京都大学大学院経営管理教育部 WS レポート

下水道事業財務シミュレーション

提出日：平成 20 年 1 月 26 日

入　学　年	平成 18 年
学 生 番 号	7530－18－5459
所属プログラム	プロジェクトオペレーション
氏　　名	鶴田　岳志
WS 担当教員氏名	小林　潔司

京都大学大学院経営管理教育部
プロジェクトオペレーションマネジメントプログラム

京都大学大学院経営管理教育部
下水道事業財務シミュレーション

鶴田　岳志

本 WS では，下水道事業財務シミュレーションシステムを構築した．この目的は，下水道管理者に資する長期経営計画資料に有用な情報を提供することにある．その上で現場のエンジニアの工学的管理と財務管理者の財務管理をもとに将来の維持修繕計画をシミュレーションによって求め，その有用性について実証的に分析する．

1. はじめに

本 WS は，下水道事業財務シミュレーションシステムを構築した. 1)工学的モデルを用いて劣化過程をシミュレーションし，最適維持修繕計画を立てるシステム(Asset Management System：以下 AMS と略す)，2)前システムで立てた最適維持修繕計画の上で最適財務計画を立てるシステム(Financial Planning System：以下 FPS と略す) で構成される．以下 2. AMS，3. FPS，4. 適用事例について述べる．

2. AMS

AMS では下水道事業に供する資産群の下水道サービス水準を保ちながら，維持・点検・補修・更新時期の最適化を通じて，最適維持補修計画を立てる．

本 WS で，下水処理施設の中で土木資産は，堀ら [1)]のモデルを用いて，好ましいリスク管理水準のもとで最適点検間隔と平均費用を求め，不確実な劣化過程をシミュレーションし各年度の修繕費を算定する．また土木以外の資産は，ある自治体の維持管理方針 [2)]を基に LCC 最小化を求め，その上で各年度の修繕費，再構築費用を求めた．

2．1 下水処理施設水槽部の最適点検・補修モデルの導出

以下では，堀ら [1)]が提案した下水処理施設の最適点検補修モデルの簡単に説明をする．下水処理施設全体の LCC 最小化する最適点検・補修間隔を決定するためのモデルは以下のように定式化できる．

$$\begin{aligned} &\min_{d,\xi}\{\textstyle\sum_{k=1}^{n}\frac{w_k^{\xi}(i)}{d}\} \\ &\text{subject to } (d,\xi)\in\Omega(\bar{U}) \\ &(i=1,\cdots,M) \end{aligned} \tag{1}$$

但し，下水処理施設全体でのコンクリート版の数をｎとし，$w_k^{\xi}(i)$は下水処理施設の点検・補修過程が定常状態に入った場合の時刻t_r^dにおいて，時刻t_1^dの直前までに補修政策ξの下で必要となるコンクリート版kの平均費用であり，コンクリート版kの推移確率行列$\boldsymbol{p}^{k\xi}$と損傷度別の補修工法単価である$c_j^{j'k}$と補修政策行列の$\boldsymbol{q}^{\xi}$を用いて以下のように表せる．

$$w_k^{\xi}=\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{M}\sum_{j'=1}^{j}p_{ij}^{k\xi}q_{jj'}^{\xi}c_j^{j'k}S^k\pi_i^k \tag{2}$$

下水処理施設全体の土木構造物の補修平均費用w^{ξ^*}は

$$w^{\xi^*}=\sum_{k=1}^{n}w_k^{d^*} \tag{3}$$

で求められる．

2．2 点検・補修過程のシミュレーション

この目的は下水処理施設の土木施設の水槽部の資産に関して，年平均費用の推移をシミュレーションによって算定することにある．土木施設の水槽部の資産の将来の劣化過程は不確実性のため，将来時点における費用及び損傷度推移をモンテカルロシミュレーションによって算定する．シミュレーションを行う場合，処理槽のコンクリート版kの損傷度といった初期状態を与件として設定する．

(1)シミュレーション条件の設定

シミュレーション期間（年），コンクリート版のメッシュ分割数，年間予算の制約条件，擬似乱数を発生回数などを設定する．

(2)シミュレーションの出力

シミュレーションの結果は，経年的な損傷度分布，各期の平均費用推移をコンクリート版毎あるいは全水槽部を合計した値を，グラフによって示すことにより視覚的に表現する．

(3)管理会計システム

シミュレーションにより将来の会計年度毎の固定資産（再調達価額），繰延維持補修引当金，維持補修引当金繰入額，不足維持補修引当金繰入額，不足維持補修引当金の情報を提供する．

2．3 予算制約の問題

工学的検討に裏付けられた将来の修繕費の見積もりが可能になり，それらは企業会計での引当金としての性質を満たし修繕引当金として費用を平準化することができ，土木構造物の資産の予算制約の問題を極力回避することができる．予算制約を考慮した場合については紙面の都合上割愛する．

2．4 その他資産のシミュレーション

ある地方自治体のアセットマネジメント導入委員会の維持管理方針に従って，その他資産に関して，LCC 最小化を求め，その上で最適な維持補修計画を立てた．

京都大学大学院経営管理教育部
プロジェクトオペレーションマネジメントプログラム

3. FPS

本研究では，公営企業の企業債の硬直性による，一時的な資金不足に関して，LCC の最小化の維持補修計画上で解消する手段を提供する．これによって，支払利息の削減，企業債残高の早期削減に寄与することができる．以下では，C，債権削減政策の説明をする．

3. 1C（キャッシュ）の設定

各年度の資金が余剰か不足を把握するために各資産に関して，1 年にどれだけ C(キャッシュ）が出ていくのかを表す指標として C を提案する．これは，下水道管理者にとって重要な指標である企業債残高を減らす最適財務計画を見つけるためのものである．算定方法は，C＝減価償却費－年企業債償還額である．

3. 2 債権削減政策

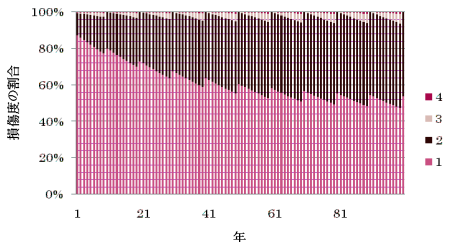
２つの債権削減政策を用意した．それぞれ債権削減政策１は，C の余剰資金を耐用年数が短い資産から適用していき，債権削減政策２では，C の余剰資金を耐用年数が長い資産から適用していく．

4. 適用事例

ある地方自治体の下水処理施設の土木構造物（水槽部）に関して，最適点検補修モデルを適用した結果，硫酸腐食対象のリスク管理水準を 0.25 とすると，最適点検補修間隔は 9 年と定まった．その他資産の財務シミュレーションについては割愛する．

4. 1 土木構造物の点検・補修過程のシミュレーション

点検・補修・更新過程のシミュレーションを行い，費用の推移と健全度分布の推移を分析する．北部浄化センターの下水処理施設の総資産は 482 あり，共用開始から 26 年が経過しており，何回か修繕がされている状態である．シミュレーション期間を 100 年，メッシュ分割を 100 とし，シミュレーション回数を 500 回と設定した．シミュレーション回数は任意に設定できるが，試行の結果，シミュレーション回数を 500 回程度で安定した結果が得られている．一つの出力として図-1 は最適点検補修モデルの最終沈澱池の水槽部の側面の気相部の経年的損傷度分布の状態を示している．次第に損傷度２の占める割合が多くなっていることがわかる．これは補修政策２を適用し，損傷度２の部分を修繕しないためである．



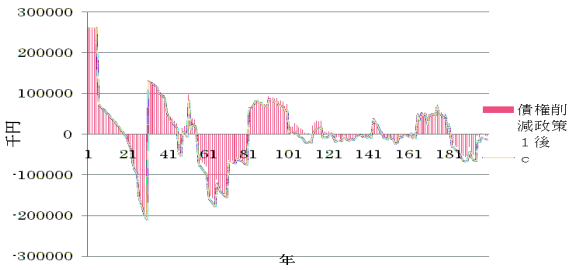
図－１ 損傷度分布の推移（最終沈殿池）

4. 2 管理会計財務シミュレーション

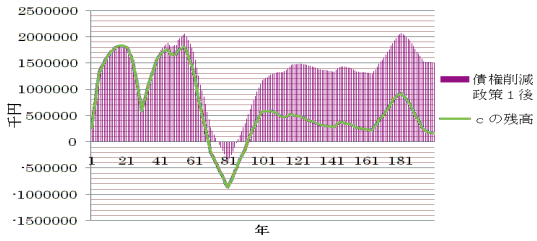
土木構造物の点検・補修過程のシミュレーションのところで，算定した維持補修費用の列を管理会計システムに適用することで，繰延維持補修引当金の推移を得ることができる．

4. 3 最適財務計画

債権削減政策１と政策実行前の比較は図-2 となった．



図－2　C の推移(債権削減政策適用前後の比較)



図－3　C の残高の推移(債権削減政策適用前後の比較)

図-2 の 19 年から 30 年に資金不足が生じ，31 年から 45 年に資金余剰があることが分かる．C>0 ならば，余剰分を今年度の資産の取替にかかる再構築費用や，新規設備にかかる建設費用に充てる企業債や国庫支出金の削減が可能となる．今回では，新規設備は行わず，専ら既存の施設の維持補修を行うと仮定する．この図で再建削減政策適用前に比べて，C が増加していることがわかる．これは，異なる期間にある資金余剰と資金不足の時期をなるべく，同時期にシンクロさせているためである．さらに，C の累積残高を示す図-3 を見ると，差は顕著に現れ，債権削減政策を適用した場合，100 年から C の残高が一定になり，残高 1300000 千円を推移している．これにより，下水道事業の新規施設の建設のためや下水道使用料の減収による，修繕費の制約の解消に繋がる．

5. おわりに

本 WS では 下水道事業に供する資産群の下水道サービス水準を保ちながら，点検・補修・更新時期の最適化を通じて，最適維持補修計画を立て，その上で企業債の硬直性による，一時的な資金不足を解消するような財務計画手段を提供した．さらに，その有用性を実証的に分析した．今後の課題は，このシステムを汚泥処理施設，ポンプ場，管渠等の下水道全体に広げることである．

参考文献

1) 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，土木学会論文集，No. 744/IV-61，pp. 29-38，2003.

2) 日本下水道事業団　静岡市　静岡市 AM 手法導入検討委員会　最終報告書　2007

目 次

1 はじめに **1**

2 本研究の考え方 **1**
2.1 従来の研究概要 1
2.2 下水道アセットマネジメント 2

3 SAMS 構築のための検討（AMS) **4**
3.1 下水処理施設水槽部の最適点検・補修モデルの導出 4
3.2 劣化予測モデルの推定 5
3.3 点検・補修過程のシュミレーション 5
3.4 管理会計システム 6
3.5 予算制約の問題 6
3.6 追加維持補修費 6

4 その他資産のシミュレーション **7**
4.1 維持管理の基本方針 7
4.2 シナリオの設定 7

5 FPS **8**
5.1 C（キャッシュ）の設定 9
5.2 債権削減政策 9
5.3 予算制約の問題 9
5.4 最適維持修繕計画と債権削減政策の関係 9
5.5 最適なシナリオパターンが存在しない場合 10
5.6 資産運用 11

6 適用事例 **11**
6.1 最適点検・補修政策の導出 11
6.2 土木構造物の点検・補修過程のシミュレーション 11
6.3 管理会計シミュレーション 13
6.4 その他資産のシミュレーション 15
6.5 財務シミュレーション 16
6.6 長期経営計画の策定資料の作成 17

7 おわりに **17**

1　はじめに

ほとんどの地方自治体の下水道事業で下水道料金設定が不適切なため,その収入のみでかかる費用を賄えず,他会計からの繰入や企業債からの資金調達を行い,極めて財務体質が悪い状態に陥っている.他方で,資金元（国）も今後の状況次第では財務体質がさらに悪化する恐れがある.下水道施設も高齢化が進み,機械、電気設備が共用開始以来１５年を迎える処理場は全国で約７００にのぼる.今後更なる増加が予想され,施設の更新時期が集中すると予想される.企業債は,財務省が決定している財源の中から,各公営企業に割当られるものであり,更新時期が集中すると国の財政をも圧迫しかねない．また,ある下水道のサービス水準を保ち機能を維持するために,今後の再構築費用や維持補修費が必要である.新規事業に比べ,この再構築事業は住民にとっての便益が理解しにくくなっている場合が多い.再構築事業に関して住民へのアカウンタビリティが必要である.さらに現在では事業の透明性,財政の健全な経営が期待されており,予算についても合理的な説明が必要な時代になってきている．このような中、総務省が発表した「地方公営企業の経営の総点検について」で中期経営計画の必要性を指摘し策定を呼びかけた結果、多くの下水道事業体から長期経営計画が発表されるようになった。また同時に下水道経営管理者にとって経営目標（下水道経営指標の今後あるべき値）をもち、経営の健全化、効率化等経営基盤強化を達成することも必要とされるようになった。住民に対して十分な説明をするには将来の経営指標設定（下水処理原価、使用料単価、経費回収率）は下水道経営計画の中で収支計画（収益的収支、資本的収支）と並んで重要なことである。一般的に汚水処理原価は低くすることがよく、使用料も下がることが望まれ、経費回収率は上がることが良い。最適な経営計画を立てるには、まず経営指標に影響を与えるコストの削減を考えなければならない。その時、公共資産を効率的に運営し、長寿命化を実現し、結果として、コストを削減できるという下水道アセットマネジメントシステム (Sewage Asset Management　System : 以下 SAMS と略す) の導入が効果的である。このシステムは 1) 工学的モデルを用いて劣化過程をシミュレーションし，最適維持修繕計画を立てるシステム (Asset Management　System : 以下 AMS と略す)，2) 前システムで立てた最適維持修繕計画の上で最適財務計画を立てるシステム (Financial Planning System : 以下 FPS と略す) で構成される．このシステムを用いれば、将来の各年度にかかる最適な維持補修費を求めることが可能である。また財務シミュレーションを行うことにより、最適な維持補修計画上での各年度の最適資金調達計画も立てることが可能である。これによって、キャッシュの流れを把握することができ、企業債の発行削減、新規施設への投資、下水道使用料等の収益的収入減による、修繕費その他の予算制約の問題をなるべく公営企業体自身で解決する手段と成りえると期待している。本研究では、最適な経営計画を立てるために有用な SAMS を提案する。本報告書では、重要な施設の一つである下水処理施設を対象としている。下水処理槽に関しては特性を考慮した劣化予測モデルを開発し、最適点検・補修政策の導出、さらには中長期的な劣化・補修のシミュレーションモデルを搭載しており、最適な経営計画を立てるために有用な情報を提供することが可能である。また下水処理施設の下水処理槽を含めた全資産に関して財務シミュレーションモデルを開発した。以下２．で本研究の基本的な考え方を３．において SAMS 構築のための検討事項について述べる。４．においてその他資産のシミュレーションモデルについて、５．では FPS の説明をする。６．において本 SAMS を用いてある自治体の下水道事業を対象とした適用事例について述べる。

2　本研究の考え方

2.1　従来の研究概要

アセットマネジメントシステムにおけるプロジェクトレベルを対象とした土木構造物の最適補修モデルや,さらにはそれらの手法を具体化した業務支援システムアプリケーションの開発に関する研究が蓄積されている．たとえば，橋梁のアセットマネジメントを対象として，米国における代表的な BMS（Bridge Management System）である PONTIS をはじめ，長期的なライフサイクル費用の削減を目指した BMS が数多く提案されている[1)]．土木構造物の維持管理にあたっては，個々の構造物の補修計画を検討するプロジェクトレベルと，管理する構造物群全体の補修政策や予算計画を検討するネットワークレベルといった階層的に異なるマネジメントレベルを取り扱う必要がある．土木構造物単体を取り扱うプロジェクトレベルにおいては，マルコフ決定モデルを用いてライフサイクル費用評価を行うことによって最適補修政策を導出するモデルが提案されている[2)-6)]．ライフサイクル費用評価において，将来時点に発生する費用を積み重ねる際に，異なった時間軸上での費用の取り扱いが重要となる．前述の PONTIS では，異なる時間軸上で発生する費用に対して割引率を用いて現在価値に換算する割引現在

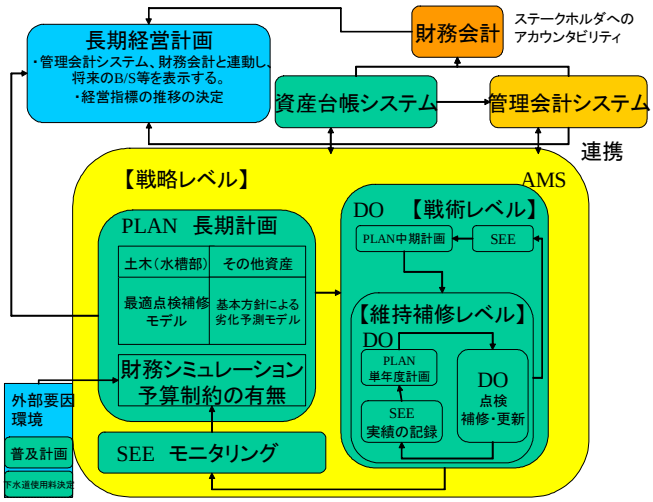
価値法を採用している．一方，割引率を用いたライフサイクル費用評価は，長寿命化の効果を積極的に評価できないという観点[2)]から，貝戸らは，将来時刻に発生するライフサイクル費用を年平均費用に置き換えて評価する平均費用法を用いた最適補修政策を決定する手法を提案している[5)]．さらに，青木らは，平均費用法による最適補修政策導出モデルを搭載したBMSを報告している[6)]．そこで提案されているBMSは，橋梁システム全体の維持管理を対象とした場合に，各会計年度における維持補修実績に基づいて橋梁システム全体の維持補修実績のパフォーマンスを評価するための橋梁資産評価と予算管理を目的とした管理会計システムを提案している．また，道路舗装を対象とした補修計画の最適化に関する研究[8)-11)]やアセットマネジメントシステム[12)]について，いくつかの研究成果が報告されている．山本らは道路付帯施設を対象とした，施設の点検や補修のタイミングを同時に求め施設管理者の意思決定を支援するようなシステム（Fasys-AM）の提案をしている[13)]．Fasys-AMは，数多くの施設が道路上に設置されているような道路付帯施設をモデルとして，その点検・補修の最適補修政策を導出するシステムである．さらに，施設全体を管理するうえでの予算計画機能を含めたFasys-AMアプリケーションを開発している．また下水道のアセットマネジメントシステムも研究が徐々に蓄積され始めている。プロジェクトレベルでは堀らの下水処理施設の最適点検補修モデルで処理槽に関して平均費用法を用いたマルコフ劣化モデルが提案されている[14)]。また堀らの下水処理施設の維持管理会計システムでは上のモデルを含んだ下水処理施設全体の資産を対象とした管理会計システムの構築を提案している。本研究では、公営企業として独立採算制をとっている経営体制の中で、現場の技術管理者の視点が下水道管理者の意思決定に直接・迅速に反映することが可能になるSAMSの提案をする。本研究で提案するSAMSと併せて下水道処理施設の維持管理会計システムを適用すれば、SAMSを通じて下水道管理者が気にする経営指標の将来の変化が財務シミュレーションによって明らかになり、また将来あるべき経営指標への経営計画についての資料を得ることができる。

特徴として主に財務会計シミュレーションと管理会計シミュレーションを有機的に繋げた財務シミュレーションを行う。これによって、管理会計で、下水道のサービス水準を保つための情報を提供し、その情報を用いて、本来公表される財務会計の勘定科目がどのような水準であるかを示し、企業債の発行限度、補助金の制限等を切り抜けるシミュレーションを提供する。また、財政計画としての企業債残高を減らす戦略として、アセットマネジメントシステム導入の有用性を検証する。

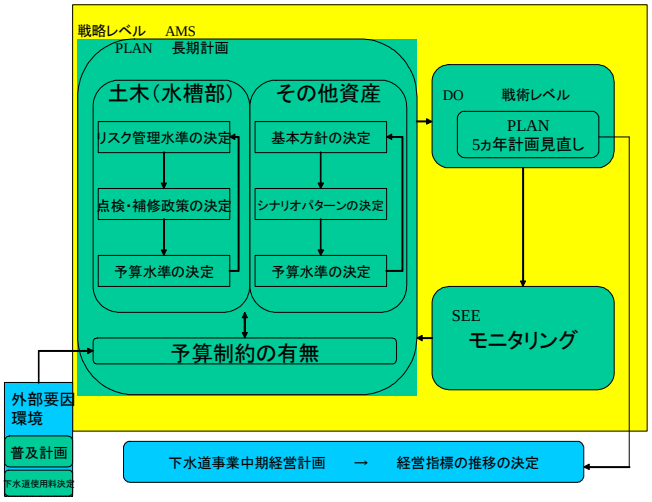
2.2　下水道アセットマネジメント

下水道事業に供する資産群は管渠、ポンプ場、浄化センター（下水処理施設、汚水処理施設）のそれぞれ複数の組み合わせである。また、それらは、土木構造物、機械、電気（計測器）、建築のように分類することができる。これらの種々の機能を持った資産群は始めに述べたように下水道サービス水準を保ちながら、維持・点検・補修・更新時期の最適化を通じて、ライフサイクル費用を低減する必要性が高まっている。本研究では、それらの資産群を対象としたアセットマネジメントシステムを構築することを目的としている。その中で、本研究の適用事例では、下水処理施設を取り扱う。この下水処理施設では、下水処理槽が直列に配置され、処理システムのリダンダンシーが確保されていない場合が多い。このような下水処理施設では、下水処理槽の点検・補修を実施する際、排水を実施するために下水処理施設の操作・運用を一時的に停止せざるを得ない。したがって、下水処理施設の点検・補修業務を限られた時間の範囲の中で、集中的に実施することが必要となる。ある一定の時間間隔において点検を行い，点検結果に応じた補修を実施する．さらに，施設の劣化は不確実性を含んでおり，点検時において施設の劣化に対するリスクを許容しなければならない．このことから，下水処理施設の管理指標として，点検・補修の政策とその政策を適用した際の施設の劣化リスク（リスク管理水準）及びライフサイクル費用の関係を示すこととなる．この劣化リスクとライフサイクル費用はトレードオフの関係にある．

図－１,図－２にSAMSの全体構成と戦略レベルの内容を示す．戦略レベル（長期計画）において，対象施設についての点検・補修・更新の政策の最適化及び維持管理費の推移について長期的に予測を行い，必要な予算を調達する．土木構造物の下水処理槽に関しては、その際，あるリスク管理水準を所与として，管理水準を達成するために必要となる点検・補修・更新の定常政策を決定し，年平均費用水準をシミュレーションによって求めることが重要な課題となる．一方でその他資産に関しては、資産の損傷度評価、劣化予測等に関して基本方針を決定し、用意したシナリオパターンより各資産の最適なシナリオパターンの組み合わせを求める。また，年間の予算に制約がある場合に，制約予算が施設の劣化・補修過程に与える影響を分析することも必要となる．本研究では、長期経営計画に有用な資料を提供することを目的としている。戦術レベル（中期計画）においては，戦略レベルにて決定した各期予算にしたがって，管理対象となる各施設群への予算の配分を検討する．配分された予算



図–1 SAMSの全体構成



図–2 戦略レベルの内容

の範囲内で，管理水準の目標値と点検・補修・更新政策の見直しを行う．維持補修レベル（単年度計画）では，単年度に点検・補修・更新を実施する対象施設を決定し，計画にしたがって点検・補修・更新を実施する．各期の予算の範囲内で，計画にしたがった点検・補修・更新をすべて実施できない場合は，当該年度の補修・更新の繰越量として記録され，次年度以降の計画に反映され，５ヵ年計画の見直しが行われる．アセットマネジメントにおいてライフサイクル費用評価を行うために，資産群の将来の劣化特性を予測する必要がある．ライフサイクル費用評価の信頼性は，劣化予測モデルの精度に大きく依存する．下水処理施設に関して本システムでは，堀らが提案した下水処理施設の水槽部では損傷度別補修データを用いて蓄積された実測データから将来の劣化過程を予測するモデルを用いている．以下では，特にSAMSの核となる機能を担う下水処理施設の水槽部の劣化予測モデルの推定方法，最適点検・補修政策の導出モデル，劣化・補修過程のシミュレーションの概要について説明する．下水処理施設の最適点検補修モデルの詳細は、参考文献[14]に譲るが、ここでは、読者の便宜を図るために簡単に紹介しておくことにする。

3 SAMS構築のための検討（AMS)

3.1 下水処理施設水槽部の最適点検・補修モデルの導出

以下では、堀ら[14)]が提案した下水処理施設の最適点検補修モデルの説明をする．現時点では,下水処理施設の土木構造物のコンクリート版の劣化過程に関するデータはほとんど蓄積されておらず,入手可能な補修タイプ別の補修工事量の集計的劣化情報を用いて,コンクリート版のマルコフ劣化モデルを作成する.そして,下水処理施設のコンクリート版の最適点検・補修間隔を決定するためのマルコフ決定モデルを定式化する.

下水処理槽は複数の大きさや劣化の異なる複数のコンクリート版で構成される.今コンクリート版 k に注目する.このコンクリート版 k の中で劣化の程度が違う部分が存在し,コンクリート版の各損傷度の割合は時間的変化をする。そこで初期時刻t_0を起点とし，無限遠に続く離散的時間軸

$$t_r^d = t_0 + rd \ (r = 0, 1, \cdots) \tag{1}$$

を導入し,さらに補修政策ξを決める.これは,各損傷度の状態で補修するかしないかを決定する戦略変数マトリックス$\boldsymbol{Q}(\xi)$を用いる.補修政策ξは適用事例のところで具体例を挙げている．損傷度をM個の離散的なレーティング指標で表し,点検間隔をdとしたとき,時刻t_r^dにおける各損傷度の割合を以下のように相対頻度として定義する.

$$\boldsymbol{\pi}^{\xi}(t_r^d) = \left\{\pi_1^{\xi}(t_r^d), \cdots, \pi_M^{\xi}(t_r^d)\right\} \tag{2}$$

但し,コンクリート版 k の損傷別延べ面積$a_i^{\xi}(t_r^d)$を総面積S^kを用いて基準化し,損傷度iの相対頻度$\pi_i^{\xi}(t_r^d) = a_i^{\xi}(t_r^d)/S$で表すとする．相対頻度の定義より，

$$\sum_{i=1}^{M} \pi_i^{\xi}(t_r^d) = 1 \tag{3}$$

が成立する.

なお，相対頻度は，時刻t_r^dにおける補修アクションが実施された後の状態で定義されている．さらに，コンクリート版の劣化・補修過程をモデル化する際に、時刻t_r^dの補修アクション実施後の状態から、時刻t_{r+1}^dにおける補修アクション実施後の状態への推移状態を表す確率$\boldsymbol{P}(\xi)$を定義することが必要である。$\boldsymbol{P}(\xi)$を点検補修政策ξの下における時刻t_r^dと時刻t_{r+1}^dの間における損傷度推移確率を表現している.このとき、時刻t_{r+1}^dにおける相対頻度は

$$\pi_j^{\xi}(t_{r+1}^d) = \sum_{i=1}^{M} P_{ij}^{\xi} \pi_i^{\xi}(t_r^d) \tag{4}$$

と表現できる.上式をベクトル表記すれば,

$$\boldsymbol{\pi}^{\xi}(t_{r+1}^d) = \boldsymbol{\pi}^{\xi}(t_r^d)\boldsymbol{P}(\xi) \tag{5}$$

である。下水処理施設の点検・補修過程が繰り返され，長期定常状態に到達したとする．コンクリート版の損傷度に関する定常確率ベクトルを$\boldsymbol{\pi}^{\xi} = (\pi_1^{\xi}, \cdots, \pi_M^{\xi})$と表そう．定常確率は

$$\boldsymbol{\pi}^{\xi} = \boldsymbol{\pi}^{\xi}\boldsymbol{P}(\xi) \tag{6}$$

を満足するような$\boldsymbol{\pi}^{\xi}$として定義される．したがって，長期定常状態に達した時の，点検前における損傷度に関する定常確率$\boldsymbol{\Pi}^{\xi} = (\Pi_1^{\xi}, \cdots, \Pi_M^{\xi})$は

$$\boldsymbol{\Pi}^{\xi} = \boldsymbol{\pi}^{\xi}\boldsymbol{p}(\xi) \tag{7}$$

と表せる．施設のリスク管理水準を$\bar{U}$と表し，点検前における損傷度Mの定常確率Π_M^{ξ}を，リスク管理水準$\bar{U}$以下に抑えることが可能な補修政策の集合$\Omega(\bar{U})$を,

$$\Omega(\bar{U}) = \{(d, \xi) | \Pi_M^{\xi} \leq \bar{U}\} \tag{8}$$

と定義しよう．この時，リスク管理水準$\bar{U}$を所与とした時に，下水処理施設全体の土木構造物のライフサイクル費用を最小とするような補修政策を求める最適点検・補修政策モデルは,

$$\min_{d,\xi}\{\sum_{k=1}^{n} \frac{w_k^{\xi}(i)}{d}\} \tag{9a}$$

$$\text{subject to } (d, \xi) \in \Omega(\bar{U}) \tag{9b}$$

$$(i = 1, \cdots, M)$$

と定式化できる.

但し、下水処理施設全体でのコンクリート版の数をｎとし、$w_k^{\xi}(i)$は下水処理施設の点検・補修過程が定常状態に入った場合の時刻t_r^dにおいて，時刻t_1^dの直前までに補修政策ξの下で必要となるコンクリート版kの平均費用であり、コンクリート版kの推移確率行列$\boldsymbol{p}^{k\xi}$と損傷度別の補修工法単価である$c_j^{j'k}$と補修政策行列の$\boldsymbol{q}^{\xi}$を用いて以下のように表せる．

$$w_k^{\xi} = \sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{M}\sum_{j'=1}^{j} p_{ij}^{k\xi} q_{jj'}^{\xi} c_j^{j'k} S^k \pi_i^k \tag{10}$$

よって下水処理施設全体の土木構造物の補修平均費用w^{ξ^*}は

$$w^{\xi^*} = \sum_{k=1}^{n} w_k^{d^*} \tag{11}$$

である。

3.2　劣化予測モデルの推定

3.3　点検・補修過程のシュミレーション

この目的は下水処理施設の土木施設の水槽部の資産に関して、年平均費用の推移をシミュレーションによって予測することにある。土木施設の水槽部の資産の将来の劣化過程はマルコフ劣化ハザードモデルにより推定した劣化確率に従って推移するものと過程しているが、多大な不確実性を有しており、このことも将来の需要予測に影響する。ここでは、このような不確実性下において、施設の現在の管理状態を考慮した上で将来時点における費用及び損傷度推移をシミュレーションによって予測するものである。

時刻t_{r+1}^d直前までに発生する修繕費用の期待値は

$$w_k^{\xi} = \sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=1}^{M}\sum_{j'=1}^{j} p_{ij}^{k\xi} q_{jj'}^{\xi} c_j^{j'k} S^k \pi_i^k(t_r^d) \tag{12}$$

であり、

下水処理施設全体の土木構造物の補修平均費用w^{ξ}は

$$w^{\xi^*} = \sum_{k=1}^{n} w_k^{d^*} \tag{13}$$

である。

シミュレーションを行う場合，処理槽のコンクリート版ｋの損傷度といった初期状態を与件として設定する．以上の手順によって，システムの劣化・補修過程をシミュレートすることができる．なお，本モジュールのシミュレーションでは，モンテカルロ法により擬似乱数を発生させ，各施設の劣化・補修過程を表現するサンプルパスを発生させている．サンプルパスの試行回数は任意に設定することが可能である．発生させたサンプルパス上で評価した年平均費用を多数のサンプルパスに対して平均化操作を行うことにより，各年時で発生する年平均費用の期待値を求めることができる．

a) シミュレーション条件の設定

最適な点検・補修政策を抽出した結果と、マルコフ劣化ハザードモデルをもとに、施設の劣化・補修過程のシミュレーションを行い、各期の補修需要の予測、必要予算、予算制約による損傷度への影響を分析する。シミュレーションの条件として、シミュレーション期間（年)、コンクリート版のメッシュ分割数、年間予算の制約条件、モンテカルロ法により擬似乱数を発生させる回数などを設定する。

b) シミュレーションの出力

シミュレーションの結果は，経年的な損傷度分布，各期の平均費用推移をコンクリート版毎あるいは全水槽部を合計した値を，グラフによって示すことにより視覚的に表現する．また予算制約によってある補修年度に最適な修繕計画を実行できない場合の補修の優先順位を決定し，優先的に補修をおこなうコンクリート版のリストを一覧として表示する．

表－１　予算制約下での優先順位の方針

コンクリート版	損傷度４の割合	優先順位
硫酸腐食	多い	1
		2
		3
	少ない	4
中性化	多い	5
		6
		7
	少ない	8

3.4　管理会計システム

アセットマネジメントシステムと下水道資産台帳システムによるデータより，下水道事業の維持補修に必要な予算を自律的に取得するための管理会計情報を作成する．シミュレーションにより将来の会計年度毎の固定資産（再調達価額），繰延維持補修引当金，維持補修引当金繰入額，不足維持補修引当金繰入額、不足維持補修引当金の情報を提供する．

3.5　予算制約の問題

修繕費に関しては、多くの場合予算制約を考える必要はない。なぜならアセットマネジメントシステム導入より、技術に裏付けられた将来の修繕費の見積もりが可能になり、それらは、企業会計での引当金としての性質を満たし修繕引当金として費用を平準化することができるからである。つまり、土木構造物の資産に関しては、予算制約の問題を極力回避することができる。以下ではそれでも予算制約がある場合についての対処を述べていく。前にも述べたようにリスク管理水準は、硫酸腐食と中性化を劣化要因とするコンクリート版で別々のリスク管理水準を用いる。ここで、最小の年平均費用を求める上のリスク管理水準は劣化速度が速い硫酸腐食対象のもので決まる。したがって、最適点検間隔での修繕では、中性化を劣化要因とするコンクリート版のリスク管理水準は本来の水準よりも厳しく設定してある。ゆえに、予算制約があった場合、中性化を劣化要因とするコンクリート版の補修を控えて、硫酸腐食対象のコンクリート版の補修を優先的に行うというのが合理的である。これらの優先順位付は表-１のような考えによって決めることとする。

3.6　追加維持補修費

経営計画の収益的収支の計画作成段階で、将来の下水道使用料と他会計からの繰入の予測が思わしくない場合、費用項目の削減が一時的に必要なことがある。その中の維持補修費に削減が必要な場合、維持補修費の予算制約の問題となる。収益の変動が予測可能であるなら、最適な維持補修計画に予算制約がある年度に修正を加える必要がある。それには、2つの方法が考えられる。１つは、事前的対策で、最適補修間隔より、短い年度での補修をする方法である。この方法で修繕すると、最適補修間隔による維持補修費より、少ない費用で修繕することが可能である一方、リスク管理水準に観点からするとあまり劣化していない状態での修繕になることから効率的ではない。もう一つの方法は、事後的対策で最適補修間隔による維持補修費よりも維持補修費がかかるが、リスク管理水準では、中性化のコンクリート版に関して、管理値基準を下げることにより、より望ましいリスク管理水準に近づくことが可能となる。これらのどちらがよいかは、今後の経営計画上の各年度のキャッシュの状況を知ることによって決定することになる。このキャッシュの把握に関しては、後のその他資産のシミュレーションの処で述べる。また実際にAM導入後で最適点検補修計画通りに実施できない場合についても考慮が必要となる。点検補修間隔内で必要予算額が取れない場合でも、点検補修年度までに、維持補修に必要な金額を確保できれば、計画通りに行っているとしても何の問題はない。しかし、点検補修年度までに、維持補修に必要な金額を確保できていても、実施すべき維持補修がその年になされなかった場合、その次の年は最適点検補修年度の点検前の損傷度分布より劣化が進んだ損傷度分布になる。その場合、次の維持補修時に追加で必要となる費用は以下のように求めることができる。現在がt_nであるとすると、追加維持補修費用は

$$z=\sum_{k=1}^{n}(\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{M}p_{ij}^{1k}\Pi_{i}^{k\xi}c_{j}^{1k}S^{k}-\frac{w_{k}^{d^{*}}(d^{*}+1)}{d^{*}})$$

表－２　平成１９年度資産台帳システムの記述内容（一部）

機械、建築、計測器等							
資産コード	施設名	機器名	標準耐用年数	経過年数	調査時損傷度	再構築費用	管理方法
3	沈砂池ポンプ棟	自動除塵機	２０	２６	２．３	３１４８０千円	状態監視
8	沈砂池ポンプ棟	ベルトコンベア	２０	２６	２．６	９６９０千円	状態監視
11	沈砂池ポンプ棟	沈砂掻揚機	２０	２６	２．１	２９２７０千円	状態監視
･･･	･･･	･･･	･･･	･･･	･･･	･･･	･･･
土木構造物							
資産コード	施設名	エレメント	経過年数	損傷度			
				1	2	3	4
253	最初沈殿池	頂版	２６	８０％	１５％	５％	
253	最初沈殿池	底版	２６	９９％	１％		
253	最初沈殿池	側壁W1	２６	９９％	１％		
253	最初沈殿池	側壁W2	２６	７５％	２０％	５％	
253	最初沈殿池	側壁W3	２６	７０％	２０％	１０％	
･･･	･･･	･･･	･･･	･･･	･･･	･･･	･･･

(14)

で計算できる。但し、p_{ij}^{1k}は、１年後のコンクリート版ｋの劣化推移状態を表す確率である。毎年、年平均費用を計上しているので、次年度に追加で必要な額は点検補修年から経過１年後の維持補修費用から次年度t_{n+1}の年平均費用と昨年までの累積の年平均費用（平均費用）を引いたものを各部材ごとに足し合わせたものを不足繰延維持補修引当金としてB/Sに計上することになる。そして次年度に点検補修が行われた場合は、計上している繰延維持補修引当金と不足繰延維持補修引当金の該当分が取り崩されることになる。また１年を経ても補修が実施できなかった場合、今年に計上した不足繰延維持補修引当金を洗替法により次年度に取り崩し、次年度の点検前の損傷度分布より計算された維持補修費用から年平均費用と平均費用を引いたものを次年度の不足繰延維持補修引当金としてB/Sに計上することになる。

4　その他資産のシミュレーション

その他資産のシミュレーションに用いる基礎データは堀らの下水処理施設の維持管理会計システムの論文で説明した下水処理施設の資産台帳システムの情報を用いる。今研究では、ある地方自治体のアセットマネジメント導入委員会の維持管理方針に従って、その他資産に関して、LCC最小化を求め、その上で最適な維持補修計画を立てる。以下では、維持管理の基本方針の説明からシナリオの設定までの説明をする。

4.1　維持管理の基本方針

現時点の損傷度評価を行う。損傷度のランク分けに関しては図－３の通りである。損傷度の判定方法、判定基準の設定方法について説明する。損傷度の判定は、施設・設備において、個々の施設・設備の損傷度を支配する機能、構成要素の抽出を行うことから始める。次に抽出を行った要素ごとに判定方法・判定基準を設定し、これらの判定基準を踏まえた損傷度判定表を作成し、施設の詳細調査を行うことで損傷度を把握する。判定基準は公平に偏りなく設ける必要がある。損傷度判定項目や判定基準は施設・設備の種類によって異なる。次に損傷度予測について説明する。損傷度予測は、現在の損傷度と過去の履歴を元に今後の損傷度を予測し、一定レベルの損傷度を維持する資産管理を行うことで、経済的で安定した処理場運営を実施するために行う。損傷度予測曲線の作成の仕方は以下のようになる。図 -? のイメージでは、設置5年後の損傷度のみが分かっていたケースで、設置当初の損傷度（損傷度５）と設置5年後の損傷度を直線的に結ぶことで当初設定を行い,その後の損傷度判定において順次補正をしていくこととした場合の損傷度予測曲線を示している。

4.2　シナリオの設定

堀らの下水処理施設の維持管理会計システムで施設・設備の管理・保全方法の分類について説明し、管理会計構築のために、各資産の特徴に合った、管理・保全方法の組み合わせを考えたが、ここでは、シナリオ設定のために各資産に関して、この3つの管理・保全方法それぞれを考慮したシナリオパターンによって、ある将来の期間

土木・建築の損傷度判定区分

判定区分	運転状態	措置方法
4	機能上問題ないが、劣化の兆候が現れはじめた状態	措置は不要（維持管理で対応可能）
3	劣化が進行しているが、機能は確保できる状態	劣化が進行。修繕により機能回復する。
2	機能しているが、劣化の進行度合いが、大きい状態。	再構築または、大規模な修繕が必要。
1	機能が果たせない状態	再構築が必要。

機械・電気設備の損傷度判定区分

判定区分	運転状態	措置方法
5	設置当初の状態で運転上・機能上問題ない。	措置は不要
4	安定運転ができ、機能上問題ないが、劣化の兆候が現れはじめた状態	措置は不要（部品交換等）
3	劣化が進行しているが、機能は確保できる状態	部品交換等の修繕により機能回復する。
2	設備として機能を発揮できない状態。機能回復が困難。	機密点検や設備の再構築等、大きな措置が必要。
1	動かない。機能停止	設備の再構築等、大きな措置が必要。

図–3 損傷度判定区分

表－３ 3つのシナリオパターン

シナリオ０ 標準耐用年数で再構築
シナリオ１ 機能限界で再構築
シナリオ２ 管理基準で修繕、目標耐用年数経過後、機能限界で再構築

表－４ 管理・保全方法とシナリオパターンの組み合わせ

管理保全方法	状態監視保全	時間計画保全	事後保全
シナリオ０	●	●	●
シナリオ１	●		●
シナリオ２	●		

に亘って発生する維持管理費用、再構築費用を計算し、LLCを算定する。各資産に関して、表-３のように3つシナリオパターンを設定する。また、保全方法とシナリオパターンの組み合わせは表-４のようになる。現資産を第1世代として、以降再構築するたび資産の世代が代わると定義する。一つの資産の第１世代と第2世代で最適シナリオパターンの組み合わせの決定し、全体のその他資産の維持補修費用の最小化を計り、最適維持補修計画を提案する。

また、保全方法とシナリオパターンの組み合わせは表－４のようになる。

5 FPS

下水道事業は公営企業という企業体ゆえに基本は独立採算制をとっている。１．はじめにでも述べたように、下水道事業は他会計からの繰入れや企業債発行での資金調達ゆえに、財務体質が極めて悪い。しかし、財務体質の悪化には、その原因の他に企業債の制度的な問題が大きな障害になっていると思われる。企業債の設定においては、財務省で決められており、償還期間は30年と資産にかかわらず一定であり、基本的に繰上償還や借換等が自由にできない。この企業債の硬直性により、耐用年数が長く構造的に資金不足な資産の存在や資金余剰があるときでも、企業債を繰上げ償還できずに、支払利息を払い続けるといった問題に直面することになる。現在では、利率が極めて高い企業債という条件に当てはまる企業債に関して、繰上償還を行う予算を確保している状態であ

るが、ほんの少数の地方自治体が恩恵を受けるに留まっている。本研究では、この企業債の硬直性による、一時的な資金不足や余剰に関して、LCCの最小化の維持補修計画上で解消する手段を提供する。これによって、支払利息の削減、企業債残高の早期削減に寄与することができる。以下で説明する各資産ごとのC（キャッシュ）の推移を検討することによって、債権削減政策に基づいて資産の2世代目以降、企業債を発行しないもしくは発行額の削減が有用である資産を決定し、LCC最小化の上で企業債削減、支払い利息の削減を達成することができる。

5.1　C（キャッシュ）の設定

公営企業は企業債を発行して、施設等を構築している。この企業債は企業が発行する社債とは違い、自由に手持ちに資金があっても繰上償還できない。このように公営企業での資金が余っているときにも支払利息を払わなくてはならないという状況を打破するために各資産の2世代以降または新規取得時に、企業債の発行をしないもしくは発行額の削減が有用である資産を決定し、LCC最小化の上で企業債削減、支払い利息の削減を達成することが望ましい。そのための各年度の資金が余剰か不足を把握するために各資産に関して、1年にどれだけC(キャッシュ）が出ていくのかを表す指標としてCを提案する。これは、下水道管理者にとって重要な指標である企業債残高を減らすシナリオパターンを見つけるためのものである。算定方法は、減価償却費－年企業債償還額である。前シミュレーションにより求めた維持補修計画と併せてCのシミュレーションを行うことで、各パターンの組み合わせごとに年度の企業債にかかる支払利息、企業債残高等を計算できる。

5.2　債権削減政策

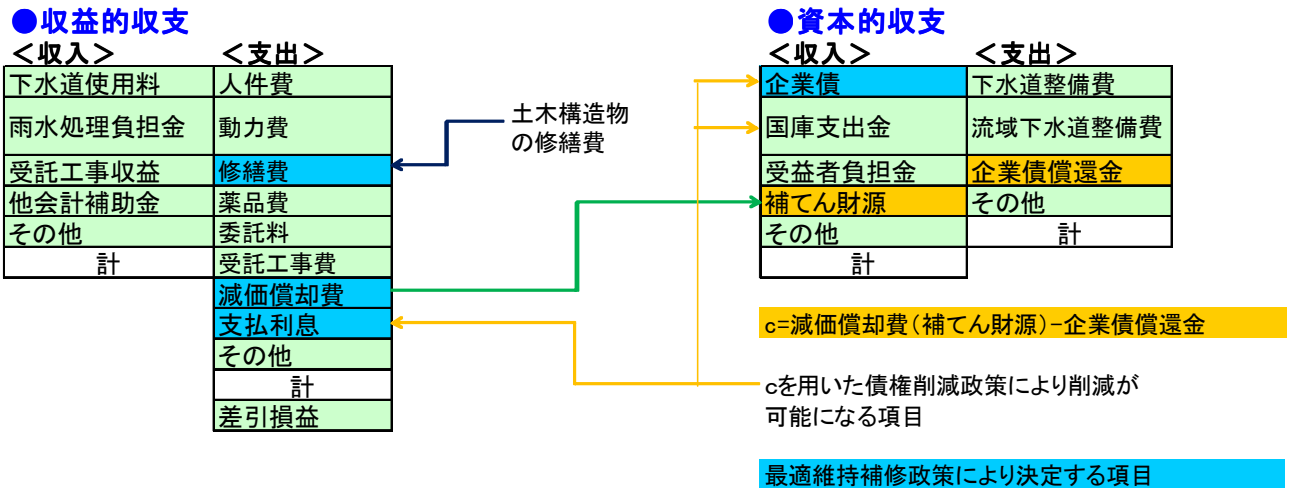
また、支払利息を減らすためにどの資産から企業債発行をやめていくかという問題に関しては、資産の耐用年数と償還期間の長さに着目し2つの債権削減政策を定義する。償還期間等の企業債の設定においては、財務省で決められており、償還期間は30年と資産にかかわらず一定である。一方各資産の耐用年数は種類によってまちまちである。つまり、資産の耐用年数が長い場合、減価償却費による資金回収前に償還期間が来てしまう為に構造的に資金繰りが上手くいかない。逆に資産の短い場合は、資金に余裕が生まれるという資産によって、差が生じているのである。本研究では、債権削減政策１で、Cの余剰資金を耐用年数が短い資産から適用していくとする。この政策１では、耐用年数が短い資産の企業債に充てるために、多くの支払利息削減が見込まれる。また債権削減政策２では、Cの余剰資金を耐用年数が長い資産から適用していくとする。こちらの政策は資金不足に陥りやすい建築や土木構造物の資産を優先的にCで充てることによって、債権を効率的に減らそうというものである。また一般に、電気機器のような時間管理保全をする資産に関しては、法律によりもともとその他資産シミュレーションで説明したシナリオ０に近いパターンにする必要がある。この資産は早期に資産金額を回収することができ、そのCを使い、運用をうまくすることによって、土木、建築のような慢性的な資金不足にある資産に関してCで賄うことができることが期待される。

5.3　予算制約の問題

予算として考えられるのは収益的支出の修繕費と資本的支出の下水道整備費である。３．５で述べたように修繕費に関しては、予算制約を考える必要はない。なぜならアセットマネジメントシステム導入より、技術に裏付けられた将来の修繕費の見積もりが可能になり、それらは、企業会計原則にある引当金としての性質を満たし修繕引当金として費用を平準化することができるからである。つまり、土木構造物の資産に関しては、予算制約の問題から回避されたといってよい。また、その他の資産で状態監視保全である資産に関しては、規模が大きいが再構築費用に比べ、修繕費が少なく、これらと土木構造物の資産による修繕引当金の額で予算制約に引っかかることはないと思われる。ここでは、もっぱら予算制約といえば資本的支出である下水整備費に関するものとする。是に関しても前節で説明した債権削減政策により、下水整備費の支出を賄うCを増大させることによって、回避が可能である。しかし、急な膨大な支出増に関しては対応できるものではない。その場合は予算制約の問題として考える必要がある。これに関しては今後の課題とする。

5.4　最適維持修繕計画と債権削減政策の関係

図-４を見ていただきたい。これは、ある地方自治体の決算資料の一般的な雛型である。今まで説明してきた土木の水槽部の最適点検補修モデルやその他資産のLCC最小化（以下、前両者を最適修繕計画とする)、債権削減政策のアウトプットがどう予算に反映していくのかについて述べ、続いて最適維持修繕計画と債権削減政策の関

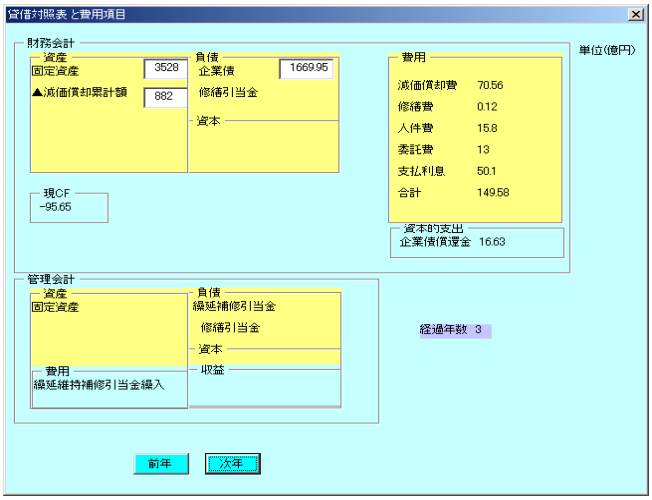


図–4 最適修繕計画と債権削減政策の関係

係の関係について述べていくことにする。この資料は決算であるが、予算と作成要領は同じであるのでこの資料での説明でも問題はない。まず下水処理施設の土木の水槽部の関しては、堀らの最適点検補修モデルに基づいて、またその他資産に関しては、ある地方自治体のアセットマネジメント導入委員会の維持管理方針に従って、LCC（平均費用）最小化を求め、その上で最適な維持補修計画を立てる。ここで求まるのは、シミュレーション期間内の収益的収支の支出の項目の修繕費、減価償却費、支払利息である。土木の水槽部の修繕に関しては、実務上、資本的支出ではなくて、収益的支出に属し、修繕費の項目に該当する。またその他資産の維持補修計画で計上された再構築費用は、資本的支出の下水道整備費に該当し、翌年以降、残存価値を除いて、耐用年数の期間均等配分する。その費用は収益的支出の項目の減価償却費に該当する。また再構築費用は、その財源を一般的には企業債を発行することによって調達する。この企業債は、翌年から利息を払い、５年据え置き後、企業債の償還を行うことになる。利息は収益的支出の支払利息へ、企業債償還金は資本的支出の項目に計上することになる。次に債権削減政策について述べる。以前に述べたように、ｃを減価償却費-企業債償還金と定義した。減価償却費の実務的意味は内部留保のために、また本来の資産の資金回収のためである。そこで、収益的支出の減価償却費は、資本的収益の補てん財源の方へ移される。このようにすれば、企業債償還金と相殺が可能になるからである。そしてこのｃはすなわち補てん財源-企業債償還金となる。つまり、ｃの余剰、不足の実務的意味は、補てん財源が企業債償還金以外にも充てられるか、企業債償還に要する資金を補てん財源のみならず資本的収益（企業債発行等）も必要とするかである。ここで債権削減政策を考えてみると、単に補てん財源が企業債償還金よりも大きいときに、同じ年に取替えを予定している資産を企業債発行による資金調達ではなくて、補てん財源で賄うことに他ならない。つまり、債権削減政策の目的は、現場のエンジニアにより決定された下水処理施設の最適サービス水準を満たすように、策定した維持修繕計画の資金調達計画に関して、資金調達計画を立てるためのものである。したがって、最適修繕計画と債権削減計画の関係は、土木屋（機械屋、電気屋等）の維持修繕計画と財務屋の財務計画を会計が繋いでいるのである。この関係は、唯維持修繕計画から財務計画への一方方向ではなく双方向の関係である。なぜなら、エンジニアにとって悩みの種である、予算制約の問題を解決するものだからである。つまり、両者が一つになって、下水道事業の長期経営計画に資する材料を提供できるのである。また、本報告書の題名が財務シミュレーションとしているのも、財務計画を含めてシミュレーションを行うという意味がある。

5.5　最適なシナリオパターンが存在しない場合

実際、将来望むべき経営指標に達するシナリオが現時点で存在しない場合、収益構造の部分の修正を加える。これはすなわち下水道料金の改定を含む売上の変更である。下水道の料金を上げるには住民の理解を必要とする。しかし、何の説明なしに料金を上げるのではなく、コストの削減の限界を示すデータをAMSから得ることができ、それを用いて、説明すればアカウンタビリティとしては十分である。これによって当該事業管理者にとって、最適な経営計画を立てることが容易になり、また実行することもAMSを用いてすれば、実行不可能ではない。



図–5 アウトプット画面

5.6　資産運用

普通の社債であれば、キャッシュが余っている場合、繰上償還ができる。しかし企業債にはそのような制度が存在しない。したがって、キャッシュが余っている場合は別の方法により、うまく処理する必要がある。そこで本研究では、ある期間余っているキャッシュを有効利用するため資金運用を取り入れる。資金運用の内容は、銀行に貸した場合の金利で運用すると仮定する。

6　適用事例

本研究では、ある地方自治体の下水道事業に関して、下水道アセットマネジメントシステムを構築し、財務シミュレーションを行った。現段階では、このシステムのアプリケーションを構築していないが、参考までに、アウトプット画面を表示しておく。

6.1　最適点検・補修政策の導出

ある地方自治体の下水処理施設の土木構造物（水槽部）に関して、3章で述べた最適点検補修モデルを適用した結果として、補修政策2における費用-リスク曲線は図-7のようになった。但し、ここでのリスク管理水準は硫酸腐食を対象としている。また補修政策に関しては図－6を参照されたい。本研究で、硫酸腐食対象のリスク管理水準を0．25とすると、最適点検補修間隔は9年と定まる。

表－5　各損傷度別の修繕単価（最終沈殿地の側壁部例)

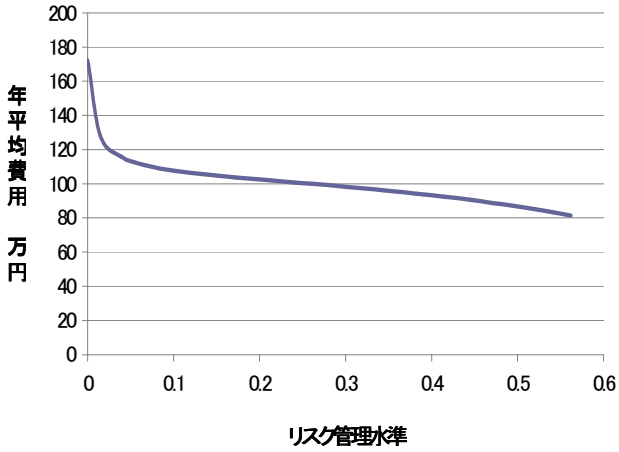
損傷度	補修工法と単価			
1	なし			
2	劣化部除去（小）9200円	鉄筋処理工（小）14700円	断面修復工（小）34900円	合計 58800円
3	劣化部除去（中）18400円	鉄筋処理工（中）44400円	断面修復工（中）88650円	合計 151450円
4	劣化部除去（大）18400円	鉄筋処理工（大）59400円	断面修復工（大）126350円	合計 204150円

6.2　土木構造物の点検・補修過程のシミュレーション

次に，下水処理施設に関して，点検・補修・更新過程のシミュレーションを行い，費用の推移と健全度分布の推移を分析する．北部浄化センターの下水処理施設の総資産は482あり、共用開始から26年が経過しており，何

補修政策集合	
1	損傷度4になれば直ちに補修を実施し、損傷度1に回復
2	損傷度3，4になれば直ちに補修を実施し、損傷度1に回復
3	損傷度2、3、4になれば直ちに補修を実施し、損傷度1に回復

図–6 補修政策集合

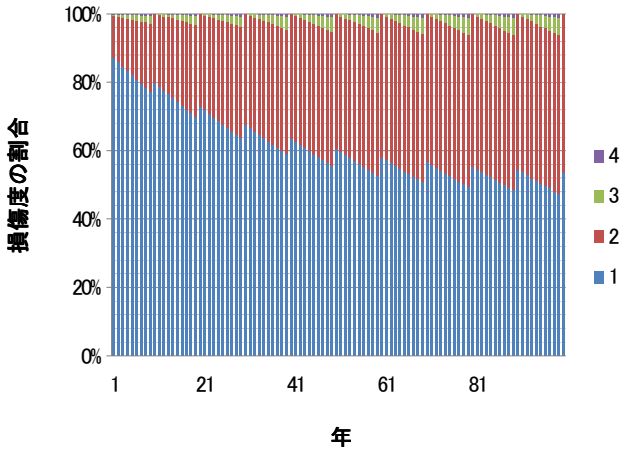


図–7 費用-リスク曲線（補修政策２）

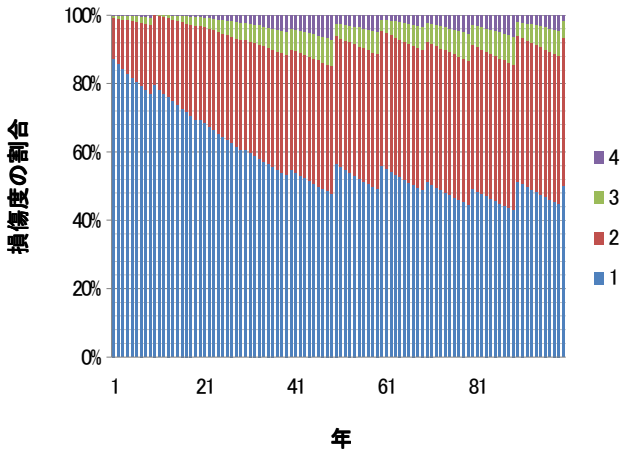
回か修繕がされている状態である。その中の土木構造物に関しては主な劣化要因に硫酸腐食と中性化がある。それらは劣化速度が異なる。最初沈殿池、エアレーションタンクが硫酸腐食による劣化が、最終沈殿池は中性化による劣化が支配的である。前者では、ほとんどが修繕から５年目，後者は、修繕して間もないものと修繕から９年目の資産群で構成されている。本研究では、堀らの最適点検補修モデルの有用性を示すことも兼ねて、現時点での下水道事業で行われている土木の補修方針に従った場合のシミュレーションも併せて行う。以下では、その補修方針について述べていく。基本的に下水処理施設の補修は機械の処理機能の重要性を鑑み、機械を主、土木を副という、機械の取替・補修をする際に土木構造物の劣化が激しいところを補修するという方針を採っている。この方針は現場の人の判断によるもので、それらの判断基準として、リスク管理水準を用いても本質的に同じである。つまり、最低損傷度４の割合が多いコンクリート版から補修するというものである。本研究のシミュレーション分析の条件として，最適点検補修モデルでは補修政策２を採り、現状の補修方針は損傷度４を0.08以上を補修するとして、各資産の修繕からの年数を初期条件として与えるものとする．シミュレーション期間を200年，メッシュ分割を100とし、シミュレーション回数を500回と設定した．シミュレーション回数は任意に設定できるが，試行の結果，シミュレーション回数を500回程度で安定した結果が得られている．

図－８、９に最適点検補修モデルと現状政策の最終沈澱池の水槽部の側面の気相部の経年的損傷度分布の状態

を示している．モデルでは損傷度２の占める割合が多くなっていることがわかる．これは補修政策２を適用しているため、損傷度２の部分を修繕しないためである．



図–8 損傷度分布の推移(最適点検補修モデル)

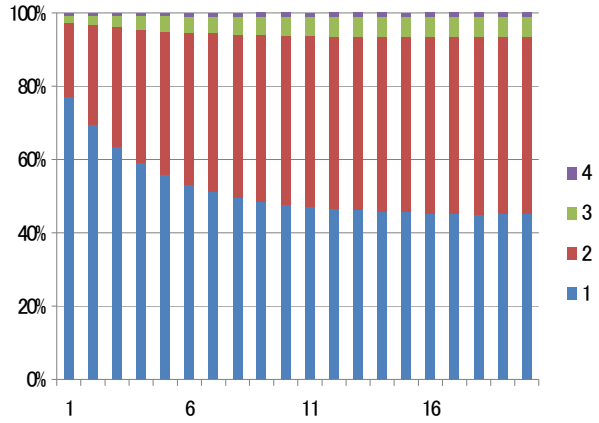


図–9 損傷度分布の推移（現状政策）

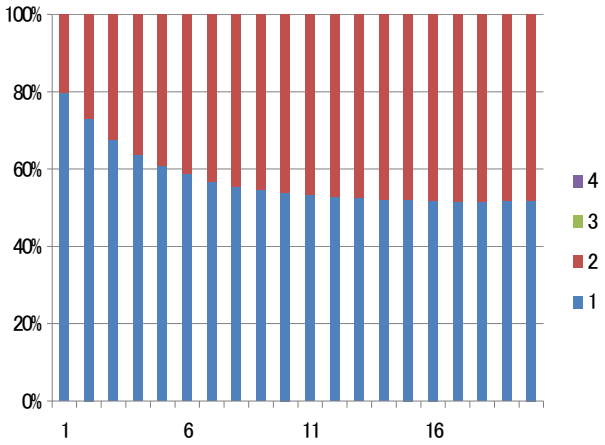
一方，図－９には，経年的健全度分布の補修直前の状態を示している．定常政策においては，リスク管理水準が0.2％と設定されている．

6.3　管理会計シミュレーション

土木構造物の点検・補修過程のシミュレーションのところで、算定した修繕費用の列を管理会計システムに適用することで、繰延維持補修引当金の推移を得ることができる。この残高によって、劣化している資産の量を知ることができる。この残高が多ければ多いほど土木資産に関して、維持補修計画通りに行っておらず、修繕すべき資産が多いことがわかる。図－12に予算制約有無のそれぞれに関しての補修回数毎の修繕費の推移である。今回のシミュレーションでは、1)計画通りが予算制約なし（青線）、2)第13回目の補修時に25000万円しか修繕できない場合（赤線）、3)第13、14回目の補修時に25000万円しか修繕できない場合（黄緑線）について行った。図―13は図―12の各年における繰延維持補修引当金の推移である。図―13で図―12の最適点検補修間隔置きの修繕費で

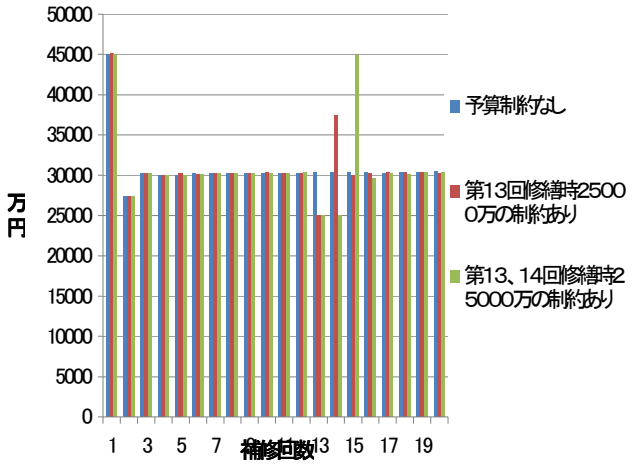


図–10 修繕前の損傷度分布の推移



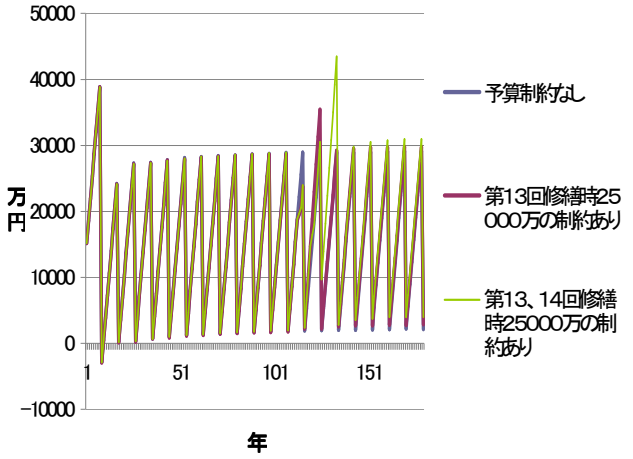
図–11 修繕後の損傷度分布の推移

1年当たり年平均費用を求めて、それを繰延維持補修引当金として、計画通り毎年引当てられた場合が予算制約なし（青線）に該当する。他方で予算制約1年の赤線の場合、第13回目の修繕時までに必要修繕額が集まらないために、117年の引当金残高が25000万円である。そのため、次回の第14回目の修繕時には、多くの修繕をする必要があり、その額は平均費用を上回ることになる。その上回った額を警告の意味を持たせるために、繰延維持補修引当金以外に別勘定の不足維持補修引当金として必要な追加維持修繕費まで引当てておくことが望ましい。その不足維持補修引当金の年推移を図―14に示している。図―13の繰延維持補修引当金の残高には、この不足維持補修引当金も含まれているため、13、14回目の補修時に予算制約がある場合の黄緑線の場合の126年の繰延維持補修引当金の残高は25000万円であるが、第13回の補修不足の不足維持補修引当金残高も積み上がっているために残高が35000万円まで上がっているのである。図―14では、13回目の補修時に予算制約がある赤線の場合、118年から9年間、不足維持補修引当金が780万円、年平均費用に加えて必要となり、、13、14回目の補修時に予算制約がある黄緑線の場合では、118年から9年間では769万円、年平均費用に加えて必要となり、127年から9年間では844万円追加に必要となる。



第13回目の修繕で、赤線の予算制約シナリオは引当金の積立期間内まで、必要修繕額を得られないとした場合を想定している。青線の予算制約なしと比較すると、第13回目で、約5000万円分の修繕が実施されずに、次回の第14回目の修繕時には、平均費用に加えて7400万円分の追加費用が発生することになる。追加費用が点検間隔期間1年当たり780万円、年平均費用に加えて必要となる。また、さらに、第14回においても必要修繕額を得られないとした場合が黄緑線の予算制約シナリオである。このシナリオでは、第14回目の修繕時で、約12400万円分の修繕が実施されずに、次回の第14回目の修繕時には、平均費用に加えて15000万円分の追加費用が発生することになる。前回の追加費用に加えて今回の追加費用が点検間隔期間1年当たり844万円、年平均費用に加えて必要となる。

図－12　修繕費の年推移

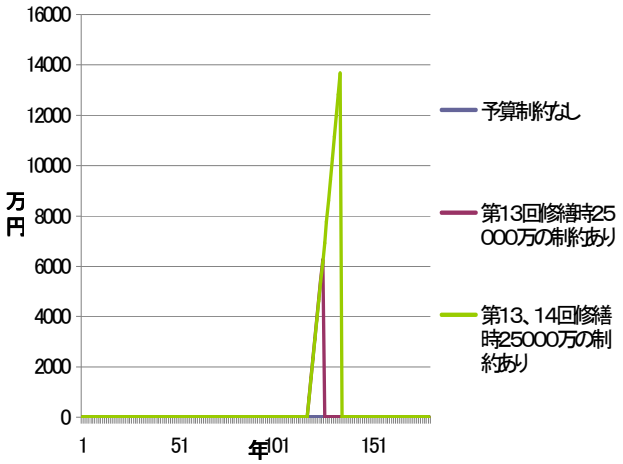


注）この縦軸は繰延維持補修引当金残高に加えて、不足維持補修引当金残高も加算して計上している。予算制約の赤線と黄緑線は毎年、年平均費用として3374万円引当が必要であるが114，115年に874万円しか引当てられないとしている。また予算制約の黄緑線は121, 122年も874万円しか引当てられないとしている。

図－13　繰延維持補修引当金残高の推移

6.4　その他資産のシミュレーション

各資産の最適シナリオパターンの組み合わせの結果は、ほとんど資産の管理保全方法により、シナリオパターンが異なった。事後保全に関しては、シナリオパターン１が最適であり、時間計画保全は、シナリオパターン０が、状態監視保全はシナリオパターン２がそれぞれ最適という組み合わせになった（表 -?）。今研究での第１世代の計算において、他のシナリオとの比較のために算出した平均費用がシナリオ０の場合、初期費用（再構築費用）が算定されず平均費用が０となり、一方、シナリオ１，２は寿命がシナリオ０より長いにも関わらず、平均費用が高くなり、したがってシナリオの比較がうまくできない。今回では、第１世代以前の全ての資産に関して、共用開



図–12 不足維持補修引当金残高の推移

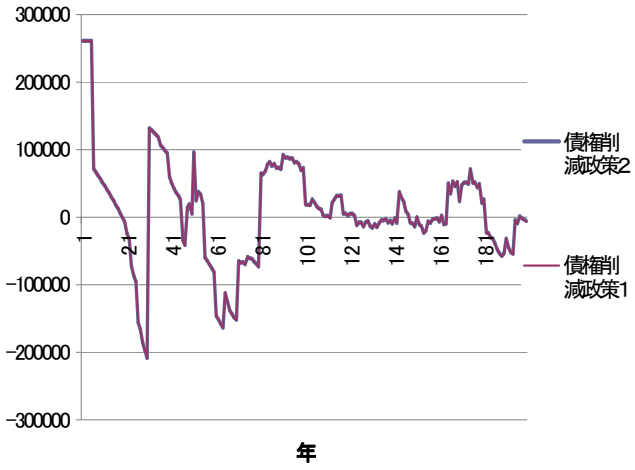
始時点の１９８０年から現資産をシナリオ０と仮定して、続く第２世代は、最適なシナリオの組み合わせにより、維持補修計画を立てた。

6.5　財務シミュレーション

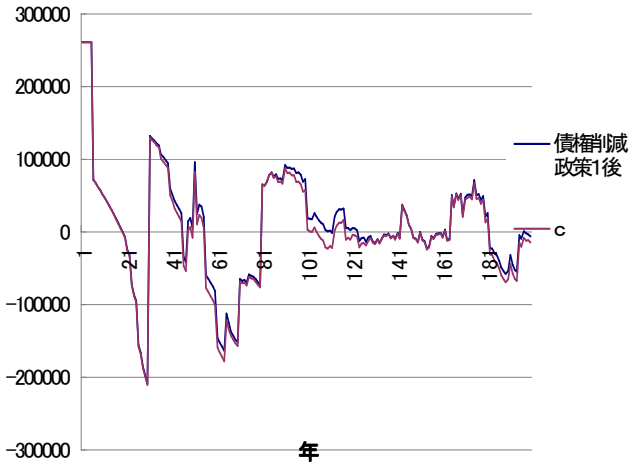
最適補修計画でのＣの推移は図－１３のようになり、例えば、１９年から３０年に資金不足が生じ、３１年から４５年に資金余剰がある。C¿0ならば、余剰分を今年度の資産の取替にかかる再構築費用や、新規設備にかかる建設費用に充てる企業債や国庫支出金の削減が可能となる。本研究では、新規設備は行わず、専ら既存の施設の維持補修を行うと仮定すると、35年に、Ｃの余剰が116178千円と計算され、債権削減政策１の場合、優先的に取替にＣを充てる資産はNo.138,406,411,480と決まり、総額116160千円分の企業債発行を避けることができた。但し、ここでは、補助金を考慮していない。これによる、今後の企業債償還金、支払利息の削減はそれぞれ総額98999千円,49646千円となった。一方、債権削減政策２の場合も、３５年では優先的に取替にＣを充てる資産が同じNo.138,406,411,480と決まる。これらの政策を全期間に亘って適用すると、債権削減政策１，２のＣの推移は図－１３はとなった。これを見ると分かるとおり、ほぼ同推移をしている。これは、年度ごとに、補修する資産の耐用年数が同じであり、その中で優先順位をつけているので、結果として、債権削減政策１，２では、Ｃに充てる資産が同じになる場合が多かった。しかし、より長い期間でのシミュレーションを行った場合、各資産の補修年度が分散して、この債権削減政策１，２の差が出てくるかも知れない。第４章でも述べた、どちらの政策が好ましいかについては今後の課題とする。また債権削減政策と政策実行前の比較は図-１４となり、この政策適用前に比べて、Ｃの増加が達成されていることが分かる。これは、異なる期間にある資金余剰と資金不足の時期をなるべく、同時期にシンクロさせているためである。さらに、Ｃの累積残高を示す図-１５を見ると、差は顕著に現れる。債権削減政策を適用した場合、100年からＣの残高が一定になり、残高1300000千円を推移している。これにより、下水道事業の新規施設の建設のためや下水道使用料の減収による、修繕費の制約の解消に繋がる。これについては後ほど、議論する。この債権削減政策を適用することによって、企業債残高の推移は図－１６のようになり、また、支払利息は図－１７のようになった。Ｃの残高もある一定規模が得られ、また支払利息も削減できるので、各年度で削減できた分に関して収益的収入が減少した場合についても、予算政策の問題を避けることが可能となる。

また本研究では取り扱わなかったが予算制約がある場合に、リスク評価を行い、資産に優先順位を付けることにより、予算制約上で成り立つ維持補修計画を提案することができる。

本研究では、取り扱わなかったがＣが余剰である場合い資金運用が考えられる。これが一般的なアセットマネジメントというもので、Ｃの余剰時に、取替等に使われていないＣがシミュレーション期間中の全余剰の？％にも上った。今後は、制度的な検討も含めて研究していきたい。



図–13 Cの推移（債権削減政策１，２）



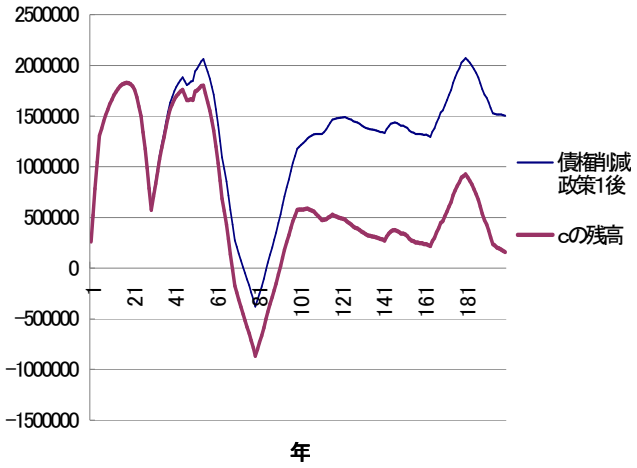
図–14 Cの推移（債権削減政策適用前後の比較）

6.6　長期経営計画の策定資料の作成

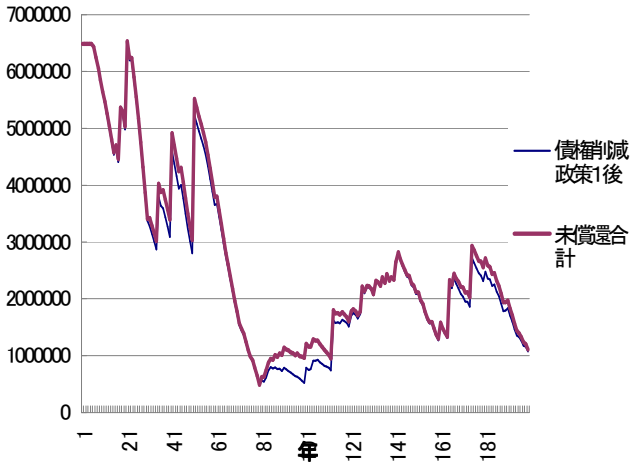
以上の財務シミュレーションを行うことにより、長期経営計画の策定に必要な資料を提供することができる。北部浄化センターの下水処理施設の土木構造物とその他資産の最適維持補修計画が出来上がった。これらをもとに経営指標である、汚水処理原価等の推移を算定することが可能となる。これらは、下水処理場にいる現場エンジニアの視点（リスク管理水準など）をうまく経営計画に取り込むことができている。また企業債残高の推移についてもその他資産の財務シミュレーションで計算が可能である。

7　おわりに

本研究では，多くの資産を有する下水処理施設に関して、土木構造物（水槽部）では統計的劣化予測モデルを用いて，ライフサイクル費用とリスク管理水準の関係を分析し，またその他資産では、LCC最小化に加えて支払い利息の削減を達成できる長期的な予算計画と補修計画を立案するような，下水道アセットマネジメントシステムを提案した．さらに，その有用性を実証的に分析した．実証分析の結果，本システムが現場の実務において下水処理施設のマネジメントから上位の予算計画に至るまでに非常な有用なツールになり得ることが明らかとなった．

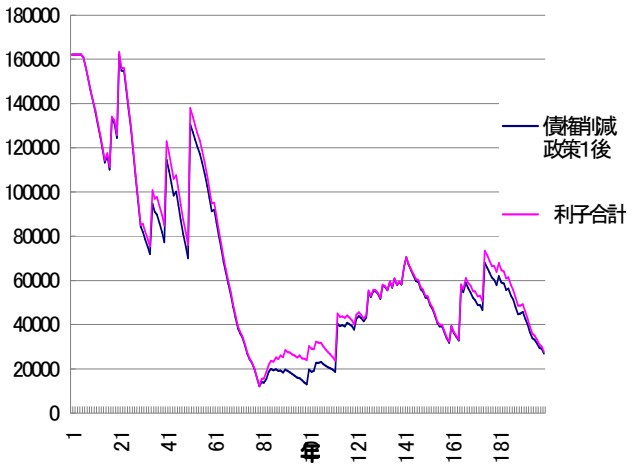


図–15 Cの残高の推移（債権削減政策適用前後の比較）



図–16 企業債残高の推移（債権削減政策適用前後の比較）

今後は，本システムの適用範囲を拡大するために，より実用的なシステム改良が必要である．そのためには，以下に示すようないくつかの研究課題が残されている．第１に，本研究では、下水道事業として対象とできなかった、他の資産（汚泥処理施設、ポンプ場、管渠）に関するアセットマネジメントシステムの構築をしアプリケーションを開発することである。それらの多くの資産を対象としたアセットマネジメントシステムにより、実用的なアプリケーション機能としてとして長期経営計画により有用な情報の提供が可能となる．第２に，本研究では土木構造物とその他資産との最適補修政策を求める手法が、統計的劣化予測と簡便的劣化予測というように異なることにより、両者を統合し整合的な判断を欠いているということである。その他資産に関しても統計的劣化予測を適用し、全体としてリスク管理をすることが重要である．第３に，本研究を発展させてより実用的なアプリケーションを実業務において運用する場合には，現状業務を分析し，システムからのアウトプット情報を評価する手法を確立する必要がある．予算計画や最適点検・補修・更新計画は将来時点における劣化予測をもとに算出しているものである．土木施設の劣化過程は不確実性を伴うものであり，マネジメントサイクルを継続することにより持続的にシステムを改良していくようなロジックが必要となる．さらには，予測結果と実際の差異についての評価手法として、以前大量生産時代の製造業での原価計算との整合的な標準原価計算を用いた差異分析が有用であると思われる。第４に、予算制約のシミュレーションについての課題がある。予算制約を考えるときに、本研



図–17 支払利息の推移（債権削減政策適用前後の比較）

究では、最適点検間隔を守り、補修額に制約がある場合についての財務シミュレーションを行った。しかし現実問題として、最適点検間隔ごとの補修ができるとも限らない。そこで、最適点検間隔からずれた場合のシミュレーションをする必要がある。これに関しては今後の課題としたい。

参考文献

1) 宮本文穂，河村圭，中村秀明，山本秀夫：階層構造ニューラルネットを用いたコンクリート橋診断エキスパートシステムの開発，土木学会論文集，No.644/IV-46，pp.67-86，2000.
2) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，Vol.501/I-29，pp.1-10，1994.
3) 山口亮太，伊藤裕一，三木千壽，市川篤司：社会的損失を考慮した道路橋のライフサイクルコスト評価の試み，構造工学論文集，Vol.47A，pp．983-989, 2001.
4) 貝戸清之，阿部允，公門和樹，藤野陽三：ストック効果を考慮したトータルコスト最小化に基づく橋梁マネージメント，構造工学論文集，Vol.47A，pp.991-998, 2001.
5) 貝戸清之，保田敬一，小林潔司，大和田慶：平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略，土木学会論文集，No.801/I-73, pp.83-96，2005.
6) 保田敬一，小林潔司：ＢＭＳにおける点検結果と状態推移確率がＬＣＣに及ぼす影響，建設マネジメント論文集，Vol.11, pp.111-122，2004
7) 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，土木学会土木情報利用技術論文集，Vol．14，pp199-210，2005.
8) 原田隆郎，呉智深，吉田典史，岩松幸雄：ニューラルネットワークによる道路舗装の補修計画最適化モデル，土木学会論文集，No.700/VI-54，pp.145-157，2003.
9) 斎藤雅道，福田正：予算制約のあいまいさを考慮したアスファルト舗装の修繕計画，土木学会論文集，No.571/V-36, pp.159-167，1997.
10) 大塚勝，武山泰，福田正：路面状態量をネットワークとした舗装修繕計画の最適化，土木学会論文集，No.550/V-33, pp.155-161，1996.
11) 孔永健，福田正：年度予算の制約がある場合のネットワークレベル舗装修繕計画，土木学会論文集，No.532/V-30，pp.167-171，1996.
12) 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，土木学会土木情報利用技術論文集，Vol．13，pp125-134，2004.
13) 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，2006.
14) 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，土木学会論文集，No.744/IV-61, pp.29-38, 2003.
15) 貝戸清之，保田敬一，小林潔司，大和田慶：平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略，土木学会論文集，No.801/I-73, pp.83-96, 2005.
16) 江尻良，西口志浩，小林潔司：インフラストラクチャ会計の課題と展望，土木学会論文集，No.770/VI-64，pp.15-32, 2004.
17) 小林潔司，上田孝行：インフラストラクチャのマネジメント：研究展望，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.15-27，2003.
18) 保田敬，小林潔司：BMSにおける点検結果と状態推移確率がLCCに及ぼす影響，建設マネジメント論文集，Vol.11, pp.111-122，2004.
19) 慈道充，江尻良，西口志浩、小林潔司：道路舗装会計システム，土木学会論文集，Vol.52A，pp.781-790，2006.
20) 青木一也，貝戸清之，小林潔司：橋梁アセットマネジメントのためのシミュレーションモデル，土木学会論文集，No.801/I-73, pp.68-82, 2005.

21) 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，Vol.14, pp.199-210, 2005.
22) Howard, R.A : Dynamic Programming and Markovian Processes, 関根智明他訳 : ダイナミックプログラミングとマルコフ過程、培風館、1971.
23) 日本下水道事業団　静岡市　静岡市 AM 手法導入検討委員会　最終報告書　2007
24) 日本下水道事業団　大成建設株式会社　株式会社シー・エス研究所　リスクを考慮した下水道施設の LCC 評価手法の開発　平成 16 － 18 年度　報告書
25) 筆谷勇 : 公会計原則の解説, 自治体外部監査における実務指針の解説, 中央経済社,1998
26) 醍醐聰 : 会計学講義、第２版、東京大学出版会,2001
27) 太田昭和監査法人 : 地方公営企業の会計と監査, 中央経済社,1999
28) 瓦田太賀四 : 地方公営企業会計論、清文社,2005
29) 地方公営企業制度研究会 : 公営企業の経理の手引き, 地方財務協会,2006
30) 中小規模　上下水道経営入門 : 地方財務協会,2005
31) 地方公営企業の経営の総点検について, 総務省,2004