(総 説)

水環境システムの計画・設計に関する 研究レビューと今後の方向について

原 沢 英 夫* 内 藤 正 明* 西 岡 秀 三*
Hideo HARASAWA Masaaki NAITŌ Syuzō NISHIOKA

1. は じ め に

本報は水環境に関する近年のシステム解析の研究を広く内外にサーベイし、その分析・整理を行なうことによって、この種の研究の意義と問題点および今後の研究の方向を明らかにしようとするものである。

さてわが国の水環境の状況を顧みると、昭和30年～40年代には特定の汚濁発生源による局所的な高汚染が先ず問題として現われた。これに対して排出基準、環境基準の設定に基づく濃度規制という行政的対応と、これを担保する処理技術の導入がなされ、これによって一応深刻な状態に相応の改善がみられた。しかしその後、家庭排水や農畜産廃水など不特定多数のいわゆる面的発生源による汚濁負荷、中でもN、Pなど栄養塩負荷が全国的規模で閉鎖性水域の富栄養化を惹起している。このような状況に対しては総量規制による法的措置と、これに併行して、技術的には広域下水道システムの建設と高度処理技術の適用によって対処することがはかられている。しかしながら下水道システムの広域・集中化や高度化は技術面のみならず、経済的にも社会的にも好ましからざる多くの問題点をもたらすことが指摘されるにいたった。

これを要約すると以下になるよう。

この間の事情については既にいくつかの異なる視点から詳細な分析、指摘がなされているので、¹⁾²⁾ここに改めて論述すること避け、本報では、このような下水道システムを含む水環境対策が新たな展開を求められている背景を踏まえて、これに関してなされた内外の研究をサーベイし分析する。特にその中でもシステム的アプローチを用いているものを中心とするが、その理由は、上述したように水環境問題が

- 1) 対象とするシステムの空間的、時間的領域の拡大と相互関係の複雑化
- 2) これに対処する技術の選択巾の拡大
- 3) そしてこの技術の適否を評価する価値基準の多様化

の故に、その解析に対しシステム的アプローチの必要性が大いに増大していると思われるからである。³⁾⁴⁾

なお、これまでわが国ではいくつかの背景があり、必ずしもシステムの研究は重視されなかった。したがって、ここでのレビューも米国の研究が主体となっているが、上述のような状況を顧みたま時、今後わが国の水環境解析、計画にシステム的アプローチの必要性が増すことは間違

問 題 の 発 生	対 応		問 題 点	検 討 課 題
	制 度 的	技 術 的		
・局所の高汚染 (水俣病等発生 都市河川汚濁進行)	排出基準設定 環境基準設定	発生源対策 各種処理防除技術 の導入	対策技術の進行遅延	個別解析 ・現象解明 ・防除技術の開発・適用
・閉鎖性水域富栄養化 (家庭廃水 農畜産廃水)	総量規制 N排出基準 有磷合成洗剤 使用規制	三次処理技術の導入 流域下水道システム の建設 小規模処理技術の 導入 自然利用の処理技術	エネルギー、資源の消費 汚泥の多量発生 社会的不公平性 リスク増大 地下水・河川維持用水減少 土壌の乾燥化 維持・管理 処理・処分適地の選定	システム解析 ・環境の定量化 ・多目的評価 ・処理技術の地域適合性 ・広域的分析
・水辺環境保全	環境アセスメント			総合的水域環境管理

* 国立公害研究所総合解析部

いないと思われる。そこでその参考の為に先駆的な米国の研究例を取り込んで概観しておくことは有意義であろうと考え、以下のようなレビューをまとめたものである。

2. 水環境の研究課題

水は存在する場所や人間活動との関連性によって類型化することができる。前者による類型化は表1に示したように「水の器」すなわち存在形態によるものである。存在形態による類型は明確であるが、水の機能による類型化は、機能間に相互作用があり複雑な系となる(図1)。とくに環境的機能については利水、治水との関連性が強い。治水については、直接人間生活への影響が甚大であり、これを除いて水を論ずることは片手落ちだが、今回のレビューが水環境についての研究を環境的視点から見ることに主眼があるため、治水に関しては対象から除いた。

表1 水の存在形態及び機能による類型

A) 水の存在形態による類型

- 河川 (一級河川, 都市河川, ……)
- 内水面 (湖沼, 貯水池, ……)
- 河口域 (塩水浸入域, ……)
- 海域 (沿岸, 海洋, ……)

B) 水の機能による類型

- 利水 (水資源)
- 治水 (洪水制御)
- 水環境 (水質管理)

図1 水の機能相互の関連性

水の「利水」および「環境的視点」から水循環系のフローを描いたのが図2である。図からわかるように水循環系においては、環境面から見ると人間活動とともに重要な役割りを担っている構成要素に土地系がある。土地系は人間の諸活動の結果形成されたものであり、生産基盤(農地, 工場敷地等), 生活基盤(宅地等)として人間活動とは切離すことができない。この土地系と水環境の係わり方は、地下水資源の涵養, 下水処理水・汚泥の処分地としてのプラス面と市街地, 農地からの汚濁流出に代表される面的発生源としてのマイナスの両面をもっている。

図2に示した水循環系の各構成要素とその関連を参照しつつ、これらの要素と要素群に関する研究の概要をまとめたものが表2である。表では研究テーマを利水(水資源, 水供給), 水環境(水質管理, 下水道システム)の2つに大きく分類し、2つのテーマをさら

にいくつかのサブテーマに分類している。ここでは研究テーマの特徴分類のために次の4つの視点, すなわち, 1) 研究の目的, 2) 研究の対象とした水機能, 3) 研究の中での評価の視点(例えば, 施設計画を経済性(コスト)で評価しているか, あるいは環境で評価しているかなど), 4) 利用された手法, でとらえている。表中の○印, △印は1)~4)の評価の視点から, テーマごとの研究に共通して重点が置かれている度合いを示し, ○印は大部分の研究が取り上げていることを, △印は一部の研究で取り上げられていることを示している。

水質管理, 下水道システム分野の研究テーマでは, ほとんどの研究が当然環境的視点からの評価を行っているが, 評価方法, 評価の基準などは研究者により多様である。次章以降, 表2で取り上げた水循環系の内, 特に本誌読者に興味のあると思われる下流部分, すなわち, 「水環境系」の研究 — 具体的には「水質管理」と「下水道システム」の2つの分野を主対象として, その研究内容について整理を行なうとともに研究の動向についてやや詳しく述べる。

3. 水環境研究のレビュー

水環境研究は, 例えば活性汚泥の新陳代謝, 分子レベルの汚染物質の拡散などのミクロな現象論的研究から, マクロには国際河川の水質管理の問題に至るまで研究の対象が時間的・空間的に大きく広がっている。そこで, 水環境の研究テーマを時間, 空間の2軸によって分類して, その平面上で位置づけてみると図3のように表わせよう。今回のレビューはこの図中の水質管理, 下水道システムに関する研究, 特にその中でもシステム論的研究が主たる対象である(後述のW. P. C. F.誌のレビュー特集では, “Administration”の項の“Systems analysis”に相当する)。システムの研究について一言すれば, 対象(この場合は水環境機能)を時間的, 空間的に総合的に把握・分析する立場をとり, その結果は直接に計画・設計に反映しうる研究を意味している。

4. 水質管理

4.1 基本的問題の設定

水質管理の問題は基本的には, 『最小費用で望ましい水環境の水準を維持するための処理施設, および水域への最適な汚濁負荷量の配分, または処理規模(除去率, 容量)を決定すること』と定義できる。換言すれば, ある制約条件(資金, 水環境の水準など)のもとに, 目的関数(総費用)を最小化するような決定変数(負荷の配分量や除去率)の最適値を決定する最適化問題である。問題の解法として線型計画法(Linear Programming: LP)に代表される各種の最適化手法が工夫され適用されている。最適化手法の適用とともに特徴的な点は, Streeter-PhelpsのOxygen sag モデルに代表される

水質シミュレーションモデルが状態変数（BOD，D_O，N，Pなどの水質項目）の推定に用いられ，これによって操作変数と状態変数が関係づけられることである。こ

種の主な研究で採用された目的関数，制約条件，シミュレーションモデル等の構成要素について一覧表としたものが表3である。

図2 水循環系と研究課題

表2 水循環系の研究課題

		研究の目的				対象とする水機能			評価の視点				手法
		政策	計画	管理	現象把握	治水	利水	水環境	経済性	環境	社会性	その他	
利	①水資源												○水循環マトリクス 最適化手法 単目一地点 多目一多地点 単位流量図 タンクモデル
	・水循環				○		○	○					
水	・水資源配分												○多変量解析 最適化手法
	・貯水池配置	○		○			○	△	○	△	○*		
水	・水供給												○水質予測モデル 最適化手法 ○統計的手法
	・需要予測		○	○			○		○		○*		
水	・輸送・処理		○	○			○		○		○**		○リクレーション 景觀 ○エネルギー
	・上水供給（配水）		○	○	○		○		○		○		
水	③水質管理												最適化手法
	・負荷量配分	○		○				△	○	○	△**		
水	・流量制御		○					○	○	○	○		○ゲーム理論
	・水量・水質管理		○	○				○	○	○	○		
環	・モニタリング							○	○		○		最適化手法
	・エネルギー分析		○	○			○	○	○		○		
境	④下水道システム												最適化手法
	・施設配置		○	○				○	○	△	○		
境	・年次計画		○	○				○	○	△	○		○ゲーム理論
	・容量拡張		○	○				○	○	△	○		
境	・処理技術の組合せ		△				○	○	○	○	△*		○ゲーム理論
	・再利用	○	○				○	○	○	○	○**		
境	・費用負担	○	○				○	○	○	○	○**		○ゲーム理論
	・汚染権	○	○				○	○	○	○	○**		

* 需要 ** 公平性

表3 水質管理、下水道システムの最適化研究における条件等の設定一覧

	水質管理	下水道システムデザイン	処理システムデザイン
決定変数 (操作変数)	X: 処理プラントの除去率 C: 排出水温度 L: 配分負荷量	・施設(プラント, 管路, ポンプ) ・位置, 建設時期, 規模 ・増設時期	・処理方式の組合せ ・処理方式の規模
目的変数	<div> <div> ・コスト ・環境 ・便益 ・公平性 </div> <div> 建設, 維持コスト…線形→非線形 水質(河川, 沿岸) レクリエーション, 自然環境 費用負担 </div> </div> <div> <div> 単目的 → 多目的 ・コスト ・コスト-便益 ・コスト+環境 (汚濁負荷 汚染レベル) </div> <div> ・コスト, 水利用 選好性(要求水質) ・コスト, 環境 (点源 面源) </div> </div>	<div> ・コスト ・環境 水質(河川, 沿岸) ・公平性(費用負担) </div>	+ 用地費用 (land application)
制約条件	<div> ・環境制約 水質, 水量 ・経済的制約 予算規模 ・技術的制約 処理容量, 除去率 </div>	<div> ・環境制約 水質 [輸送量(管路)] ・技術的制約 処理容量, 効率(プラント) </div>	+ 土壌のN同化容量
水質シミュレーションモデル	<div> <div> 一次元 ・定常 ・生物反応 ・BOD, DO ・押出し流れ 〈Streeter-Phelps〉 </div> <div> 非定常 ・二層 ・底泥 〈Naito〉 </div> <div> 一次元拡散 ・河川条件 〈Fan〉 </div> </div> <div> 二次元 ・clearlane ・Eheart 移流 ・一次元拡散 ・底泥 〈Bishop〉 </div>		
水質項目	<div> BOD, DO → 沈殿性物質 N, P 毒性物質 → 複合水質指標 (バイオマス・ポテンシャル) → 水質項目間の相互作用 N, P → algae </div>	BOD DO	+ N, P

〈 〉: 研究者

図3 時・空平面での水環境の研究課題の位置づけ

図5 処理効率-費用関数

上記の典型的な最適化問題の解法としてLP手法を用いた研究はこれまで数多く行なわれている。^{5), 6), 7)} 代表的な例としてAndersonら⁶⁾の研究を若干修正して例示すると, 図4のようであり, 河川に沿っていくつか

$$\text{目的関数: 総費用} = \sum_{i=1}^N C(x_i) \quad (1)$$

$$\text{制約条件: } \begin{cases} AX \leq B & \text{環境的制約} \\ U \leq X \leq \bar{U} & \text{技術的制約} \end{cases} \quad (2)$$

$C(x_i)$: 第*i*プラントに関するコスト関数
 A : 除去率-河川水質変換マトリクス (水質モデルより)
 B : 河川の水質基準 (ベクトル)
 X : プラントの除去率 (ベクトル)
 $\bar{U}$: 除去率の上限値 (ベクトル)
 U : 除去率の下限値 (ベクトル)

図4 水質管理計画の典型的問題設定

の発生負荷源(都市)とそれを処理する処理施設の組(下水道システム)が配置されている状況を考える。この場合, 問題は河川の水質基準を満たし総費用が最小となるような処理施設の除去率あるいは排出負荷量を決定

することである。このとき目的関数は(1)式で、制約条件は(2)式で表わされる。この問題をLP問題として解くためには目的関数は線形でなければならず、処理コストは除去率 α_i に対して、 $C(\alpha_i) = k_i \alpha_i$ (k_i : 定数) といった線形関数で与えられた。ところで除去率とコストは、一般的には図5のような関数形であることが知られており、LP問題としてはコストが除去率と線形関係を示す35～90%の範囲に制限せざるを得なかった。

4.2 基本的問題の拡張

前節の基本的問題の設定に対し、その後コスト関数の非線形性を考慮した非線形計画問題への拡張や制約条件の拡大などの問題の複雑化が行なわれてきた(表3)。さらに最近に至っては、それ以外にも、以下に示すような種々の側面における基本的問題の拡張が多く見られるようになった。すなわち、

- ①不確実性の導入
- ②多目的評価
- ③水質項目の多様化
- ④汚染減少技術の多様化
- ⑤段階的水質管理
- ⑥水質シミュレーションモデルの改善
- ⑦エネルギーによる分析・評価
- ⑧制度的研究
- ⑨水量・水質管理
- ⑩流域の社会・文化をも考慮した流域管理

などである。そこで、これらの内容を項目ごとに以下に概観しよう。

① 不確実性の導入

水質管理計画策定時に必要とする情報は不確実性、すなわち確率的要素をもつものが多い。とくに発生負荷量、河川流量などは時間的に変動する変数であり、これらを決定的変数と仮定することは、解法を簡単にするが現実を反映しない。こうした不確実性を考慮した計画モデルの研究が水質管理、下水道システムに限らず水循環系全般にわたって進んでいる。

ここでは水質管理に不確実性を考慮した典型的な例としてLohaniら(1978)⁸⁾の研究を紹介する。問題は先述の基本的問題と同様に、河川のDO基準を満たし総費用が最小となるようなプラントの除去率を見出すことである。この研究では流量が確率変数として扱われ制約条件式に加えられる。河川区間*i*での確実度(degree of certainty) α_i — 各河川区間の重要度と要求される水質によって決定される — を定義し、確率的な制約条件(chance-constraint)を

$$\text{Probability} \left[\text{区間 } i \text{ の河川流量} + i \text{ 処理プラントからの放流量} \geq \text{区間 } i \text{ の水環境維持に必要な河川流量} \right] \geq \alpha_i \quad \cdots (3)$$

(3)式で表わしている。この確率的な制約条件式を決定的な制約条件式に変形し、LPを適用して解を得ている。確率的モデルの適用例から、本解析は特に流量条件が水質管理上重要となる夏期の低流量期において、水質管理の信頼性の評価に効果的であることが示されている。

② 多目的評価

これまでの研究の多くが総費用を単一目的とする最適化問題として定式化しているが、図2に示すように単一目的でも経済性の他に、便益、公平性、または各目的の線形和を採用した研究もみられる。複数目的を多目的評価手法を適用して最適化するタイプの研究が、特に近年行なわれるようになってきた。中でも水資源計画におけるこの種の多目的評価については、多目的最適化手法の適用性という面からのレビューがなされており、計算の効率性、目的間のトレード・オフの明示的扱いの程度、意志決定に資する情報量という3点による評価がCohonら(1975)により行なわれている。⁹⁾それによると目的が3以下であればWeighting法やConstraint法が、目的が4以上の場合にはSWT(Surrogate Worth Trade-off)法が有効であると結論している。

具体的な研究例としては、Bishopら(1977)¹⁰⁾が、目標計画法を適用し公共投資と水利用者の選好性(要求水質)を目的にとった多目的最適化を、Parasanta Dasら(1979)¹¹⁾は、SWT法を利用し、点源、面源からの汚濁量減少のコストと環境基準の達成といった3目的最適化モデルを提案している。先に記したように単目的モデルにあつては、目的関数として経済性(コスト)がとられ、環境条件は制約条件として取入れられるのが普通であるが、多目的評価にあつては、経済性の他に環境条件、便益なども最適化すべき目的として同一レベルで考慮することができる。

Bishopらの目標計画法モデルについて概略を紹介すると、目的として、経済性(総費用)と水利用者の選好性(要求水質の差)を取上げ目標計画法により最適解を得ている。最適化の手順は、まず各目的について「目標値」を設定するとともに目的間の優先度を決定する。次に優先度の高い順に目標値との偏差が最小となるように順次最適化を行っていく方法である。この場合、目標値の設定と各目的間の重みづけが重要なポイントである。さらに水利用者の選好性のように定量化が比較的難しい目的を考慮するため、目的変数の定量化が次の問題となる。特に後者は水環境に限らず環境の評価を行なう場合に共通した問題点であり、評価項目が多様化しつつある今日、基礎的な研究の蓄積が必要である。

水環境の評価の多様化の例として、水辺のレクリエーション、景観など審美性をも取り込むことを試みた研究がみられる。例えば、Mooreら(1979)¹²⁾は水辺のレク

リエーション的価値の定量的評価を通じて水質汚濁防止対策のもたらす利益について検討している。具体的には、水泳場の遊泳人口の増加を取り上げ、その利益を定量的に評価するモデルを提案している。今後の研究では水環境保全対策の効果として環境基準の達成率といった直接的な物差しだけでなく、水質改善によるレクリエーション機会の増大など間接的に社会に還元される利益の積極的な評価が、水環境施策立案に際して重要であることをこの研究例は示唆している。

③ 水質項目の多様化

水質項目として有機性汚濁指標 (DO, BOD) を環境状態の指標として取り上げた研究から、窒素、リンの富栄養化指標、さらに毒性物質指標をも対象とした研究が増えている。Bishop ら¹⁰⁾は DO, BOD の他に NH_3 、P を、Prasanta Das¹¹⁾らはリン、沈殿性物質を、deLucia ら¹³⁾は N, P の他にバイオマスポテンシャル (BP) なる複合水質指標を提案し使用している。BP は (4) 式で定義され、河川水中の排水に由来する汚濁物質が河川内で

$$\text{BP} = \alpha_1 \text{BOD} + \alpha_2 \text{TRN} + \alpha_3 \text{P} \cdots \cdots (4)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$: 定数 TRN : total reducible N

の生物学的な活性を妨害する程度を示す指標として採用されている。

④ 汚染減少技術の多様化

河川の水質汚濁制御に有効な対策は、まず第一に下水道があげられる。特にわが国においては下水道主体の対策が中心であるのに対し、米国では下水道の他に、流量制御、流水曝気等の対策が以前から研究されている。流量制御は夏期の低流量時に貯水池操作等により流量の増加をはかり、併せて河川の自浄作用、希釈作用を促進させ環境基準を維持しようとするものである。McNamara (1976)¹⁴⁾は経費用を最小とし環境基準を達成するような各種の汚染減少対策の組合せを決定するモデルを提案した。対策としては「排水処理」、「バイパス管路」、「流量制御」、「流水曝気」という多様な手段を考慮し、手法としては幾何計画法を用いている。結論として、汚染減少対策として排水処理だけを考えるより、流量制御などの種々の対策を組み合わせることで経済的にも有利な水質管理が行なえるとしている。

⑤ 段階的水質管理

deLucia ら (1978)¹³⁾は水質管理の段階的 (時間的) 計画モデルを開発している。これは時間的に変化する環境基準を達成するために必要な処理レベルと処理容量を決定するモデルであり、5.2 で取り上げる容量拡張問題と関連する研究である。ここで時間的配慮が必要となる理由は、環境基準値が中間目標、最終目標のように時間的に何段階かに分けて設定されるために、これらの環境的制約を満足するように順次施設を計画し、建設してい

く必要があるからである。このため建設初期の処理容量、処理レベルのみならず、増設時の容量、レベルをも考慮した上で経済性を検討する必要がある。deLucia らはこの問題に対して費用関数として処理レベルと処理容量をパラメータとした関数形を採用し、それを heuristic に線形化した上で線形計画法を適用した。モデルの適用により環境基準を変更した場合の費用の変化が推定されるなど、流域ベースの水質管理を行なう上で有用な情報が得られると主張している。

⑥ 水質シミュレーションモデルの改善

水質管理問題においては、水質を定量的に把握する手段として水質シミュレーションモデルが用いられる。水質シミュレーションモデル自体に関する研究や、そのレビューも^{15), 16)}数多い。ここでは水質管理研究の中で利用されるモデルに限定して話をすすめる。水質シミュレーションモデルは一般的には、(5) 式のように表わすことができる。¹⁶⁾

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} = & E x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + E y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + E z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v x \frac{\partial c}{\partial x} - \\ & v y \frac{\partial c}{\partial y} - v z \frac{\partial c}{\partial z} + S(c, t, x, y, z) \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

E : 拡散係数 V : 流速

c : 物質濃度 S : 生成・消滅項

水質管理問題で扱われるモデルは上式の各項を大幅に省略した一次元定常の押出し流れモデルが多く利用される。特に Streeter - Phelps モデルおよびその改良型が圧倒的に多い。ここでは従来の水質シミュレーションモデルから一步進んだモデルを考慮した研究について簡単にみても、河川の非定の常化と底面付近の堆積汚泥の沈降・浮上を深さ方向に二層化することにより再現した非定常二層モデル¹⁷⁾、流れ方向の拡散混合を加味した一次元拡散モデル¹⁸⁾、河川の横方向の水質分布を考慮した二次元水質モデル¹⁹⁾等がある。いずれも河川中の流量水質の挙動をより現実近く再現すべく考察されたモデルであり、最適化手法の適用とその精緻化が中心になりがちな水質管理の研究において、現状では未だ精度の低い水質シミュレーションモデルの改良というこの種の研究が大いに検討されるべきであろう。

なお、本誌において「水質のモデルリングの現状と動向」に関するシリーズが企画されているので、この部分の詳細はそこに譲ることとする。

⑦ エネルギーによる分析・評価

水質管理のエネルギー的観点からの分析は、その必要性が認識されているわりには余り進展していないようである。研究の多くが経済性、環境を考慮したものでありエネルギーによる評価を行ったものは少ない。Heggen ら (1979)²⁰⁾は DO を予測する水質モデル、排水処理・

流量制御コストを算定する経済モデル、水質管理上、直接的・間接的に消費されるエネルギーの入出力モデルの3つを組合せた水質管理評価モデルを提案している。結論として、エネルギーによる分析・評価は環境計画の意志決定の範囲を広げるとしているが、また、貨幣価値による評価とほぼかわりない結果となっており、その理由として、エネルギー関連のデータや関係式の係数が、多くはコストのデータから導かれたものであるからだと述べ、エネルギー的観点からの分析・評価が容易でないことを示している。

⑧ 制度的研究

水質管理は施設計画のようにハードな側面と排水課徴金制度に代表されるソフトな制度的側面を検討対象とする。排水課徴金制度は実際に西独で1981年1月から施行され注目されているが、²¹⁾これについての研究はこれまでに多く行なわれている。この制度は排出者の費用負担の公平性を保ち、水質管理を効果的に推進する上で有効な方法であり、大別すると

1) 単位排出量当り一定の課徴金を課する方法

(constant unit charge)

2) 単位排出量当りの課徴金が排出負荷量が減少する程割安になる方法 (effluent charge)

がある。課徴金制度を評価する視点としては、①費用、②課徴金額、③財政負担、④インセンティブ効果、があげられる。

単位排出量当り一定額を課する方法についてはThomann (1972)²²⁾の研究があり、最小コストで水質基準を満たす処理レベルを決定する問題として定式化を行っている。

effluent chargeについては例えばBrillら(1979)²³⁾の検討にみられる。排出者は、処理レベルが向上すると、単位負荷量当りの課徴金が線形に減少する「処理レベル—課徴金曲線」をもっており、限界節約費用(marginal saving)が限界費用(marginal cost)を越えるまで処理レベルを増加させる性質をもつと仮定している。こうした排出者特性を仮定した上で、流域全域での総費用を最小化するような最適な処理レベルを決定する問題として定式化を行っている。

排水課徴金制度とともに制度的対策として汚染権があるがここでは省略する。

⑨ 水質・水量管理

従来、水環境の研究対象は「水質管理」といったことばに示されるように、「質」が中心であった。これは、水資源・水供給など利水に関する研究が「量」を対象として進められてきたことと対照的である。しかし、水環境においても質とともに量に注目した研究が行なわれるようになってきた。この種の研究は水量のとらえ方によ

り2つのタイプに分類される。ひとつは利水をも含む水循環系を対象とし、水利用の適正化をはかることにより流域内の人間活動と水環境保全施策を評価するタイプと、他のひとつは、例えば河川の維持用水、下水処理水の地下水涵養のように水環境自身の“水量”を考慮に入れるタイプの研究である。

前者の視点に立つものとしては、萩原らの一連の研究が代表的な例である。²⁴⁾萩原らは、流域内における水資源配分による経済的・社会的な効果と水利用の結果生じる水環境悪化のトレードオフ関係にある2目的をとりあげている。多目的評価手法として目標計画法を適用し、両方の目的ともに一定目標を満足させるような適正な水資源配分量を決定するモデルを提案している。さらにモデルを河川系と沿岸海域をも含めた広域水系に適用し、モデルの有効性を実証しており、水利用をも含めて水環境を評価することが重要であると強調している。

後者の視点、すなわち水環境自身の“水量”を考慮したという意味での“水質・水量管理”に関する研究はまだ余りない。これはひとつには、量を組み入れることでシステムそのものが複雑化し、容易には解が得られなくなることが原因である。さらに、水環境の量に関する基礎的な知見が水質に比べ少ないこともあげられる。

水環境の量に関しては、例えば、多摩川の水質・水量を考慮した実証的な研究が、市川²⁵⁾によって精力的に進められており、河川の水質・水量収支についての基礎的な知見が蓄積されつつある。このようなデータの集積によって、今後新たに水質と水量を同時に評価に組込んだ水環境計画の検討が可能になる。

⑩ 流域の社会、文化をも考慮した流域管理

これまで紹介した基本的問題及びその拡張は、水環境・利水の水循環系を主たる研究の範囲としているが、さらに流域内の諸々の人間活動、具体的には経済的、社会的、文化的活動の中で水循環系を位置づけ、地域特性に適した総合的な流域管理を目指す研究もみられるようになった。このような流域管理の学際的研究の例として筑波大学で現在進められている北上プロジェクト²⁶⁾が挙げられるが、研究の性質から関連分野は理学、工学をはじめとして社会科学、人文科学などの広範囲にわたっている。

このプロジェクトは、岩手県北上川流域を研究対象地域に設定し、流域内の人間活動と風土を各分野の専門家が、おのおの専門的立場からの分析を行なうと同時に、専門分野を越えた流域の総合的分析を行なうものである。現在のところ、基礎的情報の収集及び問題意識の共有化の段階であるが、この学際的なプロジェクト研究の今後の発展が期待される。

5. 下水道システム

下水道システムの研究課題は計画と制御に大別されるが、後者については、近年処理場への計算機導入に伴う自動制御方式確立の要求から多くの研究が見られはじめた。しかし、これはプラント制御系の設計というハードな検討の枠内にあり、水環境と接する面は少ない。従ってここでは、処理システムの制御の問題は扱わず、下水道システムデザインと処理システムデザインに関する研究について言及する。

下水道システムデザインの研究はさらに以下のように分類される。

- 施設配置計画
- 段階的（時間的）建設計画
- 容量拡張

ここで a) の施設配置計画が施設の空間的配置パターンを求めるのに対し、b) の段階的建設計画は時間的要素すなわち建設時期をも考慮した動的な施設配置計画と呼ぶことができる。a), b) は密接な関連があるので併わせて 5.1 で扱い、c) の容量拡張については 5.2 で扱う。

5.1 施設配置計画

5.1.1 基本的問題の設定

施設配置計画の基本的な問題設定は、『地域に点在して発生する汚濁負荷量の輸送・処理を行なう施設群（処理場、管渠など）の配置パターン・規模を、地域全体の費用（建設費、維持費など）が最小となるように決定すること』であり、同時に水域の環境基準の達成・維持も加えられねばならない。この基本的問題の代表的研究は、内藤ら（1973）²⁷⁾によるものであり、その問題設定を簡略化して図示したのが図 6 である。図のように、広域水系に建設される処理場群を“どこに”、“どの程度の規模”で配置すれば、経済的、環境的に最適となるかをモデル化した空間的配置問題である。費用関数としては規模の経済性を示す凹型関数（concave function）を採用している。対象地域に複数の処理場建設候補地がある場合に、地域内で発生する汚濁負荷量を環境制約を満たしながら、最小費用で処理する処理場配置の最適パターンが組合せ問題として解かれている。

5.1.2 基本的問題の拡張

以上の基本的問題に加えて次のような問題の拡張及び関連研究が行なわれている。

- ① 基本的問題への各種最適化手法の適用
- ② 不確実性の導入
- ③ 動的施設配置計画
- ④ 集中処理、分散処理の評価
- ⑤ 処理水の再利用をも含めた最適化
- ⑥ システム評価の多様化

時間的な配置問題が重要となってきた。動的施設配置の問題については、堤ら（1973）³⁴⁾、Rosmann（1978）³⁶⁾に見られるが、ここではRosmannの研究について概観する。

Rosmannは動的施設配置を“いつ、どこに、どの規模で新設するか”，“いつ、どの規模で既設、新設の容量増加を行なうか”，“如何に個々のコミュニティー、工場をパイプラインで結合するか”に解を与えようとするものであり、モデルの位置づけとして、計画初期段階での代替案比較選択モデル（スクリーニングモデル）であると述べている。このモデルは、先に述べた空間的施設配置問題と、5.2に示す容量拡張問題を組み合わせたものとなっている。評価の視点は経済性に重点が置かれており、環境的配慮は処理施設に採用する処理レベルの差、2次処理か3次処理かという形で考慮されている。

④ 集中処理、分散処理の評価

広域下水道システムでの集中処理は、その規模の経済性のために、大規模化するほど費用節約になるという結果を得ている。しかし、集中処理の場合処理場に関しては規模の経済性が成立つ反面、管渠に関しては距離が長くなるにつれて費用が増大する。とくに管渠費用が下水道システム経費の大半を占める現状では、経済的観点からも集中化、分散化は重大な問題である。Yao（1973）³⁷⁾は下水処理の集中化、分散化の水質管理上の影響について分析している。集中型、分散型の下水道システムの評価を行ない、集中化は比較の大きな河川に小河川がいくつか流入するような水系では、環境保全上有効であるが、上流に位置する多数の小規模処理場にかえて大規模な処理場をつくることは、下流の環境に悪影響を与えている。この結果の一般性については問題があるが、いづれにしても下水道施設の影響に対しては

地域特性が重要な支配要因であることを示している。

Adamsら（1972）³⁸⁾は、集中化、分散化を費用の面から分析するとともにシステムの安全性・信頼性の点からも評価している。処理場からの放流量・水質は流入下水量、処理プロセスの効率の変化により変動するため、集中化する程、放流水の水環境に与える影響が大きい。このため、水環境への影響源を分散させるという安全性・信頼性の点からも分散型がシステムとして好ましいとしている。

これらの研究に指摘される問題点に加え、処理を集中化することにより河川維持用水が減少したり、管渠の距離が長大化するために末端地域では事業効果の発揮が遅れるといった問題も現実には生じてきている。

⑤ 処理水の再利用をも含めた最適化

Pingryら（1979）³²⁾は下水処理水の再利用・処分をも組み込んだ下水道システム全体を輸送問題として定式化し、非線形計画法を用いてこれを解いている。すなわち、水利用者（再利用者も含めて）に、希望する水量・水質の水を供給し、かつ環境的制約を満たすように総費用を最小化する最適化問題である。従来の輸送問題の定式化では、処理場関係費用と輸送管渠費用に規模の経済性を組み込めなかったり、水量については制約条件が課せられても水質を明示的に扱っていないモデルが多いが、このPingryらのモデルでは両方を制約条件として考慮している。また、システムの構成要素として、水源、処理場、各レベルの要求をもつ水利用者、水処分地（water disposal site）を考慮に入れている点もユニークである。

⑥ システム評価の多様化

下水道システムの評価は主として経済性、環境的配慮の点からなされているが、さらに近年、社会的・経済的

表4 施設配置の輸送問題としての定式化

	評 価	最 適 化 手 法	特 徴
Deininger ら ²⁸⁾ （1973）	◦ 経 済 性	◦ 非線形計画法	◦ 処理プラントの除去率一定 ◦ 環境面への配慮なし
Joeres ら ²⁹⁾ （1974）	◦ 経 済 性 ◦ 環 境（水質）	◦ 混合整数計画法	◦ 費用関数（上に凸）の線形近似
Mconagha ら ³⁰⁾ （1973）	◦ 経 済 性 ◦ 環 境 ◦ 公平性（費用配分）	◦ heuristic な方法	
Jarvis ら ³¹⁾ （1978）	◦ 経 済 性	◦ ネットワーク法	◦ 費用関数の線形近似
Pingry ら ³²⁾ （1979）	◦ 経 済 性 ◦ 環 境 ◦ 便益（再利用）	◦ 非線形計画法	

公平性、便益、安全性、信頼性の点からの評価が必要条件となりつつあることが指摘されはじめた。³⁹⁾しかし、これらの評価項目は定量化が困難であったり、定量化のための情報が欠如していたりするため、これらの視点を評価関数に組み込んだ下水道システムの研究は少ない。

公平性を扱った例として北畠らの研究がある。⁴⁰⁾下水道を水質管理上の操作可能な対策として位置づけており、総処理費用の各排出者（下水道、工場）への配分問題を公平性指標（Theil 指標、実際負担額・負担能力比の分散）を用いて分析しており、両指標にもとづく費用負担案を示している。

5.2 容量拡張問題

ここで扱う容量拡張問題は、単一処理施設の年次的増設を対象としている。

5.2.1 基本的問題の設定

この種の研究は以前から行なわれており、下水道施設

・容量拡張の費用関数

$$C(Dt) = k(Dt)^a$$

・総費用（現在価値）

$$J = k(Dt)^a / (1 - \exp(-rt))$$

・最適増設期間

$$a = rt^* / (\exp(-rt^*) - 1)$$

$\left[\begin{array}{ll} C: \text{費用関数} & D: \text{流入量(需要)の1年当りの増加量} \\ r: \text{利子率} & t^*: \text{最適増設期間} \\ a: \text{スケール・メリット係数} & k: \text{定数} \end{array} \right]$

図7 容量拡張の基本的問題設定

へ適用したのは Chenery (1952) が最初である。Manne (1961)⁴¹⁾ はさらに、これを発展させ容量拡張の基本的モデルを提案した。このモデルは図7に示すように、発生負荷が線形的に単調増加する場合に、最小費用となる施設増設量と増設期間を求めるものである。さらに仮定として、施設は無限の寿命をもち、計画期間は無限大、費用の変化はなく計画初期で容量が発生負荷に等しいといった条件が必要であり、大巾な簡化が行なわれている。Mann のモデルを若干修正したものとして、Thomas (1970)⁴²⁾、Lauris ら (1977)⁴³⁾ のモデルが挙げられる。前者は、Mann のモデルにおいて発生負荷量が計画期間の初期に施設容量を越えるという条件を付加した初期不足モデルと呼ばれるものである。後者のモデルは、初期に一定の発生負荷が存在し、それを処理する施設の建設に何年か要するといった準備期間を設定したモデルである。増設期間、増設容量とともに建設に先行する準備期間も決定すべき変数となる。これらのモデルは微分法により最適解が求められるが、直接解くことができないため繰返し計算が必要である。

5.2.2 基本的問題の拡張

以上の3つが Mann に始まる容量拡張問題の研究例であるが、その後次のような点を考慮したモデルが提案されている。

① 不確実性の導入

② 環境的配慮

まず、不確実性の導入についてみると、Besthoux ら (1970)⁴⁴⁾ は、発生負荷量の伸び率、利子率が一様分布関数で記述される確率的に変動する変数として解析を行っている。結論として、不確実性を考慮に入れない直線的な発生負荷の伸びを考えると利子率と規模の経済性の程度を示す係数 (economies of scale factor) によ

表5 処理方法の組合せに関する研究

	問 題	評 価	最適化手法	備 考
Chiang ⁴⁷⁾ (1977)	<ul style="list-style-type: none"> 2次処理水の陸地還元 どの処分地がどの処理プラントを受けもち、その規模をいくにするか。 	<ul style="list-style-type: none"> 経済性 	<ul style="list-style-type: none"> heuristic 方法 	<ul style="list-style-type: none"> 代替案のスクリーニングモデル
Koenig ら ⁴⁸⁾ (1977)	<ul style="list-style-type: none"> 2次処理された都市下水の land disposal の評価 	<ul style="list-style-type: none"> 経済性 環境 (土壌のN同化容量) 	<ul style="list-style-type: none"> 線形計画法 	<ul style="list-style-type: none"> 陸地還元=ラグーン+処理水撒布
Haith ら ⁴⁹⁾ (1977)	<ul style="list-style-type: none"> 最小コストで水質基準 (河川、地下水) を満足する処理方法の選択 	<ul style="list-style-type: none"> 経済性 環境 (水質基準 (河川、地下水)) 	<ul style="list-style-type: none"> 試行錯誤法 	<ul style="list-style-type: none"> 代替案のスクリーニングモデル
Haith ら ⁵⁰⁾ (1978)	<ul style="list-style-type: none"> 陸地還元の詳細設計 	<ul style="list-style-type: none"> 経済性 環境 (土壌のN同化容量) 	<ul style="list-style-type: none"> 繰返し法 	

って計画期間は決定され負荷の伸びには無関係であるが、不確実性を考慮すると発生負荷の伸びが計画期間の決定に影響することを示した。

一方、環境的配慮についてみると、容量拡張問題は経済性が重視され、環境的配慮を行った研究はほとんどみられなかったが、Baziwら(1979)⁴⁵⁾、William(1980)⁴⁶⁾は環境条件を制約条件とし、増加する負荷量の処理と環境的制約を満たす最適な増設計画を検討している。

図8 環境面を考慮した容量拡張問題

Baziwは環境的制約として放流水域の水質基準が時間的に変化する場合に、費用最小となる処理プラントの容量拡張を検討した。図8に示したように既設のプラントに順次直列的に増設される場合を対象としており、処理容量 V と除去レベル U が決定すべき変数である。流入量の時間的変化は図8に示したような関数形で与えられる。このモデルは動的計画法によって解かれ、放流水域の環境制約は最適な増設計画に大きな影響を与えると結論している。

Williamも放流水域の環境条件を制約として組み込んだモデルを提案している。増設単位は一次、二次、三次処理ユニットごとであり、各処理ユニットの容量、除去レベルが D, P により求められている。対象としている水質項目としては、BODの他に N, P をも考慮しているため、二次、三次処理施設増設時の容量、処理レベル決定問題には有効な情報となり得よう。

5.3 処理システムデザイン

ここで言う処理システムデザインは、処理方法の最適組合せと処理プロセスの最適組合せの問題であり、前者は活性汚泥法、陸地還元(land application)など個別処理技術の組合せを意味するのに対し、後者は単位処理プロセスの組合せ、例えば活性汚泥法を中心とした単位処理プロセスの容量、効率の決定を意味している。後者については既に多くの文献があるので省略し、ここでは処理方法(個別処理技術)の組合せを取り上げる。

米国においては、1972年の水質汚濁規制法改正以来、

処理技術として「現在利用可能で最も実的な制御技術(Best Practicable Control Technology Currently Available)」や「経済的に達成可能で利用可能な最善の技術(Best Available Technology Economically Achievable)」を考慮した経済的に最適な処理方法を選択するよう規定している(但し、1977年のClean Water ActではBest Conventional Pollutant Control Technologyなる言葉にかわっている)。従来の活性汚泥法、散水汚床法だけにこだわらず、陸地還元等の処理技術をうまく組合せた経済的な処理システムを計画・設計せよということである。

こうした処理技術の選択組合せに関する研究では、従来の活性汚泥法などの処理技術に加えて陸地還元を考慮したシステムが提案されている。いくつかの研究について概略まとめると表5のようである。陸地還元を考慮した処理システムにおいては、処理水が撒布される土地の環境条件が問題となり、表中の研究例のうちでも土地の窒素許容量を制約条件としてシステムに組込んでいる。

わが国においては下水処理技術としては、活性汚泥法などプラントによるものが中心であり、そして土地が狭いといったことから米国のように、下水処理水の大規模撒布による陸地還元法が処理技術の代替案とはなっていないが、“土壌”を利用した処理技術は着実に進んでいる。代表的な例は農業集落排水を対象とした小規模下水処理技術の開発、適用である。農村集落のように住居が散在する地域においては、市街地など人口の集中した地域を対象とした下水道システムの建設は不経済であり、地域特性を充分反映した処理技術選択の必要性が強調されつつある。

6. 今後の研究の方向

水環境研究のうち、水質管理、下水道システムのシステム的研究についてその動向を概観したが、最初にも記したように、米国における研究論文が主体であり、取り上げた研究すべてが内容的に、必ずしもわが国に直接適用可能なものではない。だが、流域の水質管理など水質・水量を総合的に管理していく思想・方法論は米国が数歩進んでいることは否定しがたい。水環境の現実および今回紹介した研究内容から、わが国において今後必要と思われる研究項目について列挙すると、以下になるであろう。

1. 処理技術選定における地域特性の考慮(地域適合性)

社会的特性(人口密度・分布、土地利用形態など)
 自然的特性(地形、地質など)

2. 多目的評価指標の確立

今後の管理計画やシステム設計の評価基準としては

- 経済性と環境的配慮
- 社会的・経済的公平性
- 安全性・信頼性
- エネルギー

など種々の視点が求められる。このため貨幣価値では表現しえない便益、公平性など本来主観的、定性的変数の定量化が検討される必要がある。

3. 個別処理技術（保全対策）の最適組合せ

- 集中型・分散型処理システムの評価
- 処理技術の多面的評価（費用、便益、エネルギー）

4. 利水システムをも含めた総合的研究

- 環境的視点からの水資源問題への接近
- 環境面からみた人間活動の適正規模

5. 汚泥処理・処分も考慮したトータルシステム

6. 実流域を対象とした実際研究

- 実際の計画・設計へ反映しうる研究

7. さ い ご に

水環境のシステム論的研究として「水質管理」, 「下水道システム」を取り上げ、研究内容の整理を試みたわけだが、研究の範囲が広いために、個々の研究の断片的な紹介に終始してしまい、系統的な整理ができなかったことは筆者の力不足によるものである。本報告がこの分野の研究を指向しつつある読者に何らかの参考になれば幸いである。

因みに、水環境研究のレビューとして有用なものは、Water Pollution Control Federation 誌が毎年6月号に掲載するもので、これは前年に発表された研究を世界的視野でレビューしたものを特集している。対象は水環境に関する法制、行政面の研究から、個々の処理技術の研究に至るまで相当幅広く頁数も二千頁程もある莫大なレビューであり、各テーマに関連した研究の動向を概略知る上で貴重な資料である。水環境に興味のある人は一見の価値がある。（原稿受理：昭和56年7月2日）

— 引 用 文 献 —

- 1) 楠本正康 (1978) 生活系排水と水質汚濁。環境技術, 7 (11), 1-2.
- 2) 盛岡通, 河原長美, 河村清史, 仲上建一 (1974) 流域下水道をめぐる今日の課題 (I)。公害と対策, 10 (12), 1-11.
- 3) 高松武一郎, 内藤正明 (1980) 環境問題解決へのシステムズアプローチの考え方。環境情報科学, 9 (1), 2-6.
- 4) 丸山速夫, 橋本定雄 (1976) 下水道講座1-下水道計画の策定。P.27, 鹿島出版.
- 5) Revelle, C.S., Loucks, D.P., and Lynn, W.R. (1968) Linear programming applied to water quality management. Water Resources Research, 4 (1), 1-9.
- 6) Anderson, M.W. and Day, H.J. (1968) Regional management of water quality - A system approach. Jour. WPCF, 40 (10), 1679-1687.
- 7) Smith, E.T. and Morris, A.R. (1969) Systems analysis for optimal water quality management. Journal WPCF, 41 (9), 1635-1646.
- 8) Lohani, B.N. and Thani, N.C. (1978) Stochastic programming model for water quality management in a river. Journal WPCF, 50 (9), 2175-2182.
- 9) Cohon, J.L. and Marks, D.H. (1975) A review and evaluation of multiobjective programming techniques. Water Resources Research, 11 (2), 208-220.
- 10) Bishop, A.B., Narayanan, R., Grenny, W.J. and Pugner, P.E. (1977) Goal programming model for water quality planning. ASCE, EE2, 293-306.
- 11) Prasanta Das and Haimes, Y.Y. (1979) Multiobjective optimizations in water quality and land management. Water Resources Research, 15 (6), 1312-1322.
- 12) Moore, J.L., Perin, D.E. and Maiden, B.G. (1979) Estimating the effect of water quality improvement on public swimming. Water Resources Research, 15 (6), 1323-1328.
- 13) deLucia, R., Mcbean, E. and Harrington, J. (1978) A water quality planning model with multiple time, pollutant, and source capabilities. Water Resources Research, 14 (1), 9-14.
- 14) McNamara, J.R. (1976) An optimization model for regional water quality management. Water Resources Research, 12 (2), 125-134.
- 15) 環境庁 (1978) 環境影響評価共通技術資料集 (2) 水質編, 委託調査報告書.
- 16) 高松武一郎, 内藤正明, Liang-Tseng Fan (1977) 環境システム工学, P. 76, 日刊工業新聞社.
- 17) Naito, M., Takamatsu, T., Fukuda, T. and Tamura, H. (1972) Optimum planning of sewage treatment systems for preserving stream quality, 5th Cong. Int. Fed. Automatic Control,

- Paris.
- 18) Fan, L. T., Nadkarni, R. S. and Erickson, L. E. (1971) Management of optimum water quality in a stream, *Water Research*, 5, 1005 - 1021.
 - 19) Eheart, J. W., Joeres, E. F. and Hoopes, J. A. (1978) Optimization of waste removal for wide shallow rivers. ASCE, EE4, 593 - 600.
 - 20) Heggen, R. J. and Williamson, K. J. (1979) Energy analysis of regional water pollution control. *Journal WPCF*, 51(4), 759 - 772.
 - 21) 阿部泰隆 (1981) 排水課徴金法. 環境研究, 32, 62 - 66.
 - 22) Thomann, R. V. (1972) Systems Analysis and Water Quality management. Environmental Research and application, New York.
 - 23) Brill, E. D., Revelle, C. S. and Liebman, J. C. (1979) An effluent charge schedule: Cost, financial burden, and punitive effects. *Water Resources Research*, 15(5), 993 - 1000.
 - 24) 萩原良己, 中川芳一, 渡辺晴彦 (1979) 河川環境を考慮した流域内水資源配分に関する研究. NSC研究年報7(1), 109 - 152.
 - 25) 市川新 (1978) 多摩川における汚濁物質の収支と流下過程. 多摩川流域自然環境調査報告書 (第3次調査), とうきゅう環境浄化財団, 9 - 132.
 - 26) 北上プロジェクト (1980) 流域文化の成立と定住様式の変遷に関する文明生態史的研究. 筑波大学.
 - 27) 内藤正明, 内藤美紀子, 森尾秀治 (1973) 流域下水道システム計画の一例. 下水道協会誌, 10(106), 1 - 8.
 - 28) Deininger, R. F. and Su, S. Y. (1973) Modeling regional waste water treatment systems, *Water Research*, 7, 633 - 646.
 - 29) Joeres, E. F., Dressler, J., Cho, C. C., and Falkner, C. H. (1974) Planning methodology for the design of regional waste water treatment systems, *Water Resources Research*, 10(4), 643 - 649.
 - 30) McConagha, D. L. and Converse, A. L. (1973) Design and cost allocation algorithm for waste treatment systems. *Journal WPCF*, 45(12), 2558 - 2566.
 - 31) Jarvis, J. J., et al. (1978) Optimal design of regional wastewater system: a fixed-charge network flow model. *Operations Research*, 26, 538 - 550.
 - 32) Pingry, D. E. and Shaftel, T. L. (1979) Integrated water management with reuse: A programming approach. *Water Resources Research*, 15(1), 8 - 14.
 - 33) Futagami, T. (1970) Dynamic programming for a sewage treatment system. the 5th International Water Pollution Research Conference, II - 21.
 - 34) 堤武, 大門良己, 中村正久 (1973) 下水道整備計画に関するシステム論的研究 I - とくに河川汚濁と面整備について. 第9回衛生工学シンポジウム, 56 - 63.
 - 35) Hansen, R. D., Bishop, A. B., Narayanan, R. (1980) Stochastic approach to waste treatment planning. ASCE, WR1, 275 - 287.
 - 36) Rossman, L. A. (1978) Planning time-phased regional treatment systems. ASCE, EE4, 685 - 700.
 - 37) Yao, K. M. (1973) Regionalization and water quality management. *Journal WPCF*, 45(3), 407 - 411.
 - 38) Adams, B. J., Dajani, J., S. and Gemell, R. S. (1972) On the centralization of wastewater treatment facilities. *Water Resources Bulletin*, 8(4), 669 - 678.
 - 39) 内藤正明 (1980) 技術評価に対する技術者の責任. *MOE*, '80/2, 71.
 - 40) 北畠能房, 宮崎忠国, 内藤正明 (1976) 霞ヶ浦水環境保全のシステム分析例. 陸水域の富栄養化に関する総合研究, 国立公害研究所, 111 - 138.
 - 41) Manne, A. S. (1961) Capacity expansion and probabilistic growth, *Econometrica*, 29(4), 632 - 649.
 - 42) Thomas, R. H. (1970) discussion of "Time capacity expansion of urban water systems". ASCE, SA4, 1017 - 1023.
 - 43) Lauria, D. T., Schlenger, D. L. and Wentworth, R. W. (1977) Models for capacity planning of water systems. ASCE, EE2, 273 - 291.
 - 44) Berthouex, P. M. and Polkowski, L. B. (1970) Design capacity to accommodate forecast uncertainties. ASCE, SA5, 1183 - 1210.
 - 45) Baziw, J. and Scherer, C. R. (1979) Wastewater treatment capacity expansion with time-varying assimilative constraints. *Water Resources Research*, 15(2), 219 - 227.

- 46) Williams, B. J. (1980) Expansion of effluent constrained treatment plants. ASCE, EE 3, 571 - 589.
- 47) Chiang, C. H. (1977) Regional planning for land application of wastewater. Journal WPCF, 49, 2366 - 2370.
- 48) Koenig, A. and Loucks, D. P. (1977) Management model for wastewater disposal on land. ASCE, 102, EE 2, 181 - 196.
- 49) Haith, D. A. and Chapman, D. C. (1977) Best practicable waste treatment screening model. ASCE, 102 (EE 3), 397 - 412.
- 50) Haith, D. A., Koenig, A. and Loucks, D. P. (1978) Preliminary design of wastewater land application systems. Journal WPCF, 50, 2372 - 2379.

社団法人 日本水質汚濁研究協会役員名簿 (順不同)

会 長	今 泉 常 正	東京大学名誉教授
副 会 長	合 田 健	国立公害研究所部長
"	山 県 登	国立公衆衛生院部長
"	渡 辺 弘	兵庫県公害研究所長
常 務 理 事	田 口 勝 久	麻布大学環境保健学部教授
理 事	滝 沢 行 雄	秋田大学医学部教授
"	佐 谷 戸 安 好	国立衛生試験所室長
"	沢 村 良 二	日本大学理工学部教授
"	川 瀬 晃	工業技術院化学技術研究所課長
"	小 島 貞 男	日本水道コンサルタント中央研究所長
"	下 飯 坂 潤 三	東北大学工学部教授
"	増 島 博	農林水産省農事試験場室長
"	吉 田 多 摩 夫	東京水産大学教授
"	久 保 田 宏	東京工業大学資源化学研究所教授
"	石 原 透	工業技術院公害資源研究所部長
"	左 合 正 雄	東京理科大学理工学部教授
"	岩 井 重 久	京都大学名誉教授
"	松 本 順 一 郎	東北大学工学部教授
"	丹 保 憲 仁	北海道大学工学部教授
"	白 鳥 孝 治	千葉県公害研究所長
"	久 保 赴	日本下水道事業団理事長
"	城 戸 謙 次	公害防止事業団理事長
"	須 藤 隆 一	国立公害研究所室長
"	松 尾 友 矩	東京大学工学部助教授
"	真 柄 泰 基	国立公衆衛生院室長
監 事	岩 塚 良 三	中央大学工学部教授
"	大 科 達 夫	新潟県公害研究所長