

発展途上国における上下水道施設投資計画のためのファジィLPモデルに関する研究

Study on the Fuzzy LP Model for Investment Planning of Water Supply and Sewerage Systems in Developing Countries

森正蔵* 小泉明**
Syozo MORI* Akira KOIZUMI**

Abstract : The fields of water supply and sewerage systems are related closely within the realms of environment, so the usual investment type where water supply systems always precede sewerage systems is improper. It is therefore necessary to widely consider the most suitable investment balance of both systems corresponding to the nature of districts for a more integrated and effective technological cooperation. For this reason, we propose a fuzzy LP (Linear Programming) model that makes possible integrated investment planning of water supply and sewerage systems focusing on plural districts belonging to same basin. In this model, reduction of water born diseases and improvement of water quality of river are considered the purposes of investment of water supply and sewerage systems, and this model break through a limit of ordinary cost-benefit analysis using basic methods of cost-benefit analysis and multipurpose fuzzy linear programming together. The study focuses on Thailand as a case study using this fuzzy LP model, and for the first time, we provided a unified cost functions of water supply and sewerage systems in Thailand. Based on the case study, it became quantitatively clear that investment of sewerage systems should precede water supply systems under certain circumstances, especially in recent times when the importance of preservation of water quality of river is increasing in developing country.

Key words : water supply and sewerage systems, investment planning, multipurpose, fuzzy linear programming, developing country

1. はじめに

従来、我が国の政府開発援助では、上水道・下水道・廃棄物・国際保健等の衛生分野に対して別々に基本計画を作成してきたが、最近ではより総合的かつ効果的な技術協力が求められている¹⁾。特に上水道と下水道の分野は環境を接点として密接に関わり合っているにも関わらず、これまで発展途上国に対し、単に上水道を下水道に先行して整備してきた。そのため、例えば河川の上流側に上水道のみを整備した結果、大量の汚水が発生して河川が汚染され、下流側で河川水を生活用水としている低所得者の生活を悪化させる等の問題が生じていると考えられる。発展途上国に対する技術援助において、単に上水道先行型の整備が行われている第1の理由として、我が国の上水道整備が下水道整備に比べ大幅に先行して行われたために、Basic Human Needs である上水道を必ず下水道に先行して整備する事を常識だとする日本特有の先入観に囚われている事が考えられる。この事は、ヨーロッパではベスト等の大流行を受け早くから本格的な下水道整備を行った地域があるにも関わらず、我が国において、国際協力の対象となる地域における上水道と下水道のプライオリティを定量的に計算し比較を試みた例が本論文の前身となった論文²⁾しかない事からも明らかである。また、上水道先行型の整備が行われている第2の理由として、上水道と下水道の整備効果には貨幣換算出来ない効果も含め多数の効果が存在するために、通常の費用便益分析³⁾や費用効果分析⁴⁾では上下水道の最適な整備バランスを検討する事が出来ないという既存の計画手法の限界が考えられる。さらに、第3の理由として、上下水道施設の総合的な投資計画を行う上で、発展途上国の上水道及び下水道の事業費用を計算するために必要な費用関数が JICA 等の機関により殆ど整備されてこなかった事が考えられる。

以上のような背景から、本論文では同一河川流域内にある複数の地域を対象に⁵⁾、地域特性に応じた上水道と下水道の最適な整備バランスを総合的に検討するため、費用便益分析の基本的な考え方とファジィ線形計画法

* 東京都立大学大学院工学研究科, Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ.

** 東京都立大学大学院工学研究科教授, Prof., Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ.

(Fuzzy Linear Programming)⁶⁾を併用する事で、初めて上下水道施設の総合的な投資計画を可能にしたファジィLPモデルを提案する。

以下、2. ではファジィLPモデルについて詳しく説明すると共に、モデルの定式化を行う。3. では上水道及び下水道事業の費用データ等が最も蓄積されているタイ国について、各事業費用を計算するために必要な各種の費用関数を作成する。4. では定式化したファジィLPモデルと作成したタイ国の費用関数を用いて、タイ国のモデル地域を対象にしたケーススタディを行い、その結果から発展途上国における上下水道施設の最適な整備バランスについて詳しく考察する。また、5. では本研究により得られた成果をまとめると共に、以後、発展途上国で行われる上水道及び下水道の整備計画に対して明確な提言を行う。

2. ファジィLPモデル

ここでは同一河川流域内にある複数の地域を対象に、上水道と下水道の最適な整備バランスを、地域特性を考慮して総合的に検討する事が出来るファジィLPモデルについて説明すると共に、モデルの定式化を行う。

2.1 費用便益分析とファジィ線形計画法

発展途上国における上水道と下水道の整備には、水系感染症の削減効果や水汲み労働の軽減効果などの比較的貨幣換算が容易な効果の他に、河川水質の改善効果や水使用量の増加に伴う各産業の活性化効果などの貨幣換算が困難な効果も存在する。そのため、通常費用便益分析では上下水道整備の各効果を合計したり比較する事が出来ず、各効果の合計が特定予算内で最大となる様に最適案を決定する事が出来ない。この事は、費用便益分析の限界として良く知られている。従来の投資計画では、このような限界に対し、貨幣換算出来ない効果については事業目的として考慮しなかったり、その他の貨幣換算可能な効果の合計額に特定の割合で直接貨幣換算出来ない効果を上乘せするなどの方法により対処してきた。しかし、このような方法は不適切であり効果的な投資計画を行う事が出来ないため、提案するファジィLPモデルでは、費用便益分析の基本的な考え方と多目的な問題を扱えるファジィ線形計画法を併用する事により、この費用便益分析の限界を打破する。

ファジィLPモデルの中核的な機能は、ファジィ線形計画法を応用する^{7),8)}事により、上下水道整備の目的として考慮する各効果の内、貨幣換算出来る効果と出来ない効果の重要度のバランスを計画者が任意に設定し、各効果の合計が最大となる最適案を決定出来る事である。ただし、ファジィLPモデルでは、計画者が漠然と目的として考慮する各効果の重要度のバランスを設定するのではなく、通常ファジィ線形計画法を改良する事により、この重要度のバランスを容易かつ明確に設定出来る様にしている。また、上下水道整備の目的として考慮する各効果の内、費用便益分析の基本的な考え方により貨幣換算出来る効果については全て貨幣換算する事で、各効果の大きさや重要性を把握し易くすると共に、貨幣換算された各効果を合計する事により重要度のバランスを設定する効果の指標数を減らし、計画者がより各効果の重要度のバランスを容易に設定出来る様にしている。ただし、考慮する各効果の重要度のバランスは、本論文では計画者が地域特性や上位計画などを考慮して任意に設定するものとして記述するが、仮想的市場評価法 (Contingent Valuation Method 以下CVMと呼ぶ)³⁾と同様に、住民のアンケートにより決定する事も可能であると考えられる。

2.2 上下水道整備の複数目的と評価指標

次に、提案するファジィLPモデルにおいて、実際に上下水道整備の目的として考慮する効果について説明する。総合的な上下水道施設投資計画の第1歩として提案するこのファジィLPモデルでは、議論を複雑なものにしないために、まず効果の貨幣換算が比較的容易である水系感染症の削減と効果の貨幣換算が困難である河川水質の改善という2つの効果のみを上下水道整備の目的として考慮する。この他の効果についても地域特性に応じて考慮する必要がある場合については、出来るだけ考慮する事が好ましいが、本論文では、この水系感染症の削減と河川水質の改善という最も代表的な2つの効果を考慮する事により、発展途上国の一般的な地域に対して十分に効果的な上下水道施設投資計画を行う事が出来ると考えた。

コレラ、赤痢、チフス等の水系感染症を削減する事は、直接生命に関わる問題であるため、発展途上国における上下水道整備の最も重要な目的であり、過去、日本においては水系感染症を削減するために上水道を先行して

整備した。一方、ヨーロッパではベスト等の大流行を受けて早くから下水道を本格的に整備している。ファジィLPモデルでは、水系感染症の削減効果を貨幣換算して示す指標として、まず各対象地域における上下水道整備による各年での推定削減水系感染症発生数に水系感染症1回当たりの平均医療費等を掛け、合計する事により年間削減水系感染症医療費RW(t)とし、さらに各年のRW(t)を割引率rを考慮して合計する事により求められる対象地域全体での総削減水系感染症医療費RWを採用した。ただし、このような貨幣換算方法は医療費用法³⁾と呼ばれており、低所得者に対しても医療費の支払い意志に関係なく水系感染症の削減効果を計算する特徴を持っている。以下に、総削減水系感染症医療費RWの計算式として(1)式～(4)式を示す。ただし、ファジィLPモデルでは、同一河川流域内にある複数の対象地域を下流側から順に、1番対象地域からa番対象地域まで番号付けする。また、各対象地域を称してi番対象地域(i=1, 2, ..., a)と呼ぶ。

$$RW = \sum_{t=0}^{n-1} \frac{RW(t)}{(1+r)^t} \dots\dots\dots (1)$$

$$RW(t) = \left\{ \sum_{i=1}^a \left[(\kappa i(t) - \kappa i(0)) \times \omega \kappa + (\nu i(t) - \nu i(0)) \times \omega \nu \right] \right. \\ \left. \times P_i \times w_i / (1 - \kappa i(0) \times \omega \kappa - \nu i(0) \times \omega \nu) \right\} \\ \times (HC + LC) \times HP \dots\dots\dots (2)$$

$$\kappa i(t) = \kappa i(0) + \{ (\kappa i(tg) - \kappa i(0)) / (tg - ss + 1) \} \times (t - ss + 1) \dots\dots\dots (3)$$

$$\nu i(t) = \nu i(0) + \{ (\nu i(tg) - \nu i(0)) / (tg - ss + 1) \} \times (t - ss + 1) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、RW：総削減水系感染症医療費(通貨単位)、RW(t)：t年後での年間削減水系感染症医療費(通貨単位)、t：計画初年度からの年数(年)、n：プロジェクトの評価期間(年)、r：割引率、a：対象地域の数、 $\kappa i(t)$ ：i番対象地域におけるt年後での上水道普及率、 $\nu i(t)$ ：i番対象地域におけるt年後での下水道普及率、 $\kappa i(0)$ ：i番対象地域における計画初年度での上水道普及率、 $\nu i(0)$ ：i番対象地域における計画初年度での下水道普及率、 $\omega \kappa$ ：上水道の普及による水系感染症の削減率、 $\omega \nu$ ：下水道の普及による水系感染症の削減率、 P_i ：i番対象地域の人口、 w_i ：i番対象地域における計画初年度での水系感染症発生率、HC：1人1日当たりの水系感染症平均入院費用(通貨単位)、LC：1人1日当たりの平均収入(通貨単位)、HP：水系感染症1回当たりの平均入院日数(日)、 $\kappa i(tg)$ ：i番対象地域における計画目標年度での上水道普及率、 $\nu i(tg)$ ：i番対象地域における計画目標年度での下水道普及率、ss：上水道及び下水道のサービス開始年数(年)、tg：計画目標年度までの年数(年)

一方、河川水質の改善は、近年発展途上国においても大変重要視されつつある課題であり、特に先進国が行う技術援助においては、発展途上国の将来の環境を守るために、必ず考慮すべき問題であると言える。河川水質の改善効果を貨幣換算するためには、河川水質の変化が住民の生活並びに各産業及び生態系に与える影響等を別々に貨幣換算し合計する必要があるため大変困難であるが、最近では河川水質の改善効果をCVMにより貨幣換算した事例が幾つか行われている⁹⁾。しかし、CVMは調査の信頼性を弱める様々なバイアスの影響を受ける³⁾と同時に、医療費用法により医療費の支払い意志に関係なく貨幣換算した水系感染症の削減効果と支払い意志額の総額を求めるCVMによって貨幣換算した河川水質の改善効果を比較もしくは合計する事は出来ない。そのため、ファジィLPモデルでは、河川水質の改善効果を貨幣換算せず、この効果を定量的に示す指標として、各対象地域の河川に到達する総BOD汚濁負荷量を各対象地域の平均河川流量で割る事により求められる各対象地域における平均BOD濃度T_{Bi}を採用した。ただし、各対象地域の河川水質は、その地域の河川上流側に位置する地域とその地域内から河川に到達する汚濁負荷の影響を受けると仮定した。以下に、i番対象地域における平均BOD濃度T_{Bi}を求める計算式として(5)式～(7)式を示す。ただし、(6)式は、JICAの報告書¹⁰⁾を参考に作成したものであり、(7)式は日本下水道協会が出版した文献⁵⁾にまとめられている計算式である。また、これらの式では、各対象地域を汚濁負荷の発生源として扱う場合にj番対象地域(j=1, 2, ..., a)と呼ぶ。

$$T_{Bi} = \left(\sum_{j=1}^a E_{Bij} + U_{Bi} \right) / Q_{Ri} \dots\dots\dots (5)$$

$$E_{Bij} = \left\{ \nu_j(tg) \times (1 - \xi_{800}) \times (SBOD + ZBOD) \right. \\ + (1 - \nu_j(tg)) \times \delta_j \times \varepsilon_j \times (1 - \zeta_{800}) \times \theta_j \times (SBOD + ZBOD) \\ + (1 - \nu_j(tg)) \times \alpha_j \times \beta_j \times (1 - \gamma_j) \times (1 - \eta_{800}) \times \theta_j \times SBOD \\ + (1 - \nu_j(tg)) \times (1 - \alpha_j - \delta_j + \alpha_j \times (1 - \beta_j)) \times \phi_j \times \theta_j \times SBOD \\ \left. + (1 - \nu_j(tg)) \times (1 - \delta_j \times \varepsilon_j) \times \theta_j \times ZBOD \right\} \times \text{Exp}(-K_{800} \times RT_{ij} / 24) \times P_j \dots\dots\dots (6)$$

$$\theta_j = \{10^{(2.0/(1+\exp(-3.04 \times \log_{10}((P_j/A_j)/(A_j^{0.5}))+6.34)))/100} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 TBi : i 番対象地域における計画目標年度での平均 BOD 濃度(mg/L), UBi : 対象地域外から i 番対象地域に到達する BOD 汚濁負荷量(g/日), E_{Bij} : 計画目標年度において j 番対象地域から i 番対象地域に到達する BOD 汚濁負荷量(g/日), QRi : i 番対象地域における平均河川流量(m³/日), $v_j(tg)$: j 番対象地域における計画目標年度での下水道普及率, $SBOD$: し尿に起因する平均 BOD 汚濁負荷量(g/日/人), $ZBOD$: 雑用水に起因する平均 BOD 汚濁負荷量(g/日/人), α_j : j 番対象地域における計画初年度での個別処理普及率, β_j : j 番対象地域における計画初年度での個別処理における腐敗槽使用率, γ_j : j 番対象地域における計画初年度での腐敗槽を伴う個別処理の浸透処理率, ϕ_j : j 番対象地域における計画初年度での腐敗槽を伴わない個別処理の直接デバイス率, δ_j : j 番対象地域における計画初年度での公共処理普及率, ϵ_j : j 番対象地域における計画初年度での公共処理における腐敗槽使用率, ξ_{RO} : 下水道(活性汚泥処理)の BOD 処理効率, ζ_{RO} : 公共腐敗槽の BOD 処理効率, η_{RO} : 個別腐敗槽の BOD 処理効率, K_{RO} : BOD の自浄係数, P_j : j 番対象地域の人口, RT_{ij} : j 番対象地域から i 番対象地域に到達する BOD 汚濁負荷の河川流下時間(時間), θ_j : j 番対象地域における BOD 流達率, A_j : j 番対象地域の面積

2.3 ファジィLPモデルの定式化

次に、水系感染症の削減効果及び河川水質の改善効果を示す指標である総削減水系感染症医療費 RW と i 番対象地域における平均 BOD 濃度 TBi を用いて、最適な上下水道の整備バランスを決定するファジィLPモデルの構成について説明すると共に、ファジィLPモデルを定式化して示す。ただし、このモデルでは、各対象地域における計画目標年度での最適な下水道普及率 $\kappa_i(tg)$ 及び下水道普及率 $v_i(tg)$ を明らかにする事により、最適な上下水道の整備バランスを決定する。

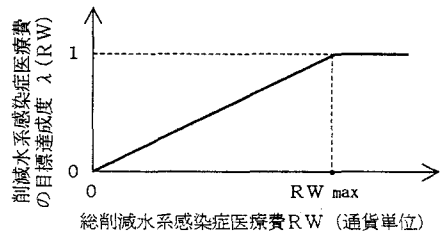
ファジィLPモデルにおいて応用するファジィ線形計画法は、線形計画法と同様に、各種の制約条件を設定し、目的関数が最大になる様に最適案を決定する手法であるが、単一目的しか取り扱う事が出来ない線形計画法とは異なり、メンバシップ関数⁶⁾を用いる事により複数の目的を同時に考慮する事が出来る。

また、このモデルでは、整備目的として考慮する各効果に対して明確に目標値を設定し、さらに設定した各目標値の達成度を重み付け和オペレータと名付けた目的関数により扱う事で、考慮する2つの目的の重要度のバランスについての計画者の意向を明確に反映させて、最適な整備バランスを決定出来る。

考慮する目的の1つである水系感染症の削減に対しては、各対象地域における上下水道を全て100%整備する場合に達成される目標総削減水系感染症医療費 RW_{max} を設定し、もう1つの目的である河川水質の改善に対しては、各上下水道を全て100%整備する場合に達成される各対象地域での目標平均 BOD 濃度 TBi_{min} を対象地域の数だけ設定する。

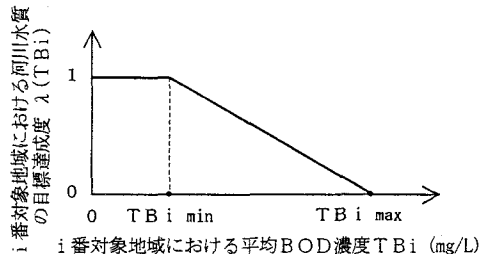
また、特定の整備案により目標総削減水系感染症

医療費 RW_{max} 及び各目標平均 BOD 濃度 TBi_{min} が達成される程度を削減水系感染症医療費の目標達成度 $\lambda(RW)$ 及び i 番対象地域における河川水質の目標達成度 $\lambda(TBi)$ と定義し、それぞれを図-1 及び図-2 に示す各メンバシップ関数により求める。図-1 に示す削減水系感染症医療費メンバシップ関数では、(1)式~(4)式により求められる特定の整備を行う場合の総削減水系感染症医療費 RW を目標総削減水系感染症医療費 RW_{max} で割る事により削減水系感染症医療費の目標達成度 $\lambda(RW)$ を求めている(9)式を参照)。また、図-2 に示す i 番対象地域における河川水質メンバシップ関数では、(5)式~(7)式により求められる特定の整備を行う場合の i 番対象地域での平均 BOD 濃度 TBi から目標平均 BOD 濃度 TBi_{min} を引いた値を、計画初年度での平均 BOD 濃度 TBi_{max} から目標平均 BOD 濃度 TBi_{min} を引いた値で割り、その値を1から引く事により i 番対象



ただし、 RW_{max} : 目標総削減水系感染症医療費 (通貨単位)

図-1 削減水系感染症医療費メンバシップ関数



ただし、 TBi_{min} : i 番対象地域における目標平均 BOD 濃度 (mg/L)
 TBi_{max} : i 番対象地域における計画初年度での平均 BOD 濃度 (mg/L)

図-2 i 番対象地域における河川水質メンバシップ関数

地域における河川水質の目標達成度 λ (T B i)を求めている((10)式を参照)。

ファジィLPモデルでは、この様に求められた削減水系感染症医療費の目標達成度 λ (RW)及びi番対象地域における河川水質の目標達成度 λ (T B i)に、削減水系感染症医療費の目標重要度 α 及びi番対象地域における河川水質の目標重要度 β_i を掛け、さらにそれを合計する事で求められる値を重み付け和オペレータと定義し、これを目的関数として最大化する事により最も投資効果が高い最適な上下水道の整備バランスを決定する。目的関数である重み付け和オペレータについては、(8)式に定式化して示した。ファジィLPモデルの利点は、(8)式中の削減水系感染症医療費の目標重要度 α とi番対象地域における河川水質の目標重要度 β_i の値を、2つの目的について計算された各目標値RWmax, T B i minを参考に、計画者が地域特性等を考慮して任意に設定出来るため、考慮する2つの目的の重み付け、つまり重要度のバランス設定を容易かつ明確に行う事が出来る事である。ただし、 β_i の合計値と α の値の比は、水系感染症の削減と河川水質の改善という2つの目的の重要度の比である。また、重み付け和オペレータは、基本的には通常の和オペレータ⁶⁾と同じであるが、メンバシップ関数の形状及び値を変化させる事なく各目標の重要度のバランスを設定する事が出来る様に、本研究において改良したオペレータである。

次に、このファジィLPモデルにおいて設定する各種の制約条件について説明する。(8)式に示した重み付け和オペレータを構成している削減水系感染症医療費の目標達成度 λ (RW)及びi番対象地域における河川水質の目標達成度 λ (T B i)は、既に説明した様に各メンバシップ関数により求められるが、(9)式に示す削減水系感染症医療費のファジィ制約条件及び(10)式に示す各河川水質のファジィ制約条件は、各メンバシップ関数を組み込んだ上で定式化されている。また、特定の予算内で最適案を決定するために、(11)式に示す予算の制約条件を設定した。さらに、上水道整備により十分な下水量⁷⁾を確保する事により下水管渠内での汚物の沈殿を防ぐ下水量の制約条件を(12)式に示した。その他に、このモデルでは、各対象地域における計画目標年度での上下水道普及率等の各決定変数 $\kappa_i(tg)$, $\nu_i(tg)$, λ (RW), λ (T B i)が取り得る範囲を、(13)式～(16)式に示す制約条件式により表した。

< 目的関数 > 重み付け和オペレータの値を最大にする。

$$\alpha \times \lambda(RW) + \sum_{i=1}^a \beta_i \times \lambda(T B i) \rightarrow \max \quad \dots \dots \dots (8)$$

< 制約条件 >

① 削減水系感染症医療費のファジィ制約条件

$$\lambda(RW) \leq RW/RW_{\max} \quad \dots \dots \dots (9)$$

② 各河川水質のファジィ制約条件 (i = 1, 2 … a)

$$\lambda(T B i) \leq 1 - (T B i - T B i_{\min}) / (T B i_{\max} - T B i_{\min}) \quad \dots \dots \dots (10)$$

③ 予算の制約条件

$$TC \leq C \quad \dots \dots \dots (11)$$

④ 各下水量の制約条件 (i = 1, 2 … a)

$$AY_i' \geq Y \quad \dots \dots \dots (12)$$

⑤ 各決定変数が取り得る範囲を示す制約条件 (i = 1, 2 … a)

$$\kappa_i(0) \leq \kappa_i(tg) \leq 1, \quad \nu_i(0) \leq \nu_i(tg) \leq 1 \quad \dots \dots \dots (13), (14)$$

$$0 \leq \lambda(RW) \leq 1, \quad 0 \leq \lambda(T B i) \leq 1 \quad \dots \dots \dots (15), (16)$$

ここで、 λ (RW) : 削減水系感染症医療費の目標達成度、 λ (T B i) : i番対象地域における河川水質の目標達成度、 α : 削減水系感染症医療費の目標重要度、 β_i : i番対象地域における河川水質の目標重要度、RW : 総削減水系感染症医療費(通貨単位)、RW max : 目標総削減水系感染症医療費(通貨単位)、T B i : i番対象地域における計画目標年度での平均 BOD 濃度(mg/L)、T B i min : i番対象地域における目標平均 BOD 濃度(mg/L)、T B i max : i番対象地域における計画初年度での平均 BOD 濃度(mg/L)、TC : 総事業費用(通貨単位)、C : 予算(通貨単位)、AYi' : i番対象地域における計画目標年度での最大水使用量(m³/日/人)、Y : 下水管渠内での汚物の流下に必要な1人1日最大水使用量(m³/日/人)、 $\kappa_i(tg)$: i番対象地域における計画目標年度での上水道普及率、 $\nu_i(tg)$: i番対象地域における計画目標年度での下水道普及率、 $\kappa_i(0)$: i番対象地域における計画初年度での上水道普及率、 $\nu_i(0)$: i番対象地域における計画初年度での下水道普及率

3. タイ国上下水道施設費用関数

ここでは、本論文で行うタイ国を対象としたケーススタディにおいて、上水道及び下水道の事業費用を事業規模に応じて計算するために、タイ国の上水道事業と下水道事業について統一的に作成した費用関数の説明を行う。ただし、ここで作成した各種の費用関数は2.で説明したファジィLPモデルの予算の制約条件に組み込まれる。また、ここでは、作成した各種の費用関数を比較し考察する事で、初めて上水道事業と下水道事業の費用規模及び費用構成の違いを明らかにする。

本論文では、急速ろ過処理を用いる一般的な上水道事業と活性汚泥処理を用いる一般的な下水道事業について各種の費用関数を作成した。これらの費用関数は、主にJICAの報告書等^{10)~21)}から収集したタイ国における過去の上水道及び下水道事業の費用データを、整備面積との相関が強い管渠施設建設費用と処理水量との相関が強い処理施設建設費用及び全施設年間維持管理費用の3つに分類し、それぞれをデフレーター^{22), 23)}を用いて1999年価格に変換してから事業規模との関係を図にプロットし、それを曲線により近似する事で作成した。ただし実際には、タイ国についての十分な数の使用出来る費用データが収集出来なかったため、日本の費用関数等^{5), 24)}から部分的に推定するなどの手法を併用して費用関数を作成した。作成した6つの費用関数は3つの費用分類ごとに図-3~図-5にまとめた。

また、これらの図から上水道事業と下水道事業の各費用関数を比較する事で、初めて各費用分類の全てにおいて、上水道事業に比べ下水道事業の費用が高い事が明らかとなった。特に、図-4から分かる様に、下水道管渠の建設費用は、同じ整備面積での送配水管渠の建設費用の4倍程度も必要であり、そのために同じ規模の上水道事業に比べ下水道事業の方が大幅に費用が掛かる事が明らかになった。

ただし、提案するファジィLPモデルでは、目的関数及び制約条件を線形式により表わす必要があるため、以下のケーススタディでは、これらの費用関数を線形化して用いる。

4. ケーススタディ

ここでは、2.で定式化したファジィLPモデルと3.で説明したタイ国の費用関数を用いてタイ国のモデル地域を対象としたケーススタディを行い、その結果から発展途上国における上下水道施設の最適な整備バランスについて詳しく考察する。

4.1 ケーススタディの計算

ケーススタディの対象とするモデル地域には、タイ国にある河川の上流側と下流側に位置する2つの地域を設定した。これらの地域の位置関係並びに、一般的に下流側に大都市が形成される事から設定した各人口及び面積を図-6に示す。また、ケーススタディで用いる他の設定値は、出来る限りJICAの報告書等^{1), 3)~5), 10), 20), 24)~27)}を

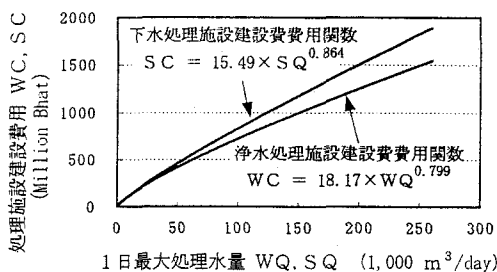


図-3 各処理施設建設費用関数の比較

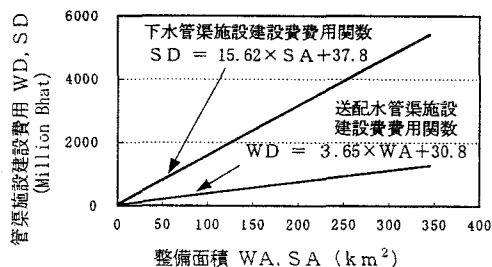


図-4 各管渠施設建設費用関数の比較

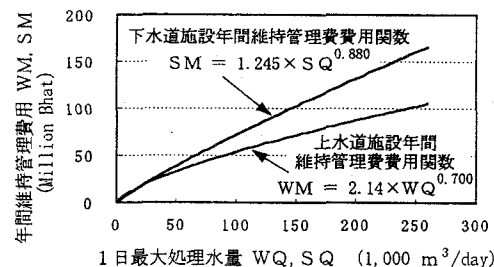


図-5 各施設年間維持管理費費用関数の比較

注) 2000年3月における交換レートは、1 Bhat ≈ 3円程度である。

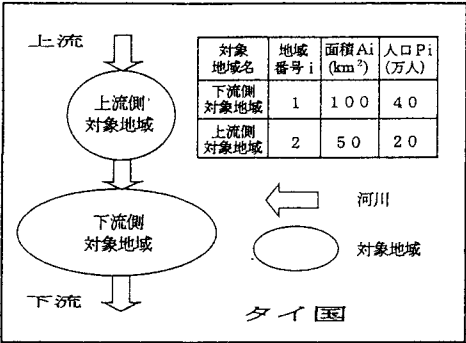
参考に決定し、採用した主な設定値を表―1にまとめた。設定値の重要な特徴の1つは、上水道と下水道の優先性を分かり易くするために、各対象地域における計画初年度での上水道及び下水道普及率 $\kappa_i(0)$ 、 $\nu_i(0)$ を全て0%に設定した点である。また、下流側対象地域における計画初年度での水系感染症発生率を上流側対象地域より高く設定した点も重要な特徴である。以上の様に各設定値を決定した結果、(1)式～(7)式により図―1及び図―2に示した各メンバーシップ関数の形状を決定するために必要な各目標値等の値は、目標総削減水系感染症医療費 $RW_{\max}=512.6$ (Million Bhat), 下流側対象地域における目標平均BOD濃度 $T_{B_i\min}=19.7(\text{mg/L})$, 下流側対象地域における計画初年度での平均BOD濃度 $T_{B_i\max}=78.5(\text{mg/L})$, 上流側対象地域における目標平均BOD濃度 $T_{B_j\min}=7.6(\text{mg/L})$, 上流側対象地域における計画初年度での平均BOD濃度 $T_{B_j\max}=32.0(\text{mg/L})$ と計算された。

実際の計画では、この様に計算された各目標値等を参考に、地域特性等を考慮して各目的の重要度のバランスを設定するが、このケーススタディでは重要度のバランスを特定の値とせず、以下に説明する3通り値を設定する。この3通りの重要度のバランスは、下流側及び上流側対象地域における河川水質の目標重要度 β_1 、 β_2 を共に0.5に固定して設定し、 β_1 と β_2 を合計する事で求められる河川水質全体での目標重要度($\beta_1+\beta_2=1$)に対する比として、削減水系感染症医療費の目標重要度 α を4.0、2.0、0.5の3通り設定する事により決定する。また、このケーススタディでは、設定した各重要度のバランスにおける予算Cに応じた上下水道の最適な整備バランスの変化を計算する。

4.2 結果の考察

ここでは、まず水系感染症の削減を河川水質の改善の4倍重要視する場合($\alpha=4.0$)、2倍重要視する場合($\alpha=2.0$)、及び反対に、河川水質の改善を水系感染症の削減の2倍重要視する場合($\alpha=0.5$)について、予算別に計算した計画目標年度における最適な各上下水道普及率の変化を図―7～図―9に示す。さらに、これらの変化を比較する事により、重要視する目的の違いに応じた最適な上下水道の整備順序について以下に考察する。ただし、これらの図では、ファジィLPモデルの決定変数である計画目標年度での下流側対象地域における上水道普及率 $\kappa_1(\text{tg})$ を○(X_1)、上流側対象地域における上水道普及率 $\kappa_2(\text{tg})$ を△(X_2)、下流側対象地域における下水道普及率 $\nu_1(\text{tg})$ を●(X_3)、上流側対象地域における下水道普及率 $\nu_2(\text{tg})$ を▲(X_4)として示した。また以下において、例えば下流側対象地域における下水道を下流側下水道と略して表記する。

図―7から分かる様に、水系感染症の削減を河川水質の改善の4倍重要視する場合には、単位費用当たりの水系感染症削減効果が高い各上水道○、△の整備が各下水道▲、●の整備に比べ優先的に行われている。ただし、下流側上水道○が上流側上水道△より優先的に整備される計画となっているのは、計画初年度における下流側対象地域での水系感染症発生率を上流側対象地域の1.5倍に設定したためである。また、上流側下水道▲が下流側下水道●に比べ優先的に整備されているのは、上流側下水道▲の整備が河川の上流側と下流側の両方の水質を同時に改善する効果を持つためだと考えられる。また、図―7から、水系感染症の削減を河川水質の改善に比べて非



図―6 対象とするモデル地域

表―1 ケーススタディの主な設定値

設定する変数名	設定値
上水道及び下水道のサービス開始年数(年): ss	5
計画目標年度までの年数(年): tg	24
プロジェクトの評価期間(年): n	40
割引率: r	0.1
上水道の普及による水系感染症の削減率: ω_κ	0.63
下水道の普及による水系感染症の削減率: ω_ν	0.37
1人1日当たりの水系感染症平均入院費用(Bhat): HC	751.9
1人1日当たりの平均収入(Bhat): LC	23.5
1回の水系感染症当たりの平均入院日数(日): HP	14
下水道(活性汚泥処理)のBOD処理効率: ξ_{BOD}	0.92
公共腐敗槽のBOD処理効率: ζ_{BOD}	0.6
個別腐敗槽のBOD処理効率: η_{BOD}	0.55
し尿に起因する平均BOD汚濁負荷量(g/日/人): SBOD	17.5
雑用水に起因する平均BOD汚濁負荷量(g/日/人): ZBOD	20.6
BODの自浄係数: K_{BOD}	0.12
対象地域外から i 番対象地域に到達するBOD汚濁負荷量(g/日): UB_i	1.5×10^5
i 番対象地域での平均河川流量(m ³ /日): QRi	1.0×10^5
i 番対象地域における計画初年度での水系感染症発生率: w_i	下流: $i=1$ 上流: $i=2$ 0.03 0.02

常に重要な目的であると考えられる場合には、従来、我が国の技術協力において行ってきた上水道先行型の整備は妥当な判断であると言える。

図一8に示す水系感染症の削減を河川水質の改善の2倍重要視する場合については、図一7に比べて河川水質の改善を重要視した結果、河川水質の改善効果が高い上流側下水道▲が、計画初年度における水系感染症発生率が比較的低い上流側対象地域での上水道△より優先的に整備される計画となっている。

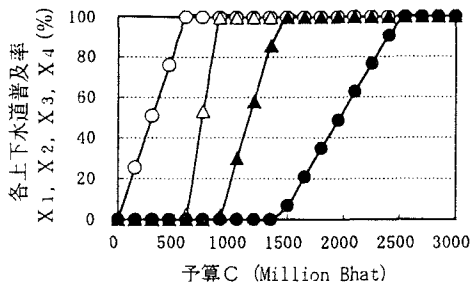
また、図一9に示す河川水質の改善を水系感染症の削減の2倍重要視する場合の結果は、図一8に比べ、さらに河川水質の改善を重要視した結果になっており、河川水質の改善効果を持つ各下水道▲、●の整備が各上水道△、○の整備より優先的に行われている。ただし、各下水道の普及率▲、●が全て100%になる前に、各上水道△、○が整備されているのは下水量の制約条件によるものであり、各上水道普及率△、○は同地域の下水道普及率▲、●の37.5%以上となっている。

図一8及び図一9に示した結果から、発展途上国においても水質保全が重要視されつつある現在においては、河川全体に対する水質改善効果が高い上流側下水道の普及率▲が計画初年度での水系感染症発生率が低い上流側対象地域の上水道普及率△よりも高くなったり、場合によっては、ほぼ下水道先行型の整備になる事が明らかになった。

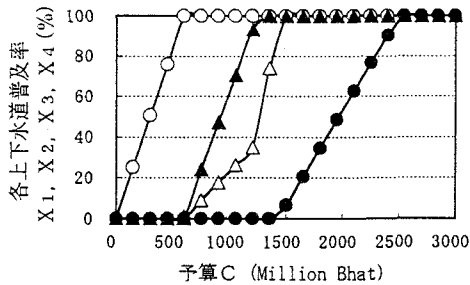
5. おわりに

ここでは、本研究で得られた主要な成果を以下に列記すると共に、今後の発展途上国における上水道事業及び下水道事業に関する方向性についての提言を行う。

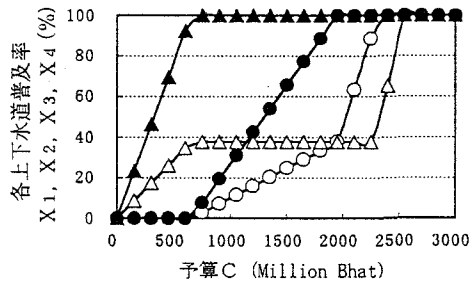
- 1) 発展途上国の同一河川流域内にある複数の地域を対象に、上下水道施設の総合的な投資計画を初めて可能にしたファジィLPモデルを開発し、さらにタイ国を対象にしたケーススタディを行う事により、ファジィLPモデルの高い有用性を実証した。
- 2) 本研究で提案したファジィLPモデルは、従来の費用便益分析の限界を乗り越えたものであり、様々な分野の投資計画にも応用が可能であると言える。
- 3) 上下水道事業について初めて統一的に費用関数を作成し、さらに作成した費用関数から同じ規模の上水道事業に比べ下水道事業の費用がかなり高い事を明らかにした。
- 4) 水系感染症の削減を河川水質の改善に比べて非常に重要な目的であると考えられる場合には、従来、我が国の技



図一7 水系感染症の削減を4倍重要視する場合の予算別最適上下水道普及率 ($\alpha=4.0, \beta_1=\beta_2=0.5$)



図一8 水系感染症の削減を2倍重要視する場合の予算別最適上下水道普及率 ($\alpha=2.0, \beta_1=\beta_2=0.5$)



図一9 河川水質の改善を2倍重要視する場合の予算別最適上下水道普及率 ($\alpha=0.5, \beta_1=\beta_2=0.5$)

ただし、○：下流側上水道 X_1 ，△：上流側上水道 X_2
●：下流側下水道 X_3 ，▲：上流側下水道 X_4

水系感染症の削減
重要視する目的(目標)
河川水質の改善

術協力において行ってきた上水道先行型の整備がある程度妥当な判断である事が明らかとなった。

- 5) 発展途上国においても水質保全が重要視されつつある現在においては、河川全体に対する水質改善効果が高い上流側地域における下水道の普及率を、現時点において水系感染症発生率が比較的低い地域での下水道普及率よりも高くしたり、場合によっては、ほぼ下水道先行型の整備が適しているという事が明らかになった。

本研究では以上の成果から、発展途上国に対する技術協力において、単に上水道を下水道に先行して整備するのではなく、今後は、本論文で行った様に上水道と下水道の総合的な投資計画により最適な整備バランスを決定すべきであると強く提言する。ただし、実際の計画に本論文で提案したファジィLPモデルを用いる場合には、水系感染症の削減効果と河川水質の改善効果以外の効果についても上下水道整備の目的として考慮する必要があるかを、対象とする地域の特性や上位計画に応じて検討し、必要があればその効果を定量的に示す指標をファジィLPモデルに組み込む必要がある。本論文で提案したファジィLPモデルは、このような事を考慮した拡張性の高いモデルとなっている。

なお、今後の課題としては、将来の人口についての不確実性を考慮する必要があるため、これをファジィ数としてモデルに追加する事が考えられる。また、各目標の重要度のバランスを、単に計画者が地域特性や上位計画を考慮して決定するのではなく、今後は住民に対するアンケートをベースにして決定する方法論についても検討したいと思っている。

【参考文献】

- 1) 日本下水道協会：途上国下水道整備マスタープラン策定支援指針(案)，p. 6，p. 101，参考資料編 p. 25，pp. 68-80，1997
- 2) 小泉明・王建華：上下水道施設投資計画の費用効果分析—北京市における研究事例—，月刊「水」，No. 555，pp. 26-33，1994
- 3) John A. Dixon, Louise Fallon Scula, Richard A. Carpenter and Paul B. Sherman: Economic Analysis of Environmental Impacts [New Edition]; 環境経済評価研究会訳：新環境はいくらか，築地書館，pp. 42-47，pp. 54-58，pp. 78-92，1998
- 4) 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)，1998
- 5) 日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説，p. 68，p. 106，pp. 223-225，p. 228，1996
- 6) 坂和正敏：線形システムの最適化，森北出版，pp. 189-190，1984
- 7) 小泉明・戸塚昌久・稲員とよの・川口士郎：都市ごみ収集輸送計画のためのファジィ線形計画モデル，土木学会論文集 No. 443，pp. 101-107，1992
- 8) 小泉明・稲員とよの・榊原康之・川口士郎：ファジィ理論を用いた水運用計画モデルに関する研究，水道協会雑誌 No. 712，pp. 38-46，1994
- 9) 栗山浩一：公共事業と環境の価値，築地書館，pp. 146-155，1997
- 10) 国際協力事業団 国際協力総合研修所：発展途上国の都市におけるし尿・雑排水処理の段階的改善計画手法の開発に関する研究—インドネシアにおける事例研究—報告書，p. 23，pp. 81-93，pp. 95-97，1995
- 11) 国際協力事業団：タイ国バンコク首都圏周辺水道建設計画フィージビリティ・スタディ・レポート，p. 36-38，p. 43，p. 59，pp. 172-176，1973
- 12) 国際協力事業団：タイ国地方都市水道整備計画調査最終報告書と文要約，第1部 Chap. 1 - p. 12，第1部 Chap. 2 - p. 18，第3部 Chap. 1 - p. 10，第3部 Chap. 2 - p. 9，第5部 Chap. 1 - p. 11，第5部 Chap. 2 - p. 9，第6部 Chap. 1 - p. 10，第6部 Chap. 2 - p. 6，1990
- 13) JICA: Development Plan and Feasibility Study on Provincial Water Supply Projects in the Kingdom of Thailand Final Report for Patum Thani & Prachatipat, Chap. 3 - p. 8, Chap. 4 - p. 14, Chap. 11 - p. 9, 1990
- 14) JICA: Development Plan and Feasibility Study on Provincial Water Supply Projects in the Kingdom of Thailand Final Report for Su Ngai Golok, Chap. 3 - p. 5, Chap. 4 - p. 9, Chap. 11 - p. 5, 1990
- 15) JICA: Development Plan and Feasibility Study on Provincial Water Supply Projects in the Kingdom of Thailand Final Report for Takua Pa, Chap. 3 - p. 5, Chap. 4 - p. 10, Chap. 11 - p. 4, 1990
- 16) JICA: Development Plan and Feasibility Study on Provincial Water Supply Projects in the Kingdom of Thailand Final Report for Tung Song, Chap. 3 - p. 5, Chap. 4 - p. 11, Chap. 11 - p. 4, 1990
- 17) JICA: Development Plan and Feasibility Study on Provincial Water Supply Projects in the Kingdom of Thailand Final Report for Phang Nga, Chap. 3 - p. 5, Chap. 4 - p. 10, Chap. 11 - p. 3, 1990
- 18) JICA: Development Plan and Feasibility Study on Provincial Water Supply Projects in the Kingdom of Thailand Final Report for Phuket, Chap. 11 - p. 11, 1990
- 19) 国際協力事業団：タイ国チャオビア川下流域下水道整備計画調査，Chap. 2 - pp. 87-102，1994
- 20) 国際協力事業団：タイ国チャオビア川下流域下水道整備計画調査事前調査報告書，pp. 15-16，1991
- 21) 国際協力事業団・土居通治：実務実施計画書，1992
- 22) 日本総合研究所：国際経済協力指針策定のための基礎調査 タイ報告書(第3分冊)，1995
- 23) アジア産業研究所：タイ経済・産業データハンドブック 96年版，1997
- 24) 日本下水道協会：下水道統計要覧，p. 110，1995
- 25) 国際協力事業団：タイ国バンコク市下水道整備計画マスタープラン調査報告書 第2巻 主要報告書，p. 190，1981
- 26) John A. Dixon and Maynard M. Hufschmidt: Economic Valuation Techniques for the Environment: 長谷川弘訳：環境の経済評価テクニック，築地書館，pp. 40-45，1993
- 27) 国際協力事業団 国際協力総合研修所：国立衛生研究所(タイ)，1995