

(22) 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

An Efficiency-Equity Trade-off Analysis for
Wastewater Network Planning

中村正久* 佐野弘幸**
Masahisa Nakamura Hiroyuki Sano

ABSTRACT: A scenario analysis method using the trade-off information between efficiency and equity indicators has been proposed for assessing the implication of investment strategies for constructing a wastewater network system. The efficiency indicator takes into account the amount of wastewater projected to be taken in by the system over the planning horizon, and the equity indicator takes into account the differences in the timing of service provision to individual service districts by the completed network system, assuming that wastewater sources will be connected to the network immediately after the completed portion of the network reaches them. The proposed scenario analysis method constitutes a part of the comprehensive policy analysis procedure for strategic reduction of wasteloads entering a large enclosed body of water like that of Lake Biwa.

KEY WORDS: scenario analysis, Pareto analysis, wastewater network planning, efficiency, equity

1. はじめに

わが国の下水道は比較的早くから整備してきた大都市ではほぼ完備したが、地方都市など、比較的人口密度の低い地域ではその整備進捗率はきわめて低い。1988年末の全国の総人口普及率は約40%と欧米諸国に比較して著しく低く、日米構造協議など国際的な協議の場においても公共投資の最優先課題として指摘されるに至った。公共水域の水質汚濁対策の必要性や、生活様式の高度化による環境改善の要求に伴い下水道整備対象地域は拡大してきているが、低密度地域では整備人口当りの建設費用が高くなり投資効率は悪くなるため、長期未整備地域では合併浄化槽や小規模下水道処理施設の導入など地域特性に応じた負荷削減方策の選択についても検討をせまられている。[1, 2, 3]

下水道の整備進捗過程における計画評価は、計画区域が広大で建設期間が長期にわたる場合に重要である。計画主体にとってはなるべく多くの負荷量をなるべく早く処理し、施設の投資効果を早期に発揮させることを望み、整備対象区域の住民はなるべく早期に下水道が整備されることを望む。しかし、下水道建設は年次投資額の制約のもとでネットワークの下流端から進められ、必ずしも負荷密度の高いところが先に整備される（投資の効率性を重視する）とは限らないし、整備時期は地域によって大きく異なる（投資の公平性

* 滋賀県琵琶湖研究所 Lake Biwa Research Institute, Shiga Prefectural Government

**株式会社 エックス都市研究所 EX Urban and Environmental Research Institute Co., Ltd.

が損なわれる)こともある。効率性と公平性の指標とするシナリオ分析モデルは、過渡期における下水道システムの建設・維持管理計画、各地域の整備時期の推定と長期未整備地域の暫定対策の検討、整備域内河川・近隣水路への流出負荷削減状況の予測、など下水道建設計画遂行上の検討課題の分析に有効であるが、投資パターン、ネットワーク形状、負荷の時間的、空間的分布、効率性・公平性の定量的定義など、困難な問題があって、二、三の試行的検討[4, 5]を別にすればこれまで有効なモデルは開発されていなかった。

ここでは、時間的、空間的に分布する負荷を、与えられた投資パターン下でどのような順序で削減するのが最も合理的かを検討する管渠建設進捗評価モデルの作成と、それを応用して上記の検討課題を対話型に分析する方法論の開発について報告する。とくに、取り込み負荷量の積分値を効率性指標として、また整備年次の相対的遅れの度合を公平性指標として、パレート最適近似値解集合(非劣位解集合)を求める方法を人口十万人の公共下水道計画を事例として提示する。また現実に進行する計画の途中評価を回顧的に分析する方法についても検討した。

2. 負荷削減シナリオ分析システム

水域に流出する汚濁負荷量の削減、水洗化による生活環境の改善のいずれをとっても、下水道の進捗状況の把握は重要である。投資という観点からは、下水道経営にとっての効率性と住民にとっての地域間の公平性とは競合関係となることがあり、また流出負荷量の削減という観点からは、水域全体からみた負荷削減と近隣河川環境の改善とは必ずしも整合しないことがある。こういった問題点を克服するために規模や機能の異なる下水道システムを複合的に導入する必要性も指摘されてきた。本研究では、投資シナリオをシナリオドライバーとし、下水道線整備の進捗度、面整備のタイミング、河川流出負荷量の年次変化プロファイル、などが対話的に記述でき、代替施設の導入地域や導入タイミングを併せて検討できる負荷削減シナリオ分析システムの構築を目的としている。特定の代替投資配分案による整備の進捗状況の記述には定量的な評価指標を導入する必要があるが、ここでは次節で定義するような形態をもつ効率性と公平性の指標を導入した。

3. 下水道整備評価モデル

下水道整備は、幹線管渠整備(以下線整備と称する)と枝線整備・各戸接続(面整備)に分けることができる。線整備とは下水道整備地域と処理場とを連結する幹線ネットワークの建設をさし、面整備とは地域内の汚水収集管渠の建設をさす。面整備費用は当該市町村の負担となるが、線整備のうち流域下水道など複数の市町村にまたがる場合には国や県が大きな負担をする。下水道整備の進捗度は、線整備と面整備が整合に進行することが望ましいが、幹線管渠の建設が先行し過ぎて供用が遅れたり、面整備に幹線整備が追い付かなくなったりして、全体としての投資効率が効率が悪くなる。線整備と面整備はこのような基本的な性質の違いがあるため、別個にモデルを作成し、両者を連動させる方法を採用した。このうち線整備の進捗を効率性と公平性を指標として分析する方法は以下のとおりである。線整備シナリオ分析をうけてすすめる面整備シナリオ分析プロセスの概要は[6]に詳しい。

幹線管渠の建設順位は計画主体(県、市町村)が整備計画期間を通じておこなう投資の配分計画に左右される。配分された投資額によって幹線管渠は下流から上流に向けて建設され、枝別れの数が増えるにつれて幹線系統も増え、投資可能な(建設可能な)地点数も増加する。建設進捗度はどの幹線系統(地域)に優先的に投資するかによって変化する。一般に、人口や工場など負荷源の密集地域ほど単位建設費用当りの負荷削減量が大きく投資効率が高くなる。地理的要因と投資優先度によって整備の時期には大きな差が生じ、下水道の供用開始時期の公平性がもう一方で問題とされる。すなわち公益事業としての効率性に関する評価と、公共事業であるがための公平性に関する評価が必要である。

3.1 効率性 (Efficiency) の評価

線整備を効率的に進めるためには単位建設費当りの削減負荷量が多い地域を優先する必要がある。しかし、汚濁負荷は面的、時間的な分布をもち、しかも線整備は下流から進められるのが原則であるから、下水道ネットワークが複雑になるほど一意的に効率性の高い解（整備計画）を求めることが難しなる。ここでは効率性を以下のように定義し、第4節で解析手順について述べる。

整備対象全区域のネットワーク形状が既知、従って全幹線系統の建設に要する費用が既知のとき、対象区域をそれぞれの幹線系統に添って1個の分区に分割し、全投資額を U 年間にわたり、ある投資パターンに基づいて投資する。このとき、第 t 年次に第 i 分区から発生する点源汚濁負荷の密度を $d(i, t)$ 、処理分区面積を $A(i)$ とすれば、整備開始年から終了年までに全計画地域からの発生する総負荷量、 Y 、は、

$$Y = \sum_{i=1}^I \{ A(i) \cdot \int_{t=1}^U d(i, t) dt \}$$

となり、負荷量の伸びを予見とすればこの値は一定で、投資計画の如何に関わらず前もって計算できる。

一方、線整備が第 i 分区に到達した年次を $t = t'(i)$ とすると、計画期間 U 年末までに下水道整備によって全計画地域 I から削減可能な負荷量、 T 、は

$$T = \sum_{i=1}^I \{ A(i) \cdot \int_{t=t'(i)}^U d(i, t) dt \}$$

である。すなわち線整備が完了したため、（面整備が完了すれば）処理場に取り込み得る負荷の総量が T である。この評価値が大きいほど（潜在的な）負荷削減の効率（単位費用当りの削減負荷量）は高い。 Y に対する T の割合を線整備の効率性指標、 $E = T/Y$ 、とよぶ。年次投資額とその分配計画（どの幹線系統を優先的に整備するか）シナリオが一つ与えられれば、後述の解析方法によって $t'(i)$ 、従って T が求められ、一つの E の値が決まる。 E は効率性の一指標にすぎないが、重要な計画評価因子である。

3.2 公平性 (Equity) の評価

下水道整備の進捗は投資分配や地理的条件の制約に左右され、地域間に整備タイミングの「ずれ」が生じるのが一般的である。この「ずれ」の幅が大きいほど不公平感が高まり、計画の推進に支障をきたすことがある。もちろん、建設は下流側から進められるのが一般的であるから、同一幹線の下流に位置する分区では完成年次が早くなり、上流に位置する分区は遅くなる。一方、幹線系統の違う地域間でも、投資可能な地点のどこを優先して整備するかによって完成年次の「ずれ」が生じる。投資分配政策のシナリオ分析を目的とする場合、前者の「ずれ」の影響は差し引いて評価できる公平性の指標をもちいる必要がある。ここでは各幹線系統について実際（想定投資配分シナリオ）上の整備完了年次と理論的最短完了年次（与えられた年次投資額を特定の幹線系統の建設に集中的に投入したとき、建設完了までにかかる年数）との乖離の程度をもって公平性の代表指標とする。全幹線系統についてこの年数を個別に求めることは可能であるが、同じ投資計画のもとで全ての幹線系統の建設を理論的最短完成年数で完了することは不可能である。

すなわち、分区 i の理論的最短完成年次を $M(i)$ 、実際の整備年次を $t'(i)$ この整備対象地域の総分区数を I 、とすれば遅刻年数（理論最短完成年次から実際の完成年次が遅れた年数）の平均値 H は、

$$H = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (t'(i) - M(i))$$

となる。一方、公平性については遅刻年数の平均偏差を用いて以下のような表現とする。

$$F = - \left[\sum_{i=1}^I \{t^*(i) - M(i) - H\}^2 / I \right]^{1/2}$$

この指標値Fのマイナス符号は、公平性が高いほどF値が大きくなるような表現上の工夫であり、偏差はFの絶対値である。

3.4 パレート最適性の考慮

効率性、公平性を上記の定義に限定すれば、効率性の高い整備計画は負荷密度の大きい地域を優先的に整備する計画であり、公平性の高い整備計画は負荷密度の如何に関わらず整備を一様に進める計画である。従って、上記の二指標が同時に最大となるような計画は存在しない。両者の関係を考察するためには二目的数理計画問題として定式化し、パレート最適代替案群のトレードオフ図を作成することが必要となる。しかし、現実の整備計画問題の場合は負荷の時間変化が非線形であるうえ、ネットワーク形状が複雑で、最適化問題として定式化することに無理が生じる。パレート最適近似解集合を求める方法は次節に記した。

4. 効率性指標と公平性指標のパレート最適近似解の求め方

対象とする下水道ネットワークの効率性指標 E を最大とする解を厳密に求めるには最適化数理計画手法を適用する必要がある。しかし、予測の不確定性を考慮すれば、迅速に多数の近似解を求めることの方が意味がある。近似解は既に提示された方法[7,8]を改良し、以下のプロセスで求めた。すなわち、分区 i において、ある年次 ($t=t^*(i)$) に線整備が完了し、計画期間 U 年末までに下水道に取り込まれる負荷量は時間的割引率を α とするとき割引負荷密度の累積値、あるいは投資効果積分値、 $r(i, t^*(i))$ 、は以下のように求められる。

$$r(i, t^*(i)) = \sum_{t=t^*(i)}^U \{d(i, t) / (1 + \alpha)^t\}$$

分区 i を含む幹線のの上流域に位置する全分区の集合を X とするとき、分区 i に投資する望ましさの度合は

$$K(i) = \sum_{i \in X} \{r(i, t^*(i)) \cdot \Lambda(i)\}$$

と表すことが出来る。ここで、 α が正であれば、現在取り込める負荷量を将来取り込む負荷量よりも大きく見積ることになるため、 $t^*(i)$ 年次以降の、分区 i およびその上流の全ての分区の負荷量をいずれも小さく見積ることになる。 α の値を計画対象全域一律と仮定すれば α は負荷の時間的割引率そのものを意味する。たとえば実際の投資計画から逆算された α は、その計画対象全地域において考慮された下水道整備計画の時間割引率であったと解釈することができる。しかし、E を最大とする投資配分の計算には α の値を分区固有の値と解釈し、逐次計算によって α の値の組、 $\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^i$ を求めなければならない。後者の場合、 α は近似的に E を最大化する逐次計算のための操作変数として位置づけられる。すなわち、分区ごとの α の値を上流ほど大きく設定すれば、効率性 E は一律 α 設定の場合に比べて高い値をとって収束する。分区 i の n 回目の逐次計算に用いる $\alpha_{i,n}$ は α_0 (任意に設定) に (分区の整備年次/計画最終年次) を乗じて設定した。

なお、効率性指標 E における最適近似解を求める際に公平性指標 F でそれぞれの解を評価し、これら二つの評価が相互に高い解集合を最適近似解とした。

5. 事例評価

ここでは人口9万2千人のA市の下水道計画を参考にして作成した仮想計画について、上記手法による事例評価を試みた。A市は昭和48年より着手された流域下水道計画に含まれ、昭和52年より公共下水道工事に着手している。一部の地域で昭和57年より下水道の供用を開始し、工事認可となっている管渠延長160.1kmのうち、昭和62年度現在で管渠延長 93.1km（整備率58.2%）、また63年度末では管渠延長 12.9km増しの 106.0km（整備率66.2%）と見込まれている。分析は現在まで進捗した下水道整備計画に対する回顧的分析と、未整備部分に対する予測的分析に分けて行った。図-1 にはA市の下水道ネットワークの形状（流域下水道幹線部分と公共下水道幹線部分）と分区番号が示されている。

5.1 データの作成

分区ごとの投資効果指数を求めるには、各分区の負荷密度の予測を行わなければならない。人口は国勢調査人口をもとに分区ごとの予測値を計算し、工場排水量は実績調査値を用い、いずれも分区面積当りの密度に換算した。また、分区内の負荷密度分布は下水道計画の分区割りに左右されるため地図情報をもとにデータを作成するデータ作成支援プログラムを開発した。下水道ネットワーク建設費用の算定は、管渠径と工法、埋設深さを変数とする費用関数を用いて分区ごとに求め、モデルの中では全体の建設費用に対する比を用いて計算した。インフレーションに伴う物価上昇による影響や地形・地理的条件などは考慮していない。

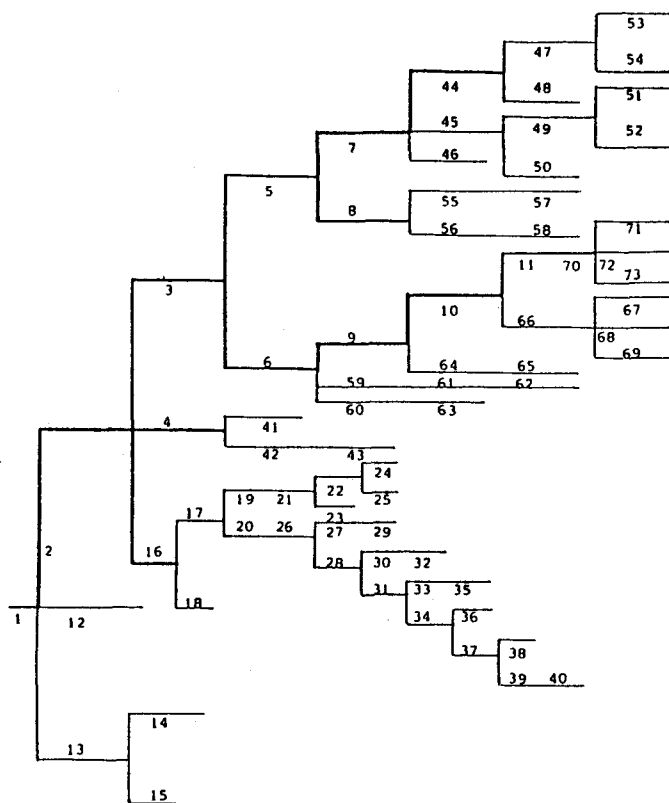


図-1 線整備ネットワークの形状と分区番号

5.2 効率性指標 E と公平性指標 F のパレート関係図

① 回顧的分析

5.1 で求められた投資パターンを用いて1982年から1989年の8年間についてシナリオ分析を行い、線整備のE-Fパレート近似解集合を求めた。この期間に対象としたのは 図-1 に示すネットワークのうち(13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 55, 56, 57, 58, 59, 64, 65, 66, 69, 70, 71) によって構成される部分である。計算の結果は 図-2 の実線をパレート最適値とする集合(+)によって表される。この図から以下の考察が可能である。すなわち、効率性指標値Eは0.53から0.68の範囲をとった。面整備は瞬時に完成するものとすれば、線整備投資配分によってはこの期間の発生負荷量の積分値の53%から68%の削減が可能であることを意味する。一方、公平性指標値Fは -2.0 から -1.58 の範囲であったが、これは線整備が計算上ネットワーク末端部分に到達する年次と理論最短完成年次の差の偏差が、悪くて 2.1 年、良くて1.58 年であったことを示す。

また、同期間中に進捗した線整備状況から既に完了した実際計画のE値(0.56)、F値(2.16)は同じ期間の整備実績から回顧的に求め、同じく 図-2 にプロット(□)した。これによれば、実績値はパレート近似解集合から比較的大きく外れていたことが分かる。データの信頼性や計算誤差を問わなければ、これは計画の進め方によっては上記の効率性も公平性も改善する余地が存在し得たこと、また実際計画には上記の効率性、公平性以外の要素が考慮されていたであろうことなどを示していると考えることが出来る。表-1 には実際計画、回顧的代替計画 A、回顧的代替計画 B のそれぞれについて投資年次と線整備完了分区の対応関係が示されている。表から明らかなように実際計画は回顧的代替案 A と B のいずれとも異なった整備年次状況を呈している。

表-1 実際計画による整備年次と回顧分析による進捗シナリオ例

整備年次	投資額	完成管渠分区番号		
		実際計画	回顧分析値 A	回顧分析値 B
1982	8.8	18, 45, 47, 55, 57, 70	13, 14, 15, 46, 47, 55, 56, 57, 64	13, 15, 46, 56
1983	7.2	41, 42, 43, 49, 64, 65	45, 49, 58, 65, 66, 69	14, 45, 47, 55, 64
1984	2.7	13, 52, 56, 58	—	49, 57, 58
1985	0.0	—	—	—
1986	13.5	14, 17, 50, 59	18, 42, 50, 51, 52, 59, 70	18, 41, 42, 50, 51, 52, 59, 59, 65, 66, 69, 70, 71
1987	16.5	20, 51, 71	17, 19, 21, 41, 43, 71	17, 19, 21, 43
1988	7.7	15, 19, 46, 66, 69	—	—
1989	1.2	21	20	20
合計	57.7	—	—	—

*投資額合計は計画管渠費用全体に対する完成管渠費用の比率(%)である。

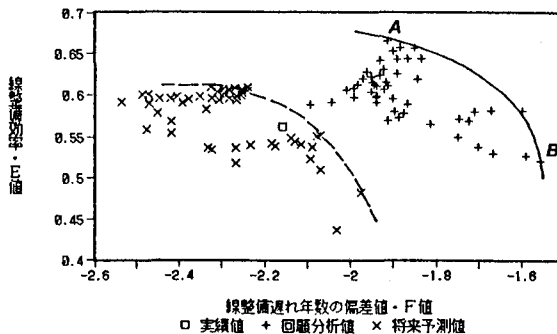


図-2 回顧分析と将来予測のE-F散布図
とパレート近似解集合

② 未完成部分の投資シナリオ評価

1990年現在から2000年までの11年間について、仮想投資パターン（総費用を年次毎に一律に分配）を用いて未完成部分のシナリオ分析をし、その結果(×)を同じ 図-2 上に示した。これによれば、将来計画はE値、F値とも回顧分析の場合に比較して低くなる。これは、全体計画期間が長いほど区分ごとの完成年次にばらつきが生じ公平性の評価値が悪くなることを示しており、効率性はそれぞれの完成目標年次に対する発生負荷量と取り込み負荷量の比で表されているため、取り込み負荷量の絶対値の比較を行うと完成目標年次が短い方が多く傾向があることを示しているに過ぎない。従って、計画期間の異なるプロット（たとえば 図2 の+と×）の相対的位置関係を一意的に論ずることはできない。しかし、いずれの場合も図のパレート最適近似解を含めて将来計画の代替案の選択を検討することは非常に有意義であろう。

第7章 結論

本報告の目的は、面的、時間的に多様な計画要素含む下水道線整備のシナリオを分析する方法論の提示であった。効率性と公平性の指標を定め、計画代替案のパレート近似解集合図を示すことによって下水道整備の目標達成度をより定量的に評価することができる。

とくに解析手法については、下水道の負荷量の増加は非線形であるうえ、下水道ネットワークは複雑な形状をしており、従来、効率性指標 E を最大にする定式は著しく難解かつ複雑で、シナリオ分析に適用することに無理があった。ここでは簡便な定式化をしたうえヒューリスティックに解を導き出す方法を開発し、対話的なシナリオ分析を行えるように工夫した。

この方法は建設が実際に進行中の計画の進捗度の回顧的分析や、将来にわたる計画の見直しの検討にも適用が可能である。また、別途開発中の面整備評価モデルと連動させれば、線整備と面整備の時間的なずれ、面整備区分内の負荷削減プロファイル、河川汚濁負荷削減プロファイルなどを求めることが可能であり、広大な計画区域をもつ下水道計画の長期未整備地域対策シナリオの分析に適用できる。

今後の引き続き検討を要する課題としては、① 効率性、公平性をあらわす他の形態の指標値の検討、② 効率性、公平性以外の指標の導入、③ 負荷予測の不確定性の考慮、などである。

本研究の遂行に当たり立命館大学の山田淳教授、浅岡英二氏、新日本技術コンサルタント、黒田幸智氏に多大のご協力をいただいた。記して謝意を表します。

8. 参考文献

- [1] 建設省都市局下水道部：下水道整備の方向と手法に関する調査、1988.3
- [2] 総務庁行政監察局 編：下水道の現状と問題点 ―総務庁の行政監察結果からみて―、1989
- [3] 滋賀県琵琶湖研究所：政策分析手法研究会報告書、1989
- [4] 米花哲也：効率的な下水道整備順位の検討、東京大学工学部都市工学科卒業論文、1986.12
- [5] 高田潔：下水道計画区域の策定方法に関するメッシュ法を用いた考察、東京大学工学部都市工学科卒業論文 1986.2
- [6] 立命館大学理工学部土木工学科 黒田幸智：環境工学分野における多基準序列解析手法の応用事例分析、1990
- [7] ㈱日本水道コンサルタント：分流式下水道の污水管および処理場に対する最大有効投資計画とそれに関する二、三の問題点の検討、1967
- [8] 社団法人 日本下水道協会：下水道整備計画のシステム分析的研究調査報告書、1973.3