

(9) 複合的な汚濁負荷削減分析のための 下水道整備の進捗評価

AN INTERACTIVE SEWERAGE PLANNING MODEL FOR EXAMINING INTERIM
INVESTMENT STRATEGIES VS. WASTELOAD REDUCTION PROFILES

中村正久* 浅岡英二** 黒田幸智*** 山田淳****

Masahisa Nakamura*, Eiji Asaoka**, Yukinori Kuroda***, Kiyoshi Yamada****

ABSTRACT; Wastewater management becomes a complex undertaking when there are different government agencies engaging in different programmes, such as the case in the Lake Biwa catchment area. The timing of the completion of conventional municipal sewerage systems linked to a large regional wastewater system under construction is likely to become a deciding factor for introduction of interim measures in places where wasteload reduction by sewerage will not take place for some time. An interactive model designed to assess various sewerage investment scenarios vs. wasteload reduction profiles was introduced here for use in examining various interim planning options.

KEYWORDS; wastewater planning, river-basin planning, scenario analysis, multiobjective planning

1. はじめに

下水道整備の重点目標は大都市から地方の中小都市へ移り、比較的広大で汚濁負荷発生密度が低い地域でもその整備が急務となっている。そのような地域では、下水道長期未整備区域や下水道整備対象外区域における負荷削減対策をあわせ、全域で整合性のとれた整備計画を立案・遂行することが重大な関心事となっている。とくに、閉鎖性水域の周辺に位置する市街地では、生活環境の整備に対する要請も高いが、同時に水域の水質改善に対する期待も大きく、負荷削減目標が市街地を含む全域で達成されるまでの途中経緯の予測と評価は非常に重要である。本研究の目的は、このような状況下で、下水道整備進捗の予測と評価を行う対話型シナリオ分析システムの開発であり、琵琶湖集水域を想定した事例への応用である。

効率性と公平性を指標とする下水道計画の評価の方法論については既に報告した[1]が、本研究の主眼はこの方法を応用した計画の途中評価であり、様々な条件下で進捗シナリオを評価できるモデルの構築である。すなわち全体計画が、①処理場の整備（投資主体：都道府県）、②流域幹線下水道の整備（同：都道府県）、③公共下水道の整備（同：市町村）、④水洗化あるいは事業所などの管渠の接続（同：受益者）という個別事業の進捗に大きく影響され、がつ下水道以外のポイントソース負荷削減方策の導入と干渉しあう形で進行するという現実をできる限り忠実に反映するシナリオ分析モデルを構築することである。この流れの

* 滋賀県琵琶湖研究所	Lake Biwa Research Institute, Shiga Prefecture
** 広島県土木部	Hiroshima Prefectural Government
*** 新日本技術コンサルタント	New Japan Engineering Consultants, Co. Ltd.
**** 立命館大学	Ritumeikan University

中で、投資制約条件が変われば、暫定的あるいは代替的負荷削減対策の導入のタイミングや、河川へ流出する負荷削減の経年プロファイルも様々に変化する。また、公共下水道計画とそれ以外の計画が、計画全期間を通して整合性をもって展開する条件もこの流れに大きく影響を受ける。事例研究では、前者（代替方策導入のタイミングと負荷削減の経年プロファイルの表示）について、実際に計画が進捗中の下水道計画を参考に方法論の展開を行った。

この4つのプロセスの相互の関連を反映させる負荷削減モデルが図-1に示すシナリオ分析システムのフローである。

2. 分析手法

2.1 流域幹線下水道進捗評価モデル

本研究では、流域幹線への投資をシナリオドライバーとして設定している。このため、実績をベースにした様々な想定投資パターンを設定する必要がある。これについては後述する事例分析で述べる。

特定の投資パターン下における、シナリオの相対的な評価には、①負荷削減の効率性（E）、②整備開始時期の公平性（Ft）、③費用負担時間価値の公平性（Fc）の三つの評価指標を導入した。負荷削減の効率性（E）、整備開始時期の公平性（Ft）については既にその考え方と事例研究について報告した[1]。

費用負担の時間価値の公平性（Fc）は以下の様に定義した。ある幹線系統に位置する整備対象地域の線整備の着工時期は下流側からの整備進捗に左右される。その地域が費用負担する金額は前もって経年積み立てられているため、時間価値を考えれば、元金としての負担額は、着工時に実際に負担した費用より少ない。この比が全ての地域で一律に近ければ、費用負担の時間価値の公平性は高いと考えることができる。一般に下流域ほどこの比は1に近く、上流域ほど大きい値をとる。

第 i 分区の実際投資額を $P(i)$ 、整備完了年次を $t^*(i)$ 、計画着工年次を S 、時間的割引率を α_0 とした場合、第 i 分区の時間割引投資額 $I_d^*(i)$ は次のように表せる。

$$\diamond \text{ 時間割引投資額} : I_d^*(i) = P(i) / (1 + \alpha_0)^{(t^*(i) - S)}$$

ここで、 S : 流域幹線下水道計画着工年次

$P(i)$: 第 i 分区の実際投資額

α_0 : 時間的割引率

さらに、各幹線分区における、この時間割引投資額と実際投資額との比（時間割引しない負担費用総額／時間割引負担費用総額）の平均値 R は次のようになる。

$$\diamond \text{ 投資額比の平均} : R = \frac{\sum_{i=1}^n ((P(i) / I_d^*(i)) \times 100)}{n}$$

ここで、 n : 処理区にある幹線分区の総数

費用負担の時間価値の公平性（Fc）は、したがって、Ft と同様に、各幹線分区の投資額比の標準偏差を用いて、次のように定義する。

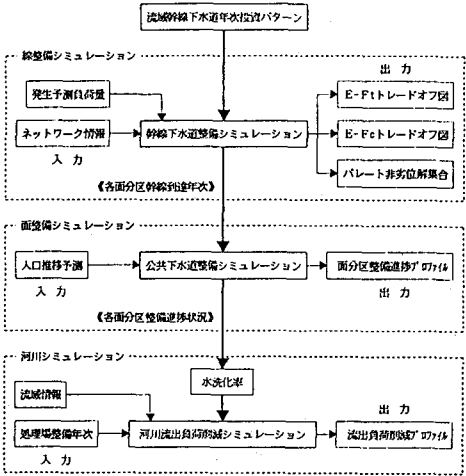


図-1 分析シナリオフロー

$$\text{◆ 費用負担の時間価値の公平性 : } F_c = - \left[\sum_{i=1}^n \{r(i) - R\}^2 / n \right]^{1/2}$$

ここで、 $r(i)$: 第 i 分区の投資額比

この F_c もまた、 F_t と同様に計画進捗の客観的な評価因子の一つと考えられるが、 E と異なり、いずれも直感的な理解が困難であるという難点があり、さらに、より適当な評価因子の定義を模索する必要がある。

求められた E 、 F_t 、 F_c の関係は、それぞれの投資シナリオごとに3次元疑似パレート曲面に表示することができる。この最適近似解集合（パレート非劣位解集合）の中から選ばれた特定の線整備シナリオを、以下の面整備シナリオ進捗モデルを用いてさらに展開することになる。

2.2 公共下水道整備（面整備）進捗モデル

流域下水道に接続する公共下水道の整備は、流域幹線が到達することを見越して開始される。整備開始から、面整備が本格的に始まる幹線到達時期までを面整備の初期投資期間（ eP ）と呼ぶ。初期投資期間は、投資額が一定割合でゼロから徐々に増加するとして全期間の投資パターンを設定した。

初期投資期間は、 $0 \leq eP \leq 10$ 年の範囲内で変化させることにした。図-2にはデータレンジの両端、 I_{min} と I_{max} を含む投資パターンの概念図を示した。

市町村 i の、ある投資パターン下の第 t 年次における投資額： $I(i, t)$ は次のように計算される。

◎初期投資期間（ $1 \leq t < eP$ ）の場合

$$\text{◇ 年次投資額 : } I(i, t) = I(i, eP) \times (t/eP)$$

ここで、 t : 整備着工からの経過年数

eP : 初期投資期間

◎通常投資期間（ $t \geq eP$ ）の場合

$$\text{◇ 年次投資額 : } I(i, t) = X \times P(i, t) \times K$$

ここで、 X : 回帰直線（図-3）に示す係数

$P(i, t)$: 市町村 i における第 t 年次の人口

K : 修正係数（1.1313）

この修正係数： K は、整備対象地域と実データ採取地域の違いと、データ採取年次と分析対象となる将来年次との差を考慮したものであり、その値は、上式による仮想年次投資額と実績データとの比較から計算されている。

また、公共下水道の実際の整備対象面積、宅地面積、の整備にかかる費用は、以下に示す関数を使って算定した。

$$\text{◇ 面積整備費（百万円）} = 25.392 \times \text{整備対象面積（ha）}$$

なお、定数：25.392（百万円／ha）は、事例対象地域と類似した地域の市町村の実績データから算出された面整備費用の平均値であり、今回の分析に当たっては、全ての整備対象面分区に一律にこのコスト関数を使って年次面整備率を計算した。さらに、水洗化の進捗については、本分析の対象地域内の N 市の水洗化率の推移、すなわち1年目で40%、2年目で70%、3年目で100%という値を、全面分区に一律に使用することとした。

4. 事例分析

4.1 線整備進捗のシナリオ分析

事例対象は、2市17町を処理区内に含む流域下水道計画区域（計画処理水量は 505,000 $\text{m}^3/\text{日}$ 、計画処理区面積 12,700ha、計画処理対象人口 525,000人、幹線総延長 121km）で、ネットワーク形状は図-3に示す通りである。平成 2年度末時点で整備が完了している 20幹線分区を除いた未完成 54分区の整備進捗シナリオ分析を（1991～）を実施した。シナリオドライバとなる投資パターンは、幹線完成にかかる年数、および年次配分、の両者に規定される。ここでは、完成までの期間を15年と仮定し（ $t_c=2005$ 年）総投資額を年次ごと一定の場合、初期投資と最終投資の比が 2 対 1 の場合、の二ケースをとりあげた（図-4）。なお、図中の a 線は実績投資額、b 線は同じ投資額を費用関数を用いて算出したものであり、分析は費用関数による投資額を用いたため、実際投資額より低めに見積られている。なお、負荷削減プロファイルの比較のためには、 $t_c=2010$ 年、及び 2015年についても解析した。

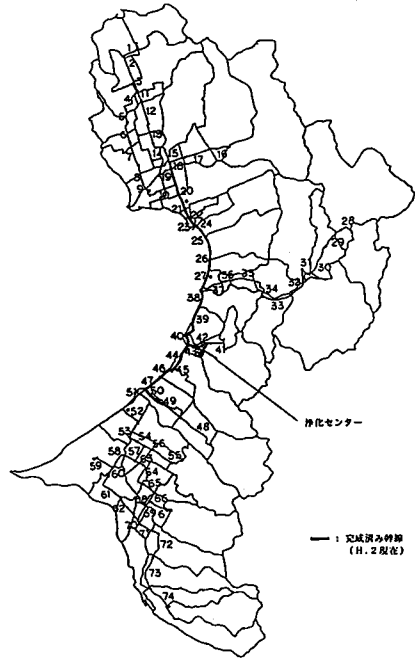


図-3 事例対象地域幹線ネットワーク

ここで適用した計算方法は、同一の投資パターンでも幹線経路ごとの配分を変化させることによって E の値が変化することに着目し、E、Ft、および Fc の組合せからトレードオフ図を作成している。この結果得られた E、Ft、および Fc 間の疑似パレート関係を図5に示す。

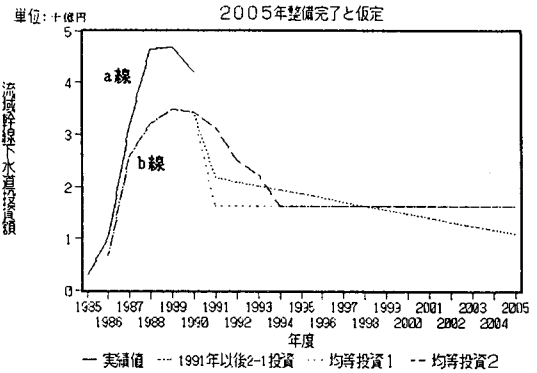


図-4 幹線投資パターン

4.2 面整備プロファイル分析（ $t_c=2005$ 、 E_{max} の場合）

平成2年度現在、公共下水道整備計画が立案されていない分区を除外し、計56の面分区についての整備進捗プロファイルを、また、それらの面分区を流域に有する 23 の一級河川について流出負荷削減プロファイルを求めた。面整備進捗は様々な人為的要素に左右されるため、適当な予測手法が無い。従って、データ数の不足もあってバラ付きが多いが、両プロファイルとも市町村人口と投資額の関係からプロファイルレンジを定め、削減負荷量の中を予測した。年次投資額の最大値（ I_{max} ）と最小値（ I_{min} ）の各々の回帰直線とその平均（ I_{mean} ）は、プロファイルの上限（EARLY-line）、下限

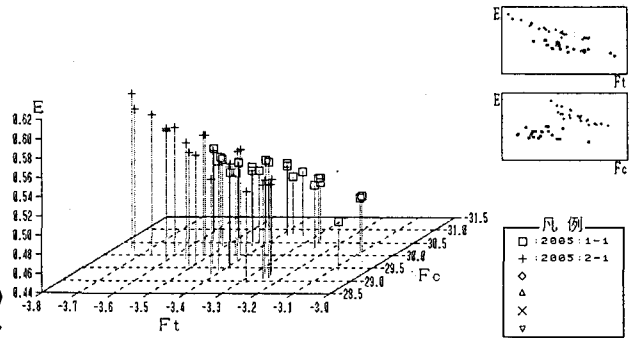


図-5 E-Ft-Fc 疑似パレート関係

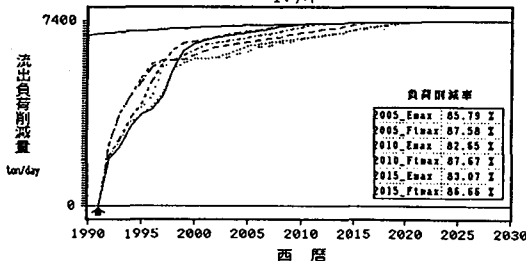
(LATE-line)、及び中央値 (MIDD-line) に相当する (図-6)。さらに、正規確率分布を仮定したプロファイルレンジに 33% 確率 (E33-line, L33-line) と 67% 確率 (E67-line, L67-line) を設定した。図-7 にその例を示す。

当然ながら、面整備着工年次は、基本的に浄化センター近隣ほど早期で、離れるほど遅れる。しかし、それ以降のプロファイルラインの勾配 (整備進捗状況) は、整備着工年次とは直接関係なく、整備が早期に開始されながらも完了に長期間要する分区もあれば、整備開始は遅れるが一旦整備が始まれば早期に整備が完了する分区も存在する。また、プロファイルレンジの中も分区ごとまちまちである。これは、整備対象面積の大小のみならず、市町村の年次投資額 (人口と相関をもつと仮定) と整備対象面積の双方の干渉によって決定される。これは単に分区の整備対象面積の大小だけでなく、市町村の年次投資分配額と整備計画の執行能力に大きく左右されることを表している。いずれにしても、ここで得られたシナリオ情報をもとに、長期未整備地域を特定し、その対策を投資シナリオに応じて検討することができる。

4.3 流出負荷削減プロファイル分析

各河川へ流出する負荷の削減プロファイル (図-8) も、面分区と同様に浄化センター近隣地区をその流域とする河川ほどプロファイルラインの立ち上がりが早く、離れるほど遅れる。また、流域面積が小さい都市河川においては、下水道整備効果が早期から顕著に見られるが、流域面積が大きい河川や整備対象地域のはずれに位置する河川の負荷削減プロファイルは帯状に広がり、顕著な負

河川流出負荷削減プロファイル (MIDD-line)
N 川



河川流出負荷削減プロファイル (MIDD-line)
U 川

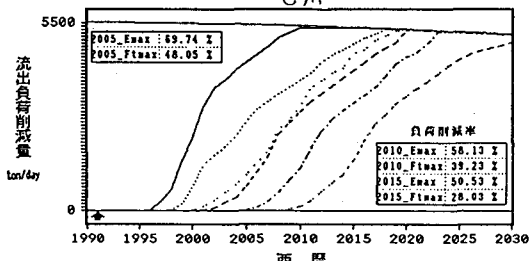


図-9 tc-Emax-Ftmax と河川流出負荷削減の関係

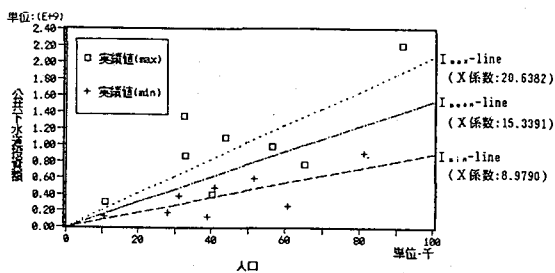


図-6 公共下水道人口-年次投資額相関

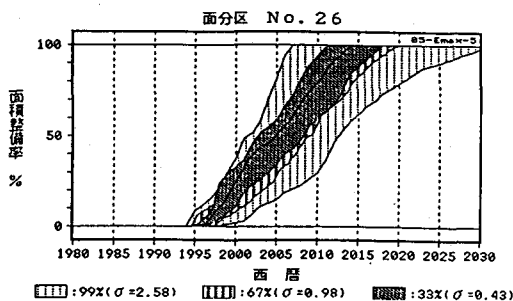


図-7 面分区整備進捗プロファイル例

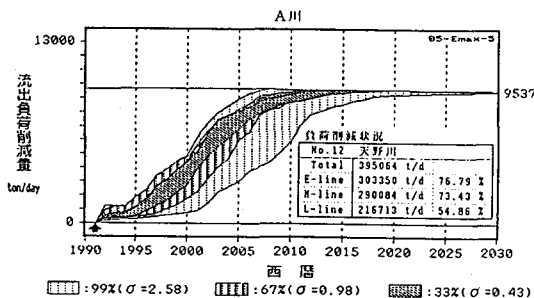


図-8 河川流出負荷削減プロファイル例

荷削減を早期に望むのは無理である。また、流域面積が小さい都市河川においては、下水道整備効果が早期から顕著に見られるはずだが、河川の水質改善の程度は固水量の多少や、都市域のノンポイントソース汚染の程度に左右されるため、実際改善効果が現れるか否かは定かでない。一方、流域面積が大きい非都市型河川の場合、流出負荷削減プロファイルは大きな巾を持つことがわかる。この様な河川においては、暫定的な負荷削減対策と同時に、農地、山林などからのノンポイントソース汚染対策が決め手になるため、いつどの程度の改善効果が期待できるかについては、対象を拡大したシナリオ分析が必用である。

4.4 線整備の計画期間、効率性・公平性指標値と負荷削減率の予測

下水道初期投資期間が面整備進捗に与える影響と、流域幹線下水道整備完了年次の遅延や幹線分区整備進捗シナリオの違いが河川流出負荷削減に与える影響についても比較分析した(図-9)。

初期投資期間(eP)を一律に5年とし、計画期間が15年、20年、および25年の三通りについて、Eが最大、あるいはFtが最大、の二通りの計6ケースについて、負荷削減率の分析をした。これによると、浄化センター近隣の河川においては、E_{max}とF_{tmax}の何れの場合もあまり差がなく、あえて言えば、F_{tmax}の方が若干高い負荷削減率を示す。それに対して浄化センターから離れた河川においては、効率型流域下水道整備進捗シナリオの方が明らかに削減率が高い。幹線整備完了年次(tc)については、完了年次が早くて効率型シナリオの方が負荷削減率が高くなっているのがわかる。

面整備は、初期投資期間が長くなるほど進捗のテンポがゆるくなり、完了が遅れる。ただし、その差が極端に開く分区とあまり差の無い分区とが存在する。これは、年次投資額と整備対象面積とが相互に干渉しあう結果と考えられる。河川流出負荷の削減は、浄化センター近隣の河川では効率(E)型計画と公平(F)型計画にあまり差が無いが、公平型計画の方が負荷削減が若干早期になされる傾向がある。これは後者の方が、公共下水道整備開始初期の投資可能(流域幹線到達)面分区数が少ないために、浄化センター近隣の面分区に対して集中的に投資が行われるためであろう。それに対して浄化センターから離れた河川においては、効率型流域下水道整備シナリオの方が、断然早期に負荷削減が可能となっている。全流域幹線整備完了年次(tc)の遅延の影響についても、これとほぼ同じことが言える。この傾向は各河川によってまちまちであるが、総合的にみると幹線整備年次が早く、効率型のシナリオが、負荷削減率は高くなっている。

5. 結果の考察と手法の問題点

本研究は、図-1に示す分析の枠組みの中で、流域幹線投資シナリオをシナリオドライバーとして、線整備の進捗、公共下水道による面整備、水洗化などによる負荷の取り込み、と計画を一過性のフローとして取扱、負荷削減のプロファイルを求めている。もちろん、水域の目標削減負荷量を制約条件としたり、特定の面整備水準を条件としたりするシナリオ分析手法も考えられるし、また下水道以外の負荷削減計画をベースとして下水道の進捗オプションを分析する方法も考えられる。何れの場合も評価基準がはっきりするから繰り返し収束を織り込んだ最適化手法の適用が可能となり、それなりに論理の収束も可能かも知れない。そういった方法を採用しなかった理由は、下水道の整備進捗をある程度現実的に記述し、しかもシナリオ選択の自由度を持たせて一過性のフローとして考察する方が、こういった分析は分かりやすいと判断したからである。

しかし、分析結果が現実を反映し、政策課題の検討に役立つには様々な問題点を克服する必用がある。以下にその概要を記述する。

1) 投資データ

幹線投資のシナリオドライバーとなる投資額の推移については、この分析の過程では十分な検討がなされていない。とくに投資額の将来的な変動については、国、県の計画目標事業量と財源確保、市町村の財政負担、管渠・処理場の事業量のバランス、建設業界の事業消化能力、などが投資額を大きく左右するが、ここでは考えていない。また、本事例対象地域における実際の下水道供用開始は、1991年4月であり、実績データ

が非常に限定されていた。特に、公共下水道年次投資額の実績データが 8 市町村に限られていたのでプロフィールの中が非常に広くなった。

2) 負荷の削減と河川水質の関係

本事例では、19市町村に及ぶ広大な地域を対象とし、複数の市町にまたがる河川に流出する負荷削減のプロファイルを求めたにとどまった。この分析結果を、流域の状況を克明に反映した水質評価に結び付けるには、シナリオ分析の趣旨からも困難を伴う。河川水質の現象シミュレーションを将来シナリオに関連づけて行うことももちろん可能である。しかし、河川の多くは下流部で天井川を形成するなど、負荷削減と現実の水質評価とは全く結び付かない、という可能性も高い。流域状況を反映し、負荷削減と水質をと関連づける新たな指標の導入は必用である。

3) シナリオ分析の枠組みの問題

既に述べたように、負荷削減の政策シナリオ分析には、様々な形態のモデルが使われる。本研究で取り扱ったモデルは、下水道整備の進捗シナリオに基づいて負荷削減プロファイルを導き出すことを目的とし、他の負荷削減対策の進捗は、意識下に想定しているものの、具体的に分析の対象としてはいない。従って、例えばここで導入した効率性と公平性の指標値は、下水道以外の負荷削減対策の導入による影響は全く考慮していない。このため、個別進捗シナリオの優劣を示唆するような評価基準も分析の枠組みには含まれていない。

下水道以外の負荷削減施策も含めて横並びでシナリオ分析の対象とするには、いくつかの障害がある。技術的には個々の財政システムが独立しているため、複数のシナリオドライバーを平行して稼働させなければならない、という問題がある。もっと基本的には、制度的、政策的な背景を含め、分析の対象とするには、負荷削減の進捗シナリオのみならず、費用・便益評価などを含む別の切口の評価もあわせて必用となる。

6. おわりに

琵琶湖集水域など閉鎖性水域の周辺域では、ポイントソース・ノンポイントソースの汚濁負荷削減策が複合的に導入されている。ポイントソース負荷の削減については、下水道が中心的な役割を担うため、その整備進捗の評価は、負荷削減のタイミングを知る上で非常に重要である。本研究の当面の目標は、下水道の整備進捗による負荷削減の経年変化を、様々なシナリオ想定下で分析、評価する手法の開発・検討であったここでは、現実の下水道整備の計画プロセスを比較的忠実に再現し、ある程度客観的な進捗評価指標を使って想定シナリオを多面的に分析する方法を模索した。これまで、下水道の施設計画立案のモデルは数多く存在したが、整備の進捗と水域へ流出する負荷の削減を、計画主体の投資シナリオと併せて予測・評価する分析モデルは紹介されていない。シナリオシステムの全体構造、サブモデルの基本的な考え方、サブモデル間の整合性、基礎データの吟味、など、大枠の構想からモデルの細部に至るまで、多くの問題点は残るものの、一応、初期の目標に近づきつつあり、有効なモデリング手法を提示し得たものとする。今後、上記に示した課題を含め、引続き検討を重ねていく必用がある。

7. 参考文献

1. 中村正久、佐野弘幸（1990）：効率性と公平性を指標とする下水道建設のシナリオ分析、環境システム研究、Vol. 18、pp136-142