に余裕がある場合には，処理水量が少ない渇水期等に，系列を切替えながら点検・補修

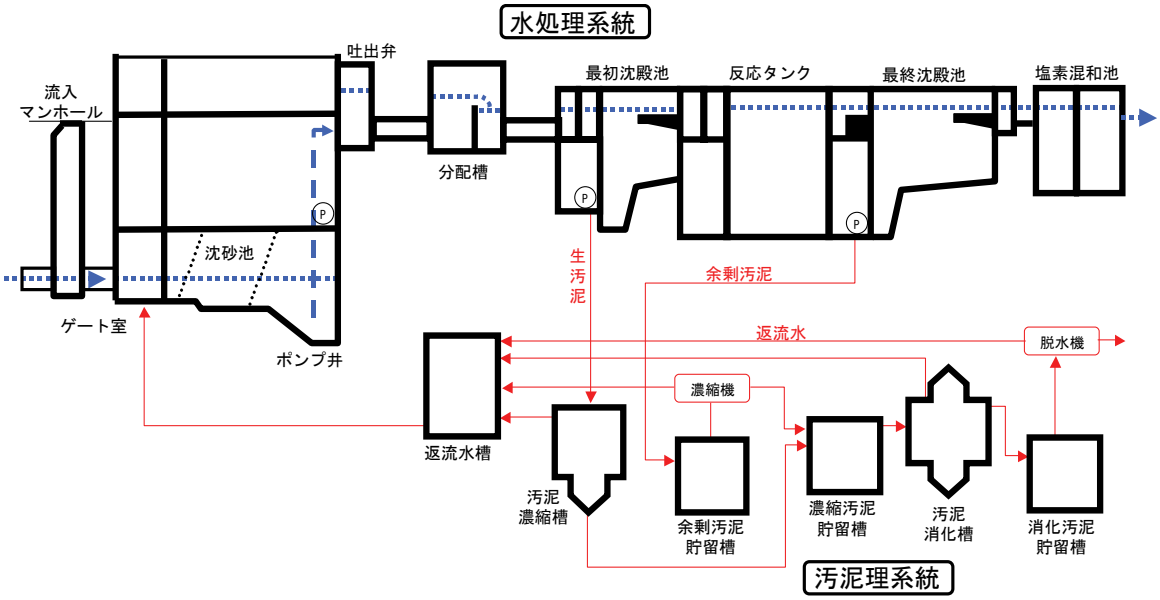

図-1 下水処理施設の標準的な施設構成

を行うことも可能である．しかしながら，処理能力に余裕がない（充分なリダンダンシーが確保されていない）場合，特に 1 系統の浄化施設しか有していない小規模な下水処理施設においては，水処理系の稼動停止および排水が不可能であるために，点検・補修の実施は極めて困難である．

特に，直列的なサブ施設で構成される下水処理施設では，故障や点検・補修等で一部のサブ施設機能が停止すると，系列全体が停止することになる．例えば，最初沈殿池から最終沈殿池までの施設群は，直列的に配置された水処理系のサブ施設を構成している．この中の一部の施設の点検・補修を実施するためには槽内の処理水の排水が必要であり，点検・補修を実施する間，当該系列全体の稼動を停止する必要がある．さらに，個々の施設の劣化進行速度は大きく異なるので，無計画な事後的補修を繰り返せば，その度にサブ施設が停止し，処理能力上の大きな損失となる可能性がある．したがって，下水処理施設においては，傾向の異なる各々の施設の劣化を予測した上で，計画的に点検・補修を行うことが必要である．

下水処理施設のアセットマネジメントにおける計画的な点検・補修戦略の立案にあたっては，次の 2 点が重要である．まず，下水処理施設を構成する土木構造物に関する当該時点の健全度の把握，および劣化過程のモデル化のための点検データの蓄積が必要である．しかしながら，下水処理施設は年中無休で 24 時間稼動しており，槽内には常に処理水が存在する．また硫化水素等の臭気の拡散を防ぐために覆蓋を有する施設も多い．このため，点検を行うためには，当該構造物が含まれるサブ施設全体の稼動を停止しなくてはならない．このような事情により，下水処理施設の点検データの取得は極めて困難であり，既存のデータもほとんど蓄積されていない．したがって，現時点で利用可能な限られた情報である損傷タイプ別の工事数量等といった集計情報を有効に活用できる劣化過程のモデル化手法と，これに基づく最適点検・補修戦略の立案手法を構築することが必要である．また，点検・補修戦略の立案にあたっては，劣化傾向の異なる個々の施設の点検・補修の時期を可能な限り同期化して，処理能力の損失を最小限にとどめるよう配慮することが重要である．このうち，前者の問題については，すでに著者ら [7]によって検討がなされている．したがって，本研究においては後者の問題に焦点を当てる．

3. アセットマネジメント手法

(1) 方法論の概要

本研究で提案するシミュレーション手法は，堀らが様々な土木構造物の点検・補修戦略の検討に用いている方法論 [4]に基づき，下水処理施設が有する特殊性を加味して再構築したものである．以下では，まず本研究で用いた手法の基礎となる方法論の概要を簡潔に述べ，次節以降では下水処理施設の独自性や特殊性を考慮した条件設定について説明する．なお，条件設定については，読者の理解を高めるために **5.**の適用事例をとりあげ具体的な数値を用いて説明する．

施設の状態遷移は，「時間の進行に伴い，ばらつきをもって劣化が進展し，定期点検のたびに状態が確認され，また補修によってその状態が改善される」といった一連のプロセスで表現することができる．本方法論は，はじめに，マルコフ過程をベースに，施設の劣化の進展や点検・補修政策を数理モデルで表現し，施

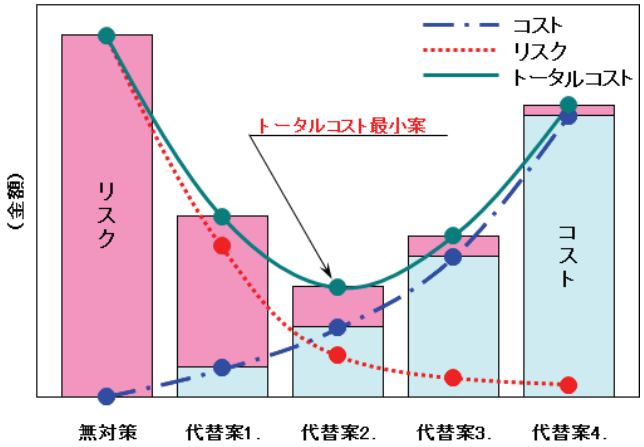

図-2 トータルコストの概念図

設の将来の状態推移をシミュレートする．さらに，その過程で発生するリスクを含めたトータルコストを算出する．これらの一連の解析を，点検・補修政策の代替案ごとに実施し，トータルコストの最小化を実現する政策を最適点検・補修政策として採用する．

本方法論は時系列的なシミュレーションを基本としたものであり，施設の劣化過程や点検・補修政策の組合せを変えることにより，実際に行われている管理の実態に即した点検・補修政策代替案の比較評価を，柔軟かつ簡便に実施することができる．また，健全度分布，ライフサイクルコスト・リスク等についての時系列情報に基づいて，代替案の比較評価も実施可能であり，実務者の理解が容易なものとなっている．なお，本研究ではトータルコストを，**図-2** に示すように，点検･補修等に要するコストと費用換算されたリスク（年間期待損失）との総和により定義する．同図から明らかなように，コストとリスクはトレードオフの関係にある．トータルコストを指標とした代替案比較を行うことにより，コストとリスクとのトレードオフ関係を考慮した最適点検・補修政策の選択が可能となる．ただし，実際の下水処理施設のように多様なサブ施設で構成される施設を対象とする場合には，それぞれの施設において想定される劣化形態を個々に考慮した上で，施設全体としてのトータルコストを算定する必要が生じる．**図-3** に施設全体のトータルコスト算定の考え方を示す．ここに示されるように，施設全体に要するトータルコストを算定するためには，状態の遷移パターンが異なり，したがって点検・補修間隔などが異なる各施設に対して発生するトータルコストを個々に計算し，すべての結果を集計化する必要がある．そこで，本研究では，このような劣化形態がそれぞれ異なる複数施設群を対象とした LCC/RM 評価システムを構築することとした．

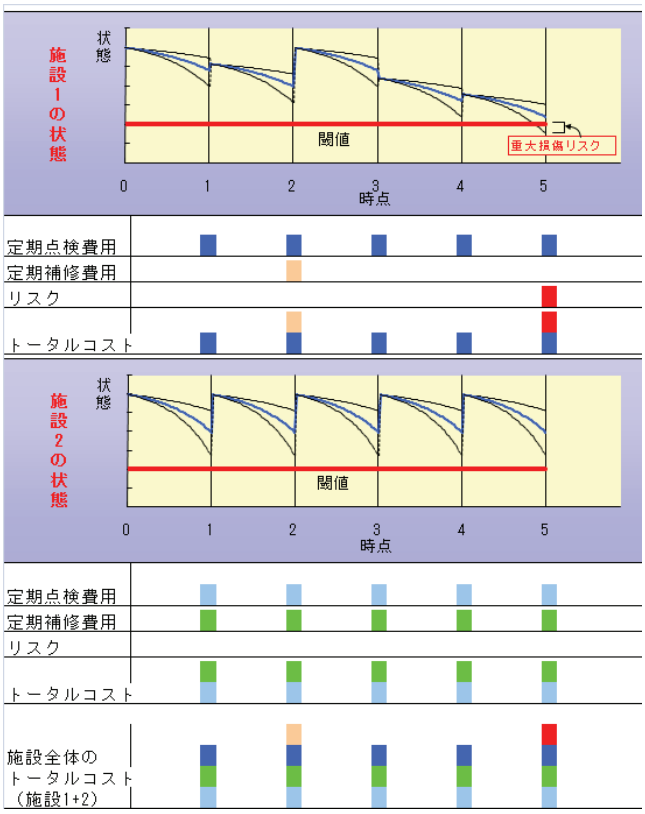

図-3 複数のサブ施設で構成される
施設全体のトータルコストの考え方

(2) エレメントグループとプロジェクトの設定

点検・補修の効率性を高めるために，構造物を構成する部材をエレメントに分割し，同一の劣化特性・環境特性を有するエレメントをまとめたエレメントグループを設定して，エレメントグループごとにシミュレーションを実施する．エレメントのグループ化に際しては，部材種別・劣化特性・環境特性の他，補修の単位（まとめて補修される単位），あるいは情報管理の単位など，これらの要因とエレメントを適切に対応づけることが重要である．ここでは，エレメントグループとして，側壁部を液相部と気相部および気液境界部を分割し，以下のように分類する：1）頂版：S，2）底版：B，3）側壁（液相部）：W1，4）側壁（気液境界部）：W2，5）側壁（気相部）：W3．**表-1** に各施設の構成部材とその諸元を示す．

本研究では，処理前の下水が流入するポンプ井から，沈澱処理の最終段階にあたる最終沈殿池までの一連のシステムを対象とする．個々の構成部材では腐食条件が大きく異なると考えられるため，想定される劣化形態が異なる．一方で，下水処理施設のコンクリート構造物の点検・補修の実施のためには，槽内の処理水を一時排水して，ドライアップすることが必要になる．このために，同一構造物の異なるエレメントグループが同時に補修される場合も多い（例えば，初期沈殿池の側壁の気液境界部：W2 と気相部：W3）．このよう

表-1 対象施設の概要

	構成部材	サイズ 幅×長さ×高	液相高	気液境界高	気相高	備考
流入ポンプ井	B, W1, W2, W3, S	5m×10m×10m	8m	1.0m	1.0m	覆蓋有り
分配槽	B, W1, W2, W3, S	5m×10m×5m	3.4m	0.6m	1.0m	覆蓋有り
最初沈殿池	B, W1, W2, W3, S	5m×30m×5m	3.4m	0.6m	1.0m	覆蓋有り
反応タンク-1（嫌気型）	B, W1, W2, W3, S	5m×30m×5m	3.4m	0.6m	1.0m	覆蓋有り
反応タンク-2（好気型）	B, W1, W2, W3	5m×30m×5m	3.4m	0.6m	1.0m	覆蓋無し
最終沈殿池	B, W1, W2, W3	5m×30m×5m	3.4m	0.6m	1.0m	覆蓋無し

*B：底版，W1：側壁（液相部），W2：側壁（気液境界部），W3：側壁（気相部），S：頂版

表-2 各施設で想定する劣化形態とプロジェクト分類

	想定される劣化	プロジェクト	
流入ポンプ井	硫酸腐食	PJ: S&W2&W3	PJ: B&W1
分配槽	硫酸腐食	PJ: S&W2&W3	PJ: B&W1
最初沈殿池	硫酸腐食	PJ: S&W2&W3	PJ: B&W1
反応タンク-1（嫌気型）	硫酸腐食	PJ: S&W2&W3	PJ: B&W1
反応タンク-2（好気型）	液相部：酸性処理水による中性化 気相部：一般気中環境における中性化	PJ: S& W3	PJ: B&W1&W2
最終沈殿池	気相部：一般気中環境における中性化	PJ: S&W2& W3	PJ: B&W1

な補修の実情を反映させるために，同時期に一括補修される工事単位として，さらにプロジェクトグループを定義し，プロジェクトの評価単位として用いる．プロジェクトの設定にあたっては,硫酸腐食については,気相部の劣化が激しいことが想定されるため，気相部と気液境界部を同一のプロジェクトにまとめる．反応タンク好気型においては，液相部の劣化が気相部に比べ大きいものと想定し，液相部と気液境界部を同一のプロジェクトにまとめる．また，最終沈殿池においては，中性の液相に比べ，一般気中環境の方が中性化の進行が速いと考え，気相部と気液境界部を同一のプロジェクトにまとめる（**表-2**）．

(3) 健全度ランクの設定

マルコフ過程によって劣化過程を記述するに際して,健全度ランクを設定する必要がある．健全度ランクの設定においては,硫酸腐食を対象とする場合には,「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル（以下，防食指針）」[12)]に基づき，通常の健全度ランクとしてR0からR4までの5ランクを設定した．また，中性化を対象とする場合（反応タンク好気型および最終沈殿池）には，防食指針が準拠する「コンクリート標準示方書　維持管理編」[13)]を参考に,通常の健全度ランクとしてR1からR4の4ランクを設定した．

さらに本研究では，リスクの評価を行うため，以上で述べた通常の健全度ランクから逸脱して予期せぬ損傷が発生した状態を記述するための付加的な健全度ランクDを定義した．

表-3 定期補修費用

健全度 ランク	硫酸腐食補修 (円/m^2)	中性化補修 (円/m^2)
R0	18,100	-
R1	18,100	0
R2	76,900	27,600
R3	169,000	64,300
R4	222,250	119,300

(4) 補修工法の設定

補修については，定期補修と復旧補修を考慮する．これは下水処理施設では，常時処理水が存在するために，日常点検や利用者の通報などに基づいて定期補修を待たずに直ちに補修を行う緊急補修が実施できないことに起因する．そこで，以降のシミュレーションにおいて緊急補修は工法設定しないこととする．また，復旧補修については,ランクD生起時にのみ実施する．工法規格については，現実的には施設ごとに異なる規格が選択される場合があると想定されるが，ここでは簡単のため，硫酸腐食を対象とする流入ポンプ井，分配槽，最初沈殿池，反応タンク嫌気型については，塗布型ライニング工法を，その他の反応タンク好気型，最終沈殿池については，標準的な中性化補修工法を用いることとする．

補修コストに関しては，硫酸腐食を対象とした補修コストは下水処理場における過去の工事実績等を参考に**表-3**のように設定した．一方，中性化を対象とした補修コストは，コンクリート標準示方書などを参考にしながら，劣化部除去工，鉄筋処理工，断面修復工からなるものとし，コンクリート構造物の一般的な補修コストを参考にして同じく**表-3**のように設定した．

(5) 劣化過程のモデル化

劣化過程のモデル化にあたっては，硫酸を対象とした場合と中性化を対象とした場合とでは進行形態が異なるため，それぞれ個別にモデル化した．硫酸腐食については，ライニングの劣化は非斉次型マルコフ劣化とし，コンクリートは斉次型マルコフ劣化とした．また，中性化を対象とした施設については，コンクリート部を斉次型マルコフ劣化のみでモデル化した．以下に，ライニングの非斉次型マルコフ劣化と，コンクリートの斉次型マルコフ劣化について順次条件を示す．

ライニングの劣化損傷として，1）初期不良，2）偶発故障，3）磨耗故障の 3 タイプにモデル化し，それぞれを以下のように設定した．

1. 初期故障は全体の 5%程度に生じる可能性があり，供用から 3 年間で初期故障の 95%が発現する．
2. 偶発故障は全体の 10%程度に生じる可能性がある．
3. 磨耗故障は，供用後 7 年以内では生じず，また 10 年以内の発現率は 1.5%程度，15 年以内の発現率は 85%程度である．
4. 磨耗故障が始まる前の供用後 7 年次までの間に発現する全ての故障の割合は，全体の 10%程度である．また，供用後 20 年次までの間に発現する全ての故障の割合は，全体の 99%である．

硫酸腐食を対象としたコンクリートの劣化については，「防食指針」に示される腐食速度を参考に，流入ポンプ井，分配槽，最初沈殿池，反応タンク嫌気型全てに対して，以下のように設定した．

・頂版 S・側壁 W2（気液境界部）・側壁 W3（気相部）：$N(5.5, 0.75)$（腐食速度 II 類相当）

・底版 B・側壁 W1（液相部）：$N(2.5, 0.75)$（腐食速度 III 類相当）

ここで，N は正規分布であり，劣化過程の不確実性を確率変数として考慮している．

中性化を対象としたコンクリートの劣化については，表面 pH とコンクリート内部の pH の差を駆動力とする拡散を仮定して，中性化速度を以下のように設定した．

・反応タンク好気型～液相および気液境界部

酸性の処理水による中性化を想定して設定した．劣化速度の設定においては，気相部の劣化速度との差異が明確に表れる試算条件として，仮想的に表面 pH=3 程度の中性化速度とした（実際の処理水の表面 pH に比べ，小さ目の値と想定される）．

底版 B・側壁 W1（液相部）・側壁 W2（気液境界部）：$N(2.3, 0.8)$（表面 pH=3 相当）

・反応タンク好気型～気相部

一般の気中を想定して，表面 pH=6 程度の中性化速度を設定した．

頂版 S・側壁 W3（気相部）：$N(1.5, 0.5)$（表面 pH=6 相当）

表-4 検討代替案

ケース	代替案	点検・定期補修間隔
A	A-1	5
	A-2	10
	A-3	15
	A-4	20
	A-5	25
B	B-1	7
	B-2	14
	B-3	21
	B-4	28

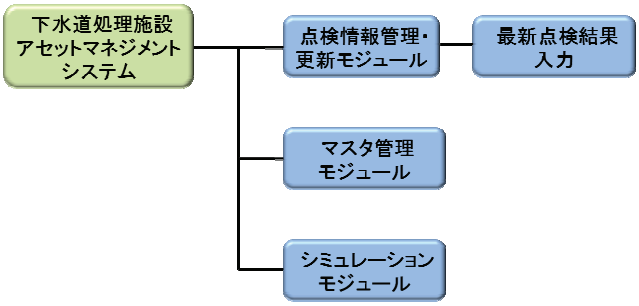

図-4 システム基本構成

・最終沈殿池～液相部

水質がほぼ中性に保たれると考え，表面 pH=7 相当の中性化速度とした．

底版 B・側壁 W1（液相部）・側壁 W2（気液境界部）：N(1.2, 0.4)（表面 pH=7 相当）

・最終沈殿池～気相部および気液境界部

一般の気中を想定して，表面 pH=6 程度の中性化速度を設定した．

頂版 S・側壁 W3（気相部）：N(1.5, 0.5)（表面 pH=6 相当）

なお，実際のシミュレーションにおいては，これらの劣化速度を反映したマルコフ推移確率行列により劣化過程を記述する．

(6) リスク算定条件の設定

本研究では，定量的なリスク評価を行うために，リスクを，損傷発生確率（ランク D の発生確率）と損傷発生時の損失期待値の積として定義する．さらに，R4 から D への 1 年あたりの推移確率を 0.01 と設定し，損傷発生時の損失額を，頂版 S : 5,000 千円，底版 B : 500 千円，側壁（液相部）W1 : 1,000 千円，側壁（気液境界部）W2 : 1,000 千円，側壁（気相部）：1,000 千円と見積もる．

(7) 補修対策代替案の設定

本研究では複数の施設を含む施設全体のトータルコストを試算することを目的とする．このような場合，施設全体から構成されるシステムとしての機能の一貫

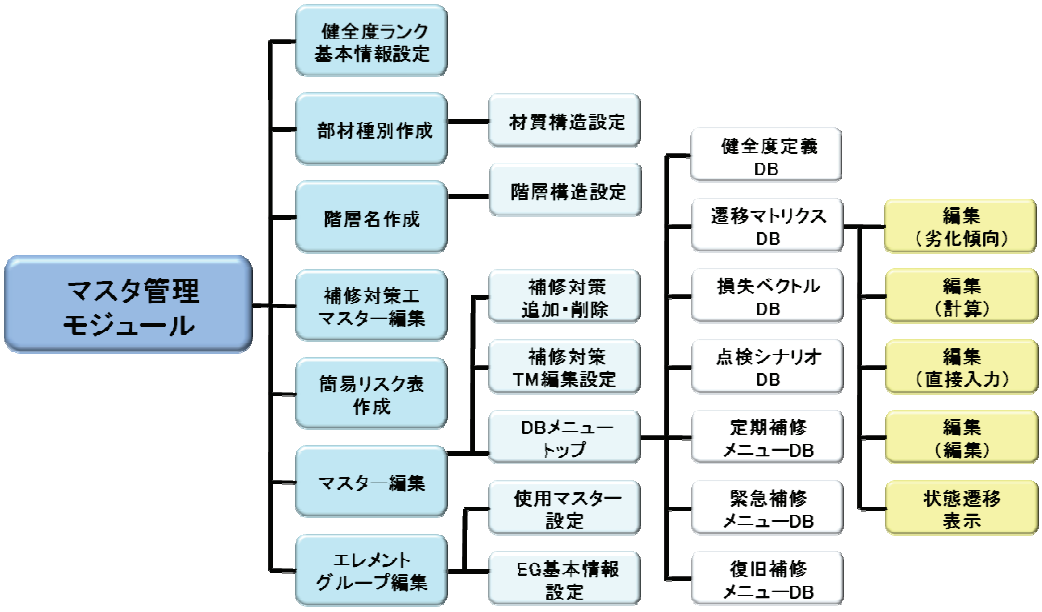

図-5 マスタ管理モジュールの構成詳細

性を考えると，個々の施設の点検や補修を個別に扱うだけでなく，補修時期の同期化を考慮することが重要となる．実際に，下水処理施設のアセットマネジメントにおいて，各構成部材の補修周期の同期を考慮しない補修政策は先述したように現実的にはありえない．このような視点から，ここでは具体的に 2 種類の基本周期（ケース A の 5 年と B の 7 年）および，それぞれに対する複数の代替案を設定する．**表-4** に設定ケースを示す．なお，ケース A と B は補修政策の同期効果を比較することに主眼を置いているために，点検・定期補修間隔以外の条件は全て同一としている．さらに，それぞれのケースにおいて，代替案（A-2～A-5，B-2～B-4）は，最小周期となる 5 年（A-1）と 7 年（B-1）の基本周期に対する倍数となっている．したがって，ケースを A と B のいずれかに固定した上で，施設ごとにトータルコストの最小化を実現する代替案を選択していったとしても，それらを単純に積み上げた補修政策は，基本周期（5 年 or 7 年）のいずれかで同期化された政策となっている．

4. アセットマネジメントシステムの構築

(1) アプリケーションの概要

アセットマネジメントシステムは， VC++.NET および VB.NET で構築されている．また，利用者の使用性を考慮して，システムのインターフェース，データベースおよびシミュレーション結果の表示など，全ての機能が Excel 上で稼働するようになっている．システムの基本構成を**図-4** に示す．本システムは，点検情報管理・更新モジュール，マスタ管理モジュールおよびシミュレーションモジュールという 3 つモジュールによって構成される．さらに，それぞれのモジュールがインターフェースを介して相互に情報伝達を行うことで，マネジメントシステムとして稼働している．ここで情報管理の権限設定や操作の簡略化を目的として，利用者のシステム利用目的に応じてアクセス制限を行っている．具体的には，点検情報管理・更新モジュールへアクセスする利用者を「点検者」，マスタモジュールは「管理者」，シミュレーションモジュールは「一般ユーザー」とし，システムトップ画面に，これらを識別するためのメニュー画面を設定している．

(2) 点検情報管理・更新モジュール

点検情報管理・更新モジュールでは，構造諸元や環境条件など，一般的な台帳に記載されている基本情報を管理するとともに，過去の点検や補修の履歴情報も保管する機能を有する．当然ながら，点検や補修が実施されれば，それらの情報を逐次更新していくことが可能である．本モジュールの利用者は，実際の点検を実施する点検者や，施設の物理的な健全状況を管理する技術者といった実務担当者を想定している．したがって，点検情報管理･更新モジュールだけであっても，下水処理施設の一般的なデータベースとして独立に機能することが可能なようにシステム化を図っている．

(3) マスタ管理モジュール

マスタ管理モジュールは，点検・補修政策を決定する上で必要な共通の情報を管理するモジュールである．詳細を**図-5** に示す．

本モジュールは，**3.**で述べた健全度ランク，エレメ

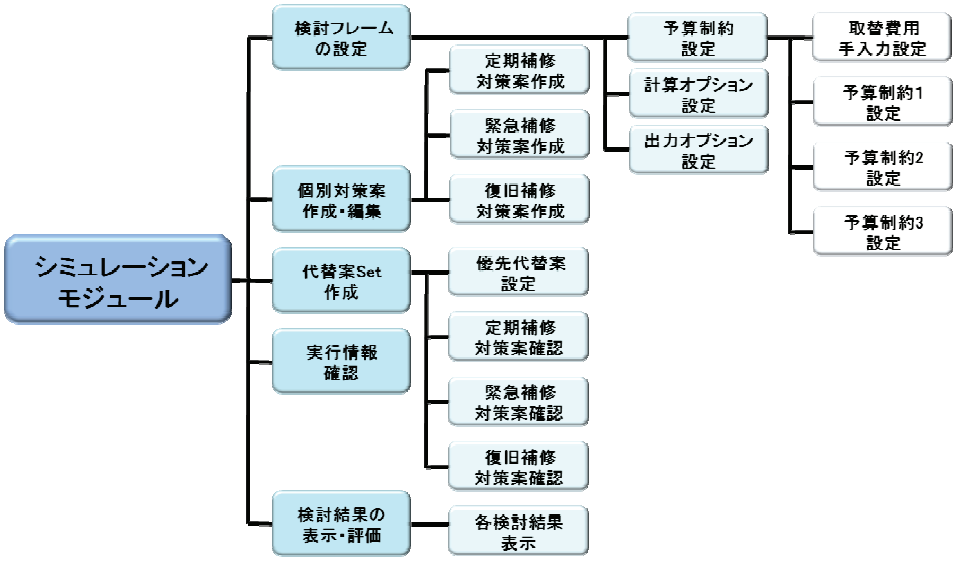

図-6 シミュレーションモジュールの構成詳細

表-5 各施設の累積トータルコスト比較

トータルコスト比較												
対象施設	エレメントグループ		劣化速度	ケースA：代替案					ケースB：代替案			
				A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	B-1	B-2	B-3	B-4
流入ポンプ井	底版	B	中	×	◎	△	△	○	○	○	○	◎
分配槽	側壁（液相部）	W1	中	×	◎	△	△	○	○	○	○	◎
最初沈殿池	側壁（気液境界部）	W2	速	○	◎	×	×	×	◎	△	×	×
反応タンク嫌気型	側壁（気相部）	W3	速	○	◎	×	×	×	◎	△	×	×
	頂版	S	速	○	◎	×	×	×	◎	△	×	×
反応タンク好気型	底版	B	中	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	側壁（液相部）	W1	中	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	側壁（気液境界部）	W2	中	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	側壁（気相部）	W3	遅	○	○	○	○	△	○	○	△	△
最終沈殿池	底版	B	遅	○	○	○	○	△	○	○	○	△
	側壁（液相部）	W1	遅	○	○	○	○	△	○	○	○	△
	側壁（気液境界部）	W2	遅	○	○	○	○	△	○	○	△	△
	側壁（気相部）	W3	遅	○	○	○	○	△	○	○	△	△

ントグループ，補修工法，リスクなど，政策決定の根幹情報の設定・管理を主に実施する．健全度定義，部材の物理的な階層構造など，シミュレーションの根幹に係わる情報も本モジュールで設定される．また，遷移マトリクス DB（劣化過程），損失ベクトル DB，点検シナリオ DB，定期・緊急・復旧補修 DB など，シミュレーション結果に対する信頼性や精度に大きく寄与する情報を，本モジュールは取り扱う．特に，劣化過程を記述する遷移マトリクス DB においては，情報の蓄積状況に応じて，劣化過程の直接入力から統計的推計まで，多様な劣化予測を行うことができる．

さらに本モジュールでは，大量の部材からなる構造物群への適用性に配慮して，多くのエレメントグループに共通に適用される劣化・補修・点検等に関するデータセットをマスターデータとして登録する機能が組み込まれている．マスターデータを用いることにより，データ作成・入力作業の省力化やシミュレーションの高速化が可能になる．なお，マスターデータを用いる際は，エレメントグループ編集画面において，各エレメントグループに適用するマスターデータを指定するとともに，必要に応じて当該エレメントグループに特有の情報（劣化進行，損失の大きさなど）を補完することになる．

(4) シミュレーションモジュール

シミュレーションモジュールは，マスタ管理モジュールで設定されたデータに基づき，トータルコスト最小化を達成する最適点検・補修政策を，各種条件の下でシミュレーションにより求めるモジュールである．詳細なシステム構成を**図-6** に示す．本モジュールは，大別すると 5 つのサブモジュールで構成される．まず，検討フレーム設定サブモジュールでは，シミュレーションのための条件設定（シミュレーション期間，割引率の考慮，検討対象エレメントの設定など）を行う．次に個別対策案作成・編集サブモジュールおよび代替案 set 作成サブモジュールでは，マスタ管理モジュールで設定された選択可能な点検・補修政策の要素（点検間隔，健全度ランク毎の補修工法など）を組み合わ

表-6 各施設の累積コスト比較

コスト比較												
対象施設	エレメントグループ		劣化速度	ケースA：代替案					ケースB：代替案			
				A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	B-1	B-2	B-3	B-4
流入ポンプ井	底版	B	中	×	◎	△	△	○	○	○	○	◎
分配槽	側壁（液相部）	W1	中	×	◎	△	△	○	○	○	○	◎
最初沈殿池	側壁（気液境界部）	W2	速	○	◎	×	×	×	◎	○	×	×
反応タンク嫌気型	側壁（気相部）	W3	速	○	◎	×	×	×	◎	○	×	×
	頂版	S	速	○	◎	×	×	×	◎	○	×	×
反応タンク好気型	底版	B	中	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	側壁（液相部）	W1	中	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	側壁（気液境界部）	W2	中	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	側壁（気相部）	W3	遅	○	○	○	○	△	○	○	○	△
最終沈殿池	底版	B	遅	○	○	○	○	△	○	○	○	△
	側壁（液相部）	W1	遅	○	○	○	○	△	○	○	○	△
	側壁（気液境界部）	W2	遅	○	○	○	○	△	○	○	○	△
	側壁（気相部）	W3	遅	○	○	○	○	△	○	○	○	△

表-7 各施設の累積リスク比較

リスク比較												
対象施設	エレメントグループ		劣化速度	ケースA：代替案					ケースB：代替案			
				A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	B-1	B-2	B-3	B-4
流入ポンプ井	底版	B	中	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
分配槽	側壁（液相部）	W1	中	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
最初沈殿池	側壁（気液境界部）	W2	速	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
反応タンク嫌気型	側壁（気相部）	W3	速	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
	頂版	S	速	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
反応タンク好気型	底版	B	中	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
	側壁（液相部）	W1	中	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
	側壁（気液境界部）	W2	中	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
	側壁（気相部）	W3	遅	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
最終沈殿池	底版	B	遅	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
	側壁（液相部）	W1	遅	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
	側壁（気液境界部）	W2	遅	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×
	側壁（気相部）	W3	遅	◎	○	○	△	×	◎	○	△	×

せ，分析に用いる点検･補修政策代替案を再構成する．つづいて実行情報確認サブモジュール（シミュレーション実行）では，シミュレーションに関する設定条件を確認し，シミュレーションを実行する．最後に検討結果表示サブモジュールでは，トータルコスト，コスト，リスク等を評価指標とした補修政策代替案の評価結果や，代替案毎の健全度ランクの推移などをアウトプットとして出力する.アウトプットの具体的事例は，**5.**で示す．なお本モジュールは，最適点検・補修政策に関する検討結果を踏まえた予算制約下の対策優先順位の検討や時系列的な予算代替案の検討など，マネジメントレベルにおける検討機能も備えたものとなっている．

5. 適用事例

(1) 適用施設の概要

下水処理施設の主要なサブ施設の一つである水処理系を対象としモデル化を行う．**表-1** に対象施設の一覧を示す．本研究では，具体的な実在施設を対象としたものではないので，それぞれの施設の諸元は標準的な値を設定している．なお，反応タンクは嫌気型処理と好気型処理の併用方式とし個別にモデル化した.覆蓋，および防食被覆層は，硫酸腐食が対象となる流入ポンプ井，分配槽，最初沈殿池，反応タンク嫌気型において設定し，それ以外の施設には設定しない状態を想定した．また，シミュレーションの入力等に関しては，**3.**で述べた値を使用した．

(2) シミュレーション結果

本試算では，施設ごとに，その劣化特性を考慮した最適代替案を算定した後に，施設全体で集計することにより，施設全体を対象とした LCC/RM 評価を行う．そこで，本節では，まず個々の施設を対象とした試算結果を考察し，その後，次節において点検・補修政策の同期化を考慮した施設全体に関する結果をとりまとめる．

表-5～7 は,各施設のエレメントグループ毎の最適代替案のシミュレーション結果である．累積コスト（**表-6**）と累積リスク（**表-7**）の和を累積トータルコスト（**表-5**）と定義する．ここでは，シミュレーション期間の累積トータルコスト，累積コスト，累積リスクのそれぞれの年平均値を算出し，その年平均値が最小となる案を◎，最小値に近い値を示す案を○，明らかにコスト高となる案を×，○と×の中間的な案を△としている．これらの結果より全体的な傾向として，劣化

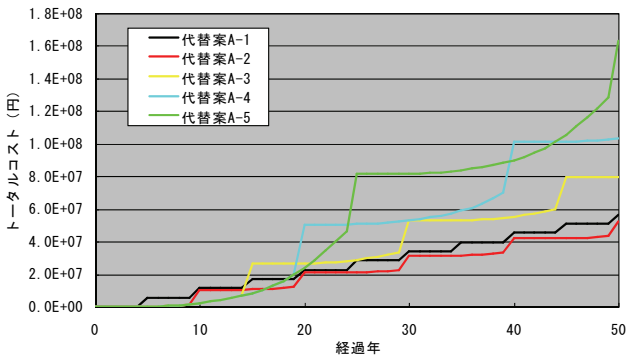

図-7 ケース A の累積トータルコスト比較（最初沈殿池－頂版）

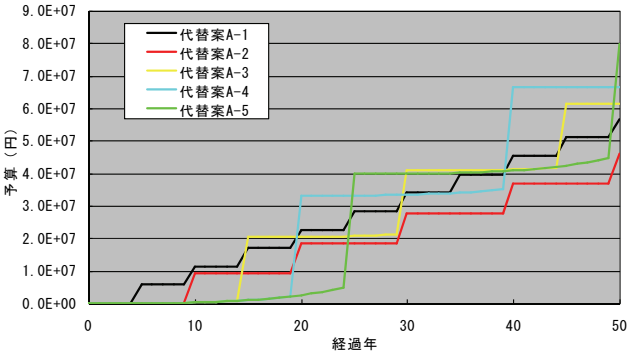

図-8 ケース A の累積コスト比較（最初沈殿池－頂版）

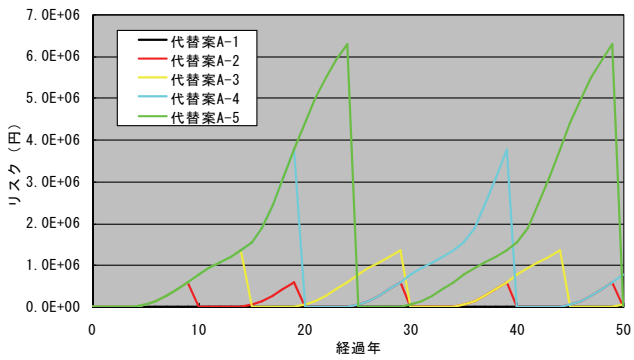

図-9 ケース A の単年リスク比較（最初沈殿池－頂版）

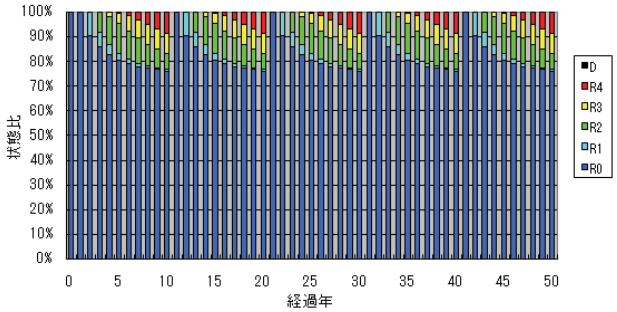

図-10 状態遷移（最初沈殿池－頂版，代替案 A-2）

速度が速い構成部材ほど，点検・定期補修間隔が短い予防保全的な政策が累積トータルコストの年平均値を最小化する傾向があることが見て取れる．また，シミュレーション結果の一例として，最初沈殿池に着目した 50 年間の累積トータルコストの推移を**図-7** に，累積ライフサイクル費用の推移を**図-8** に，50 年間のリスク（単年度ごと）の推移を**図-9** に，状態推移（ケース A，代替案 A-2）を**図-10** にそれぞれ示す．紙面の都合上，施設ごとの全シミュレーション結果の掲載は割愛するが，以下に本シミュレーション結果を通して得られた経験的事項を列挙する．

流入ポンプ井，分配槽，最初沈殿池，反応タンク嫌気型に関しては以下の 2 点をあげる．第一に，劣化速度の大きな部位（S, W2, W3）については，ライニングの劣化が急激に進展する前（10 年間隔あるいは 7 年間隔）に対策を行うのが有利であった．この傾向は，トータルコストおよびコスト比較の結果双方に言える．ただし，トータルコスト比較ではリスクも考慮されているために，単純なコスト比較に比べより傾向が顕著に現れた．第二に，劣化速度の中程度の部位（B, W1）については，1）ライニングの劣化が進行する前に補修を行う，という戦略と 2）ライニングの劣化をある程度許した上で，コンクリートの劣化状態が極度に悪化する（すなわち R4 ランクが増加する）前に補修を行う，という 2 種類の戦略が有利となった．1）の条件では 10 年程度の間隔で補修を行うこと（代替案 A-2）が最適であり，2）の条件では 25 年以上の間隔で補修を行うこと（代替案 B-4 あるいは A-5）が最適であった．ただし，本検討ではライニングの劣化速度を，劣化速度の大きな部位（S, W2, W3）と同じ値に設定しており，コンクリートの劣化に対してライニングが相対的に早く劣化する計算となっているために，早期の補修が有利になるという結果が得られたと考えられる．コンクリートの劣化と同様にライニングの劣化速度も小さいものと仮定すれば，最適な点検補修間隔はより大きくなると予想される．

反応タンク好気型に関しては，以下の 2 点をあげる．第一に，劣化速度の中程度の部位（B, W1, W2）については，選択代替案の関係に大差はなかった．これは劣化進展が時間にほぼ比例する形で進行しており，またその補修に要する費用も時間に比例して増大するために，補修間隔を変更しても，単年度あたりの費用はほぼ一定に保たれるためである．第二に，劣化速度の遅い部位（W3）についても，選択代替案の関係に大差はなかった．これは，コンクリートの劣化速度が極めて遅く，補修コストが急激に増大する健全度ランクに到達しないためである．ただし，補修間隔を 20 年以上に設定すると，健全度ランク R4 のコンクリートの出

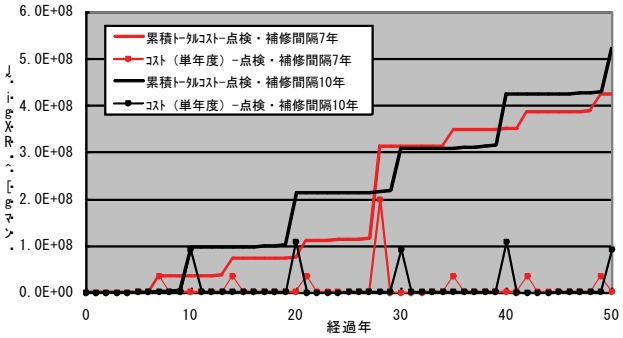

図-11 水処理系施設全体のトータルコスト比較
（点検・補修間隔 7 年および 10 年）

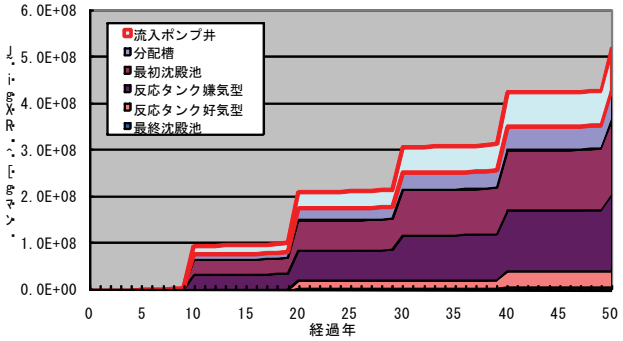

図-12 水処理系施設全体の累積トータルコスト内訳
（点検・補修間隔 10 年）

現が始まるため，トータルコストおよびコストの増大が見られた．

最後に，最終沈殿池に関しては，以下の 3 点をあげる．第一に，全ての部材において劣化進行が遅いために，上述の反応タンク好気型 W3 と同様の傾向が見られた．第二に，リスク最小化の立場からは，全ての施設について補修間隔を短くすればするほど有利となった（**表-7** 参照）．第三に，本試算では，コストに比べリスクの設定値が小さいために，トータルコストにより評価される最適代替案はコスト変動に支配される結果となった．

(3) 点検・補修の同期化を考慮したシミュレーション

図-11 には施設全体としての累積トータルコストの比較を示す．なお，基本周期 5 年の場合には，点検・補修間隔 10 年（代替案 A-2）が最適点検・補修間隔となったので，これをケース A の代表として示す．また，**図-12** には点検・補修間隔 10 年の場合の累積トータルコストに占める個々の施設の内訳を，**図-13** には同間隔 10 年の場合の施設全体の状態遷移図を示す．これらの結果から得られる考察を以下に示す．

累積トータルコストとその内訳を見ると，点検・補修間隔 7 年の場合，10 年の場合の双方とも，腐食速度が大きく，かつ施設規模の大きな最初沈殿池および反

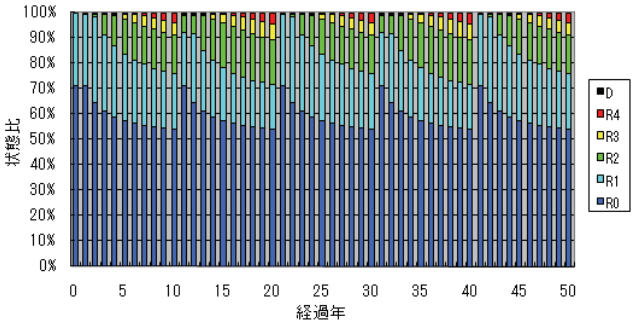

図-13 水処理系施設全体の状態推移
（点検・補修間隔 10 年）

応タンク嫌気型に要するコストが累積トータルコストの大部分を占めていることが分かる．したがって，累積トータルコストの変動は，最初沈殿池および反応タンク嫌気型に要するコストに支配されていることが分かる．こうした結果は，施設全体に要するコスト構造を定量的に示すもので，施設の重要度あるいは着目すべき施設の優先順位を考慮する上で，有用かつ明瞭な情報を提供するものである．点検・補修間隔 7 年と 10 年の代替案の比較からは，50 年時点での LCC で評価すると基本周期が 7 年の場合が有利であるが，発生コストの平準化という観点からは基本周期 10 年の場合が有利であることが評価できる．これは戦略代替案が持つ特性を定量的に示すものであり，補修戦略を立案するための有用かつ明瞭な情報を提供するものである．

6. おわりに

本研究では，複数のサブ施設が直列的に配置された下水処理施設を対象として，ライフサイクルコストとリスクの総和として表されるトータルコストの最小化が達成可能な最適な点検・補修政策を検討するためのアセットマネジメントシステムの開発を行った．具体的な対象として，直列的なサブ施設で構成される水処理系施設に着目し，個々のサブ施設の点検・補修周期の同期化を考慮した水処理系施設全体の点検・補修政策の決定方法を提案した．さらに，開発したアセットマネジメントシステムを用いて，6 種類のサブ施設からなる標準的な水処理系施設全体を対象としたシミュレーションを実施し，同期化政策の有用性に関する考察を行った．本マネジメントシステムが搭載するシミュレーションモデルにより，劣化過程の異なる複数構成部材の劣化傾向を個別に予測した上で，同一の直列的なサブ施設に属する構成部材群の点検・補修タイミングを同期化させるようなアセットマネジメント戦略の検討が可能になると考える．試算結果についても，施設毎に異なる劣化特性，および点検・補修に要する

コスト構造を概ね記述することができ，また同期化に関する現実のコスト構造もモデルに反映することができた．この点で，本研究で提案した方法論およびマネジメントシステムは，様々な下水処理施設に対して十分な適用性・有用性を持つものであることが確認できたと考える．ただし，本研究のシミュレーションでは建設工事終了時（新設時）の直線的な標準型施設を対象としており，現時点ですでに供用中の施設や並列的な施設を対象としていない．その意味において本研究の成果は限定的であることは言うまでもない．しかしながら，以下に述べるように，施設の点検・補修に関する情報を反映した形で劣化予測モデルを修正することで，供用施設への拡張を容易に行うことができる．

以上を踏まえた上で，今後，下水処理施設のアセットマネジメントシステムの実用性をより高めていくための課題をあげる．第一に，下水処理施設に対する点検データを蓄積し，実際の下水処理施設への適用を通して，シミュレーションの有効性を実証的に検証する必要がある．本研究では直列なサブ施設で構成される下水処理施設を対象としたが，並列的なサブ施設を考慮した施設全体系としてのネットワーク効果やリダンダンシーの経済性評価を行う必要性がある．その上で，継続的に実務との整合性を図っていくことが重要である．第二に，集計的マルコフ過程により劣化予測を行うモデル[7]をシステムに搭載することが考えられる．リダンダンシーが確保されていない下水処理施設では，劣化過程に関する点検データや補修履歴データが蓄積されておらず，今後も蓄積が難しい状況である．実務において獲得できる情報は，補修工事記録として入手可能である補修タイプ別の補修工事量（補修面積）等といった集計的情報のみである．このような集計的な劣化情報に基づき点検・補修政策に関する意志決定を支援することが可能な最適点検・補修政策決定モデルを登載しなければならない．集計的マルコフ過程を搭載することで，実務で獲得できる情報とシステムへの入力情報が整合的になり，本システムの実用性がより向上することが期待できる．さらに，同一部材の劣化過程に無視し得ない異質性が存在する場合には，部材個々の異質性を考慮したマルコフ過程[14]を援用することも可能である．第三に，本システムと連動した管理会計システムの開発が不可欠である．本研究では，下水処理施設のアセットマネジメントの特殊性に関して，主に構造物の側面に焦点を当てたが，財源の側面では，修繕費を賄うべき下水道収入から再構築費用の資金調達のための起債まで，様々な財源が内包されているという特殊性がある．したがって，下水処理施設のアセットマネジメントにおいては，ライフサイクルコストの削減のみならず，資金の調達，負債の償還方式も同時に考慮しながら，将来発生する維持更新需要を平準化し，事業の安定性・継続性を確保していくことが要請される．そのためには，①予防保全的修繕を通じた下水処理施設の長寿命化を実施するという技術方策，②既存債務の償還と新たな起債という金融的方策，という 2 つの方策の望ましい組み合わせを検討できる管理会計システムを構築することが重要である．

なお，本研究の一部は文部科学省「若手研究者の自立的研究環境整備促進」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．

参考文献

1) 慈道充, 江尻良, 織田澤利守, 小林潔司:道路舗装管理会計システムアプリケーション, 土木情報利用技術論文集, 土木学会, Vol.13, pp.125-134, 2004.
2) 青木一也, 若林伸幸, 大和田慶, 小林潔司:橋梁マネジメントシステムアプリケーション, 土木情報利用技術論文集, 土木学会, Vol.14, pp.199-210, 2005.
3) 山本浩司, 青木一也, 小林潔司:道路付帯施設アセットマネジメントシステム, 土木情報利用技術論文集, 土木学会, Vol.15, pp.173-184, 2006.
4) 堀倫裕, 亀村勝美, 畠中千野, 小西真治:リスクを考慮した土木構造物の維持管理計画手法, JCOSSAR2003 論文集, 日本材料学会, T2-10, pp.503-506, 2003.
5) 国土交通省都市・地域整備局下水道部:平成 20 年度下水道事業予算概算要求概要, 2007.
6) 小林潔司, 北濃洋一, 渡辺晴彦, 石川美知郎:下水道システムの費用効率性評価法, 土木学会論文集, No.751/IV-62, pp.111-125, 2004.
7) 堀倫裕, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司:下水処理施設の最適点検・補修モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol.25, No.1, pp.213-224, 2008.
8) 堀倫裕, 稲毛克俊, 泉博允:リスクを考慮した下水道施設の LCC 評価手法の開発, 第 43 回下水道研究発表会講演集, II-1-3-4, pp.233-235, 2006.
9) 下水道事業団・アセットマネジメント導入検討委員会:アセットマネジメント手法導入検討委員会最終報告書, 2007.
10) 下水道事業におけるストックマネジメント検討委員会:下水道事業におけるストックマネジメントの基本的な考え方(案), 2008.
11) 国土交通省都市・地域整備局下水道部:下水道長寿命化支援制度に関する手引き(案), 2008.
12) 日本下水道事業団(編著):下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル, 2002.
13) 土木学会:コンクリート標準示方書 維持管理編 2007 年制定, 2008.
14) 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.