

IV-7 下水道整備計画の時空間サバシステムとその統合に関する基礎的研究

(株)日本水道コンサルタント 正員 堤 武

〃 平野栄一

〃 中村正久

〃 大門良巳

1. 下水道整備計画の時空間システム

下水道整備計画には確定的、不確定的要素が複雑に入りまじり相互に関連を保っているため、それらの全てを定量的に把握し解析、評価することは不可能である。従って現段階で我々にかまざるは比較的簡単に扱える要素をとりだし、それらを有機的に結合し下水道整備計画システムの概況を時空間に投影して認識することであると考える。我々の最終目標とするのは global な閉システムの中での自然と人間の調和とれた活動であり、下水道計画はその重要な接点も構成する。例えば空間的には河海域、線(幹線)、面(支線)整備区域を含む計画対象区域がそれであり、それ自体時間のひろがりをもつものもある。又時間的には空間的ひろがりの制約の中で時間によって変化するシステムの状態を記述するもの(状態変数)とある評価基準を満たす状態を決定する性質のもの(決定変数)とがある。前者に属するものには人口、汚濁発生量等があり、後者には線、面整備状況、処理人口、河海汚濁状況等が相互関係を保ちつつ存在する。決定変数は種々制約条件(水質環境基準、投資上限等)下で主体者にとって最も合理的に決定されねばならない。ここでは下水道整備計画におけるいくつかの時空間サバシステムとそれらの有機的結合に着目してトータルシステムを定義しサブシステム間の循環フローの収束(トータルシステムの評価基準の満足)をもつて決定変数の値を定める方法を基礎的な段階で検討する。

図-1には筆者らの定義するトータルシステム(TS)とサブシステム(SS)の相互関係が模式的に示されている。これは各SSの解析過程においては独立したシステムとして扱われるが、その連結は計画主体の意図に従った代替フローに基づきTSの状態を明確に表現し、下水道整備プロセスの計画決定に科学的判断の指針を与えることをねらわれている。ここで時間とは与空間断面における変数群の経時的変域をさし、空間とは与時間断面におけるその空間の変域をさす。

2. 分析手法と評価基準

図-1に示したように我々のとり扱うTSは時間的、空間的に閉じたシステムであるにもかかわらず内部には経済的、社会的および技術的評価要因が無数に存在し、その多くは定量的に明確にし得ない。従って我々は基本的にはシステムの評価の多元的發展の余地を残しながらも各SSの分析手法、評価基準を比較的簡単にとり扱うことができる範

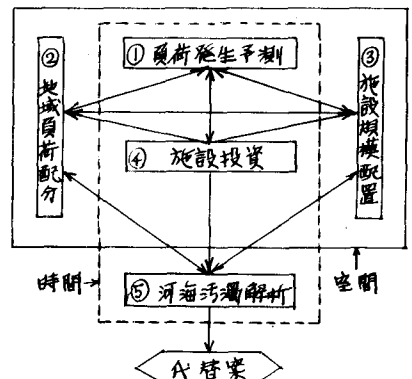


図-1 下水道計画システム

図に集中することにし、TS としての基礎的情報収集過程における整合性を重視することにした。

いわゆるシステムズアナリシスの分析手法として最も一般的に用いられているものは費用便益分析と費用有効度分析の二つである。これらの分析手法の適用は下水道計画の評価要因の複雑さと定量化の困難さによりそのまま行うことはできない。従って多分に不確実性を含んだ評価項目のうち特に定量化可能な項目をとり出し、そのうち夫々の SS の性格を最も適格に表現するものをもつて分析に供するようになる。この際上記分析手法の適用が不合理又は不可能と考えられる SS については TS 内で各サブシステム間の応答を矢張り範囲で費用、有効度（便益）又はそれらに於ける物理パラメーターのいづれかに着目した分析手法の適用がなされる。

TS の評価は任意に定められた評価 SS を基準として行う。例えば前述のゴとく我々の最終的な目標が自然-人間活動との調和であるとするならば河海汚濁解析 SS は一つの有効な評価基準である。しかし一般的には他の SS も同様に評価基準になり得、循環フローの始終点はその計画対象の性質によって変化する。図-1 に示したような TS の中での循環フロープロセスは次のゴとくである。

すなわち、地域負荷配分および施設規模配置両 SS による出力が下水道整備計画の初期入力の重要な部分を構成すると考へ両 SS の評価基準を満足するものについて幹線、処理場等の施設投資 SS に移行し、この出力を更に時空間的に河海域に投影してその影響を解析する。このプロセスは TS が評価基準を満足するまで繰り返されることになる。

3. サブシステム

前述のゴとく下水道計画サブシステムは相互に関連した循環プロセスを形成する。これを構成するサブシステムモデルの概要は次のとおりである。

SS-① 負荷発生予測サブシステム

現在最も広く採用されている方法は過去の時系列的負荷発生実績値を適当な負荷推定式に代入して将来の一点をおさえるものである。これに対して計画の立場からこの問題を「不健全情報」による決定の問題として把握する試みがなされている。¹⁾ 例えば将来人口が y である平均値、 $\bar{y}$ 、 y の偏差、 δ の両者が既知であるとして将来人口確率分布、 $f(y)$ は未知とあるもとで計画人口決定変数、 x の総費用期待値、 $E\{C(x)\}$ について自然にいかなる分布形、 $f(y)$ を戦略として採用してもよいように、 $\min_x \max_f E\{C(x)\}$ となる計画人口を決定することである。その際与えられる評価関数には、

$$E\{C(x)\} = g(x) + K \cdot \int_x^\infty f(y) dy$$

但し $g(x)$; 計画人口 x のときの下水道事業費を示す関数

K ; 下水処理量がオーバーフローするときのペナルティ費用（パラメーター）

$\int_x^\infty f(y) dy$; 将来人口が計画決定人口 x を越える確率

のゴときものが考へられる。このように予測から決定へ計画主体側の積極的意志が働かうならば図-1 の①より②、③、④に到る関係は一方的なものではなく循環プロセスの重要な構成要素となるべきである。現段階では予測の不確実性は TS への基礎入力の擾乱として扱われる種々の予測値について別途 TS への影響を解析することにせざるを得ることになる。又人口以外の汚濁負荷原単位の時空間的变化についても同様な考へ方が成立する。

SS-② 地域負荷配分サブシステム

SS-①より与えられる負荷の時間分布は下水道施設整備状況によりその様相を変化する。計画最終時間断面における地域負荷配分は少なくともTSの評価基準を満たすものでなくてはならないことからこのSSの循環フローの中で役割は次の二通りの場合がある。それらはまず施設規模配置SS(SS-③)の各時間断面における状況を与件とするが、又は最終状態を仮定した上で、その量的配分(面的整備)の時間的ダイナミクスを決定する場合²⁾と汚濁負荷量の地域的配分を種々の制約条件(例えば水質基準、投資上限等)下である目的関数(水質、費用又はそれらの複合関数等)を最大もしくは最小にように決定する場合である。後者の場合はそのシステム出力はSS-③の入力となる。前者を例にとれば、下水道整備区域内ある地区の将来年次における計画負荷発生量を $\omega_i(t) \cdot A_i(t)$ とし、自然的負荷カット率を $u_i^n(t)$ 、人為的カット率を $u_i^a(t)$ とすれば自然的、人為的カット量は次のように定義することができる。

$$C_i^n(t) = u_i^n(t) \cdot \omega_i(t) \cdot \left\{ A_i(t) - A_i(T) \cdot \int_0^t u_i^a(t) dt \right\} \quad i=1,2,\dots,N$$

$$C_i^a(t) = \omega_i(t) \cdot A_i(t) \cdot \int_0^t u_i^a(t) dt \quad i=1,2,\dots,N$$

これをもとに河川自浄作用を考慮しつつ評価関数Jが最大となるよう $u_i^a(t)$ を決定することができる。汚水取入れ建設単価を C_i 、物価上昇率を R 、金利率を i とすればJは例えば次のごとく表せる。

$$J = \int_0^T \left[\sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{t} (C_i^a(t) + C_i^n(t)) / (A_i(t) \cdot A_i(T) \cdot \omega_i(t) \cdot u_i^a(t) \cdot C_i \cdot \exp((R-i) \cdot t)) \right\} \right] dt \rightarrow \max$$

これは自浄作用を期待しつつ発生負荷量の大きい地区を優先的に整備することを指示している。

又現段階では未完であるがSS-②とSS-④を連立して解析するサブシステムは筆者らの最も興味を抱くところである。

SS-③ 施設規模配置サブシステム

下水道施設の規模、位置およびそのルート³⁾の決定は多分にその実現性を重視する。すなわち経済的、社会的、技術的諸制約条件下でその相対的位置を決定することは現実には非常に限られた範囲の解析となるためその手法も主として単純なものとなる。著者らは管渠⁴⁾断面をDPアルゴリズムを応用して計画し、その建設費用を断面形状に応じて算出する手法を開発したが、これを利用して算出した管渠建設費用に処理場関係費用を加算し限られた数の候補パターン⁵⁾の優劣を費用の多少によって比較することができる。ネットワーク解析、CFLP(Capacitated Facility Location Problem)手法の適用も管渠費用の算出方法が簡単である場合には有効である⁶⁾。いずれの場合もここでの費用の概念は時間選好的割引率の概念は入れている。

SS-④ 施設投資サブシステム

汚濁負荷は対象とする空間の任意の点に時間の関数として発生し、所定の投資額によって整備(する負荷)の集収域も種々の制約条件下で同様に時間の関数として空間的に拡大することになる。集収された汚濁負荷は点として存在する処理場にて浄化される。処理場に対する投資は従って流入する汚濁負荷量を収容する規模に対応するものでなくてはならない。このような性質をもつSS-④はSS-②およびSS-③のシステム出力を与件としなければならない。著者らは上記二つの異なった投資パターンを次のごとくとり扱うことを試みている。

まず面および線整備は連続的な継年投資が基本であり、年々の財政計画を制約条件として有効度を

最大とすることを考える。その場合幹支線管渠の中心方は空間を占める負荷の時間的变化に最も良く対応することが望ましい。すなわち計画最終年の総負荷量に至る時間的経過が反映するような有効度評価の方法が工夫されねばならない。今、 $Y(j, t)$ を j 分岐の時間 t における負荷密度、 U を計画最終年、 N を投資終了年、 $\alpha_T(j)$ を j 分岐より年目の投資に対応する整備面積、 J を分岐総数、 θ を幹支線整備の時間的おれとし、時間的経過を表現する割引率（時間的投資効果率） α を導入すれば t 年目における i 幹線、 X 地点での投資効果指数、 $r(i, X)$ は次のごとく表される。

$$r(i, X) = \sum_{j=1}^N \sum_{j=1}^J \alpha_{T-1}(j) \left\{ \frac{Y(j, t)}{(1+\alpha)^t} + \sum_{s=t+1}^U \frac{Y(j, s) - Y(j, s-1)}{(1+\alpha)^s} \right\}$$

投資配分は、投資可能地点の投資効果指数、 r_i を用いて例え次のごとく決定することができる。

$$W(t_0, t) = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^m r_i} \times W(t_0)$$

但しここで $W(t_0)$ は t_0 年の投資総額で m は投資可能地点総数である。

又処理場に対する投資は長期にわたり断続的に行われ、しかも幹支線整備状況に応じて負荷の収容が行われるのであるから、これを与件とし投資費用の現在価値を最小とするように投資時期と施設規模を計画することを考えることに帰着する。⁴⁾ 例えば負荷収容状況が指数関数で近似できるとすれば、 L_0 を初期の負荷量、 λ を増加率、 t を時間単位（年）、 K を基準施設費用を示す定数、 i を利子率とすれば下記の投資現在価値、 PV を最小とする、 n （拡張回数）、 $t_1, t_2, \dots, t_n$ （拡張年）を求める。

$$PV = \sum_{j=1}^n KL_0^M [\exp(\lambda t_j) - \exp(\lambda t_{j-1})]^M \cdot \exp(-i t_{j-1}) \quad \text{但し } M \text{ は施設規模指標}$$

SS-⑤ 河海汚濁解析サブシステム

図-2にSS-⑤の概略プロセスを示す。これは各SSと有機的に結合したTSの評価SSとしての性格をもち循環プロセスのフィードバックルートをもつ。各SSとの応答はパラメトリックに行われる。すなわち整備率はSS-④により変化し、又下水道や自然流出による河海への汚濁負荷の状況はSS-②、SS-③によって与えられる。この段階での出力を総合的に判断する資料が代替案となる。⁵⁾ 前記4つのサブシステムとこの評価SSの相互循環サイクルの出力は汚濁負荷バクトルとして時空間システムへの入るがりを示す。このサイクルが無限に続くことが判明すれば汚濁負荷量の発生に対する制御システムが考えられねばならない。各SSモデルについての詳細と事例研究は追って発表の予定である。

5. 参考文献

- 1) (株) 日本水道コンサルタント「下水道設計計算の合理化に関する研究」昭46年
- 2) 堤・大門・中村・山地「河川汚濁制御計画のための施設整備規模決定に関する研究」本講演会で発表予定
- 3) (株) 日本水道コンサルタント「分流式下水道の汚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連する二、三の問題点の検討」昭和42年
- 4) 大門・中村「施設規模決定のための数学モデルに関する一考察」土木学会年次学術講演会 昭46年
- 5) 神奈川県、日本水道コンサルタント「境川流域下水道事業計画調査報告書一昭和46年度」現在作利中

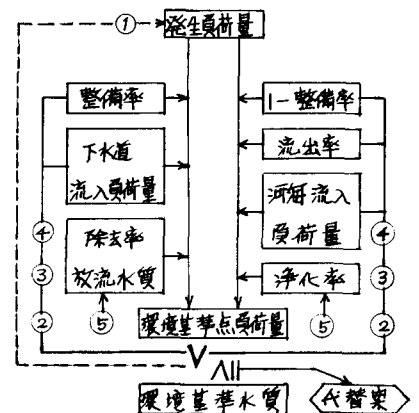


図-2 河海汚濁解析モデル