

上下水道におけるシミュレーション技術

* 加藤 忠(かとう ただし)・** 風間 清(かざま きよし)・*** 太田 徳二(おおた とくじ)・*** 伊藤 修(いとう おさむ)

*** 黒谷 憲一(くろたに けんいち)・*** 金山 寛(かなやま ひろし)

1 まえがき

数値モデルを使用したシステムの計算機シミュレーションは、土木設計、上下水道設備設計、総合管理システムの設計及びそれらの運用、システム制御系の改善の検討、教育などに使用され効果を上げている。そして今や上下水道システムの設計、運用には欠かせないものになっている。

本稿ではシミュレーションの用途と利用目的、適用法の概要を述べ、上下水道への応用例、環境汚染拡散解析例を紹介する。

2 シミュレーションの用途

計算機シミュレーションはまずシステムの計画、設計時に、事前評価や制御法の改良検討に使用される。また設計を助けるための道具 (CAD: Computer Aided Design) としても使用されているが、汎用化されているものについてはここでは省略する。

システムの運転・維持・管理においては、制御システムに組み込まれたソフトウェアの一部としてオンラインで稼働したり、オフラインで人間を介しながら、操作点の設定や制御設定値の決定のための道具として使用されている。また運転・維持管理要員の教育、訓練用のモデルとしての利用も多くなっている。

上下水道関係で用いられる富士電機のシミュレーションモデルの主なものの用途一覧表を表1、表2に示す。

3 シミュレーションの適用

シミュレーションの適用に当たっては、対象を分析して目的に合った精度の数学モデルを作成する。このとき、特に留意すべき点は次のとおりである。

- (1) シミュレーションの目的の明確化
- (2) 対象の構成と構造パラメータの収集
- (3) 目的に合った数学モデル及び解法の選択
- (4) シミュレーション結果と実現象の対応確認

これらの点が不十分であると、いたずらに時間を浪費するだけで必要な結果が得られなかったり、誤った結論を導くことになるので注意が必要である。

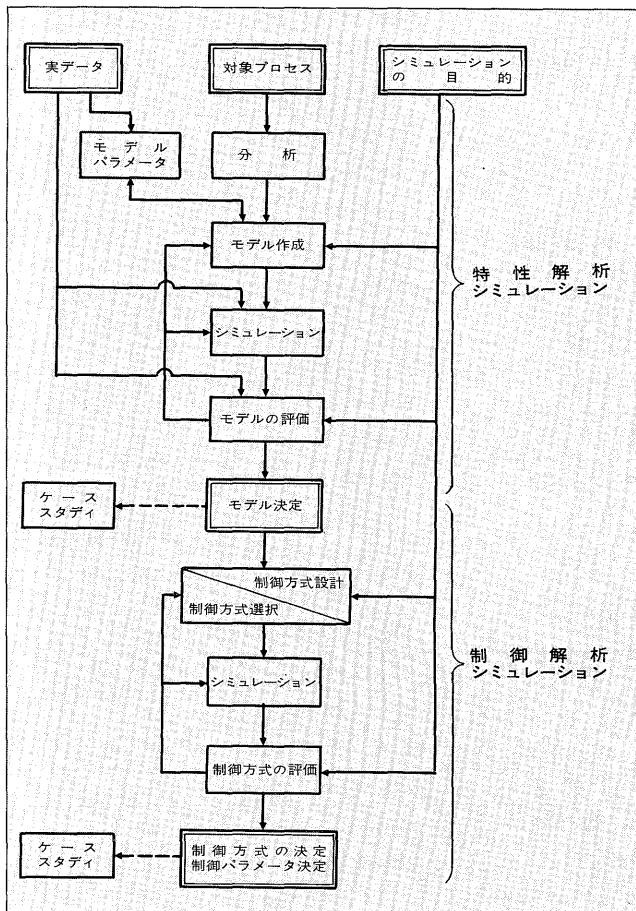
対象プロセスとその実データに基づいて、数学モデルを作成し、プロセスの特性解析や制御解析を行う場合の手順を図1に示す。

シミュレーションを行うためには、対象プロセスを物理

モデルあるいは統計モデルで表す必要がある。物理モデルは、既知の法則あるいはある仮定のもとに数式表現したものである。統計モデルは測定データの中から統計的手法により有意な相関式を求めるものである。そのシミュレーションには静的なものと動的なものがある。静的シミュレーションは定常状態を解析するもので、数学モデル中の時間項を零と置いた式を解くことにより行われる。一方、動的シミュレーションは対象プロセスの過渡状態を解析するものである。

対象プロセスの挙動を何らかの方法を用いて的確な動作に導くための解析を行うには、プロセスの数学モデルに制御系モデルを付加し、同時にシミュレーションを行う必要がある。このモデルには制御理論に基づくもの (PID 制御、最適制御理論など)、あるいは最適化理論に基づくもの (LP, DP など) がある。いずれの制御方法を選択し設計するかは、シミュレーション結果を検討して決める。

図1 シミュレーション適用手順



④ 下水道への応用

4.1 雨水流出シミュレーション^{(1)～(3)}

雨天時の流出水は処理系への重大な外乱要因となるほか、雨水越流水による水質汚濁問題、排水区内の浸水発生の原因となる。そのため、雨水流出現象や汚濁負荷流出現象（BOD、COD、SS）をシミュレーションするプログラムを

パッケージ化した。このプログラムは排水区内の浸水現象や初期汚濁流出現象（first flush 現象）も解析可能である。実データにより有効性の検証を行い、下水管きょ、滞水池の設計、雨水ポンプ、中継ポンプの容量決定、制御方式の設計に使用している。図2は降雨時の管きょ内の水位上昇と浸水発生をシミュレーションにより再現した応用例である（時間は降雨継続時間）。

表1 下水道のシミュレーション実績

番 号	対象設備・プロセス	名 称	計 画 ・ 設 計 時		運 転・維 持・管 理 時		
			社 会 性 環 境 性 安 全 性 保 守 性	省 労 C A D	効 率 化 省 資 源 省エネルギー 生 産 性	信 頼 性 安 定 性 操 作 性 制 御 性	教 育 訓 練
1	下水道・土木設備	汚水流入量予測	○			○	
		雨水流入量予測	○			○	
		雨水浸水予測				○	
		幹線貯留制御			○	○	
		貯留池最適運用			○	○	
		場内運用解析			○	○	○
2	ポンプ場	ポンプの Fuzzy 制御			○	○	○
		流入量予測制御	○		○	○	
		ポンプ可変速動力費シミュレーション			○	○	○
		ポンプ設備費比較			○	○	○
		流入ゲート制御			○	○	
		ポンプ制御法検討			○	○	
		水撃解析	○			○	
3	汚水処理・ブロワ	二次処理の静特性解析			○	○	
		二次処理の動特性解析			○	○	
		二次処理制御解析			○	○	
		水質管理用シミュレーション（オンライン準定常）			○	○	
		純酸素法シミュレーション			○	○	
		呼吸速度制御			○	○	
		送風制御法によるブロワ電力量計算			○	○	
		ピークカットと返送ポンプの台数制御			○	○	
		汚泥貯留槽容量設計	○		○	○	
		雨水流入負荷予測制御	○			○	
汎用制御法解析		○					
4	汚泥処理	汚泥熱処理過程解析			○	○	
		汚泥消化槽消化過程解析			○	○	
		汚泥消化槽制御モデル			○	○	
		汚泥多段焼却炉解析	○		○	○	
		汚泥多段焼却炉各種制御解析		○	○	○	
5	放流口・河川・港湾	開水路流速分布解析	○			○	
		開水路非定常流解析	○			○	
		放流水河川汚染解析	○			○	
		放流水港湾汚染解析	○			○	
6	電源設備	短絡計算	○			○	
		電源負荷容量計算			○	○	
		ピークカット解析			○	○	

4.2 処理場運用シミュレーション⁽⁴⁾

このシミュレーションは処理場内外の汚水の流れを制御系も含めて解析でき、汚水の流況把握、制御系の設計・評価、運転経費の計算、ポンプ事故の事前評価などに有効である。

図3は汚水ポンプ2台の制御シミュレーションを行い、ポンプの稼動状況やそのときの消費電力量を予測したものである。この結果により、運転経費の削減効果や制御方式の評価が可能である。更に、ポンプ事故時の浸水やエアハンマ現象解析、処理場と中継ポンプ場の連携制御の解析にも応用できる。

4.3 活性汚泥シミュレーション^{(5)~(9)}

活性汚泥処理法は污水处理に広く使用され、最も有力な生物化学的処理法である。この処理プロセスのシミュレーションには静的と動的の二つのパッケージプログラムが用意され、種々の制御法（DO制御、MLSS制御、総汚泥量

制御など）の比較検討及びその評価に使用してきた。シミュレーションはフィールドテストとの整合性も確認されており、水質管理や水質制御に成果を上げている。更に、オンライン計算機で直接実データを使用してシミュレーションを行い、水質管理を行うシステムが開発され実稼動して

表3 理論と解法

数学モデル	物理モデル	線形(連立)微分方程式, 非線形(連立)微分方程式
	統計モデル	時系列(自己回帰, カルマンフィルタ, GMDH) 非時系列(単回帰, 重回帰)
解法	静的シミュレーション	Newton-Raphson 法, Hardy-Cross 法, McIlroy-Aoki 法, Marlow 法, 発見的探索法, 有限要素法
	動的シミュレーション	差分法, 特性曲線法, 蛙跳法, 有限要素法
理論	最適化理論	動的計画法, 線形計画法, 非線形計画法, 整数計画法
	制御理論	古典制御理論, 現代制御理論, あいまい理論

表2 上下水道のシミュレーション実績

番号	対象設備・プロセス	名称	計画・設計時			運転・維持・管理時		
			社会性 環境性 安全性 保安性	省 C A D	効率化 省資源 省エネルギー 生産性	信頼性 安定性 操作性 制御性	教 訓	育 練
1	ダム・河川・導水路	小水力発電		○	○			
		河川流量予測			○	○		
		利水シミュレーション			○	○		
		ダム流入量・保有量予測	○			○		
		ダム・ゲート制御シミュレーション	○			○		
		開水路、動特性シミュレーション	○			○		○
2	取水・水量配分	水源運用管理シミュレーション			○	○		
		水量・水質ダイナミック計算	○			○		
		水量・水質スタティック計算	○			○		
		最適水量配分シミュレーション			○	○		
		中期需要予測	○			○		
		長期需要予測	○					
		水撃解析	○			○		○
3	浄水場運用	場内運用シミュレーション			○	○		○
		最適薬注制御シミュレーション			○	○		
		ポンプ最適効率計算			○	○		
		汎用制御法解析		○				
4	配水池・配管網運用	ポンプ省電力制御シミュレーション			○	○		
		短期需要予測			○	○		
		最適水位運用制御			○	○		
		漏水調査計算			○	○		
		管網計算			○	○		
		最適管網計算			○	○		
		最適監視所決定計算			○	○		
		最適配水ブロック計算			○	○		
		最適ブロック給水シミュレーション			○	○		
		配水圧力制御システム			○	○		

いる。

4.4 送風機制御シミュレーション

エアレーションタンクのエアレーションブロウ消費電力量は、処理場全体の経費の約40%を占め、省エネルギーの面からも経済的な設備計画、制御方式が望まれる。このシミュレーションは処理場の規模に応じ、運転経費、初期設備投資を含めた総合コストを比較し、最も経済的な送風機形式、台数、風量制御方式を決定することができる。図4は20,000m³/d規模の処理場を対象にし、送風機の設備内容と制御方式により必要な経費の額をシミュレーションにより計算した応用例の一部である。

4.5 立形多段焼却炉の汚泥燃烧シミュレーション⁽¹⁰⁾

現在発生汚泥の1割程度が焼却処理されているが、今後汚泥の減量化、安定化の要請からもその割合は増加が予想される。しかし、焼却には多量の補助燃料を必要とし、省エネルギー形の制御技術が望まれる。このシミュレーションは汚泥燃烧プロセス(乾燥、燃烧、冷却)を解析し、その制御方式を設計、評価することを目的としている。したがって、立形多段焼却炉内の汚泥燃烧状態を計算機で再現

図3 汚水ポンプの制御シミュレーション例

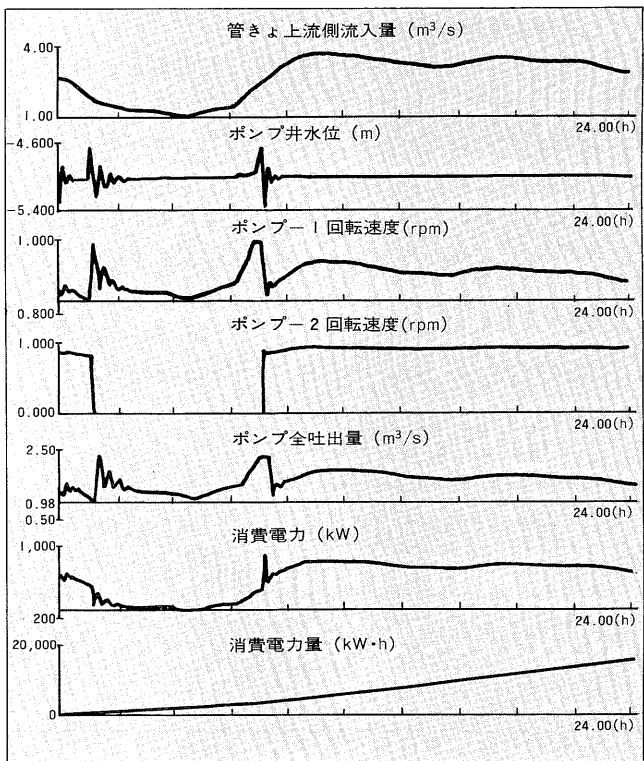
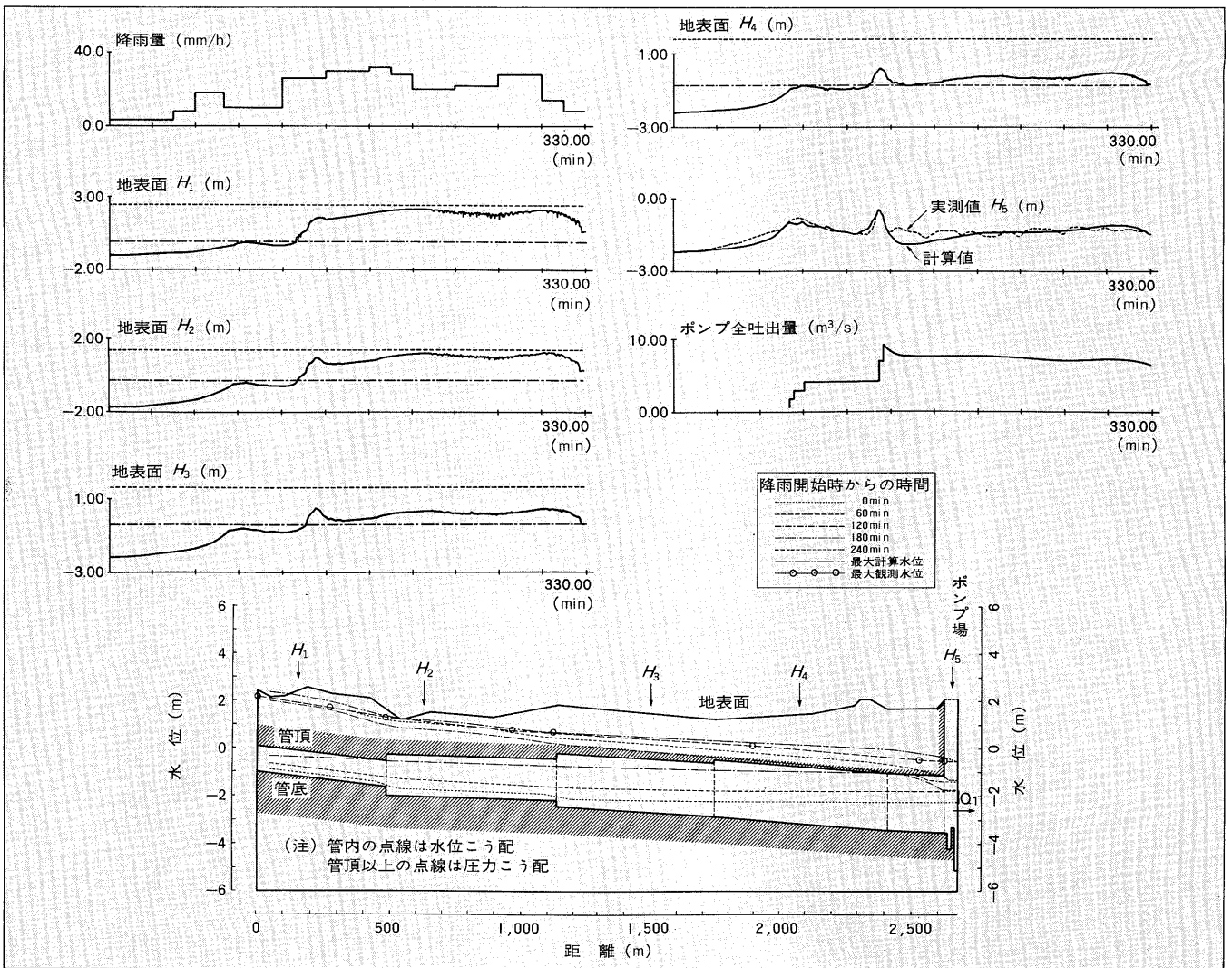


図2 降雨による下水管きよの水位分布の時間変化



し、汚泥の燃焼特性を把握し、その安定燃焼と省エネルギーを目的とした制御方式の検討、有効性の検証が可能である。また、このモデルは高分子汚泥の自然における温度抑制方式の検討にも利用できる。

5 上水道への応用

5.1 水撃シミュレーション^{(11),(12)}

送配水管路において、ポンプの停止や弁の開閉による圧力変動は水撃と呼ばれる。このような水撃現象のほか、弁制御時などの過渡現象を解析するシミュレーションプログラム

「FUJI-HYTRAN」を使って、多くのシミュレーションを実施している。

解析手法は、管内一次元流の連続の式と運動方程式とを特性曲線法で数値計算を行っている。

図5は取水ポンプ事故停止時の水撃シミュレーションの例である。

5.2 ポンプ電力量比較シミュレーション^{(13),(14)}

ポンプ設備を計画する場合、設置台数、制御方式などにより、初期設備費、電力費、保守費などが異なり、これらの総合コストから、そのポンプ場に最も適した設備とする

図4 インレットベーン制御による送風機のシミュレーション例

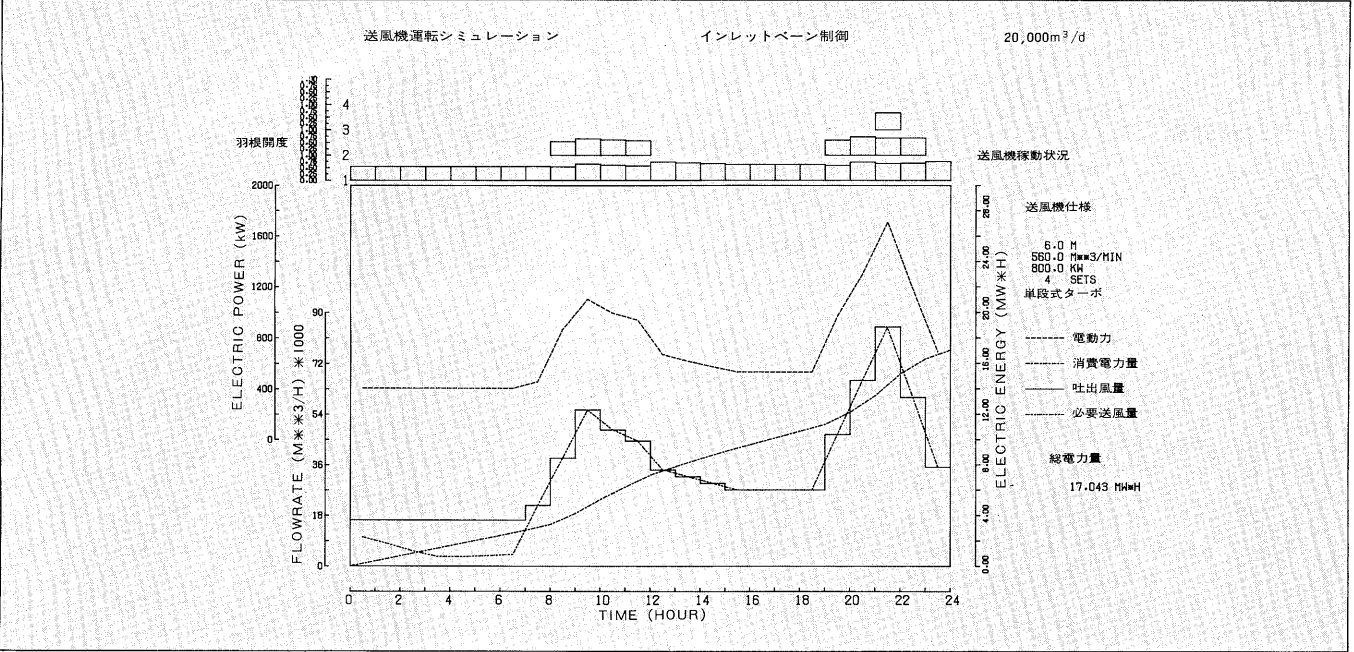
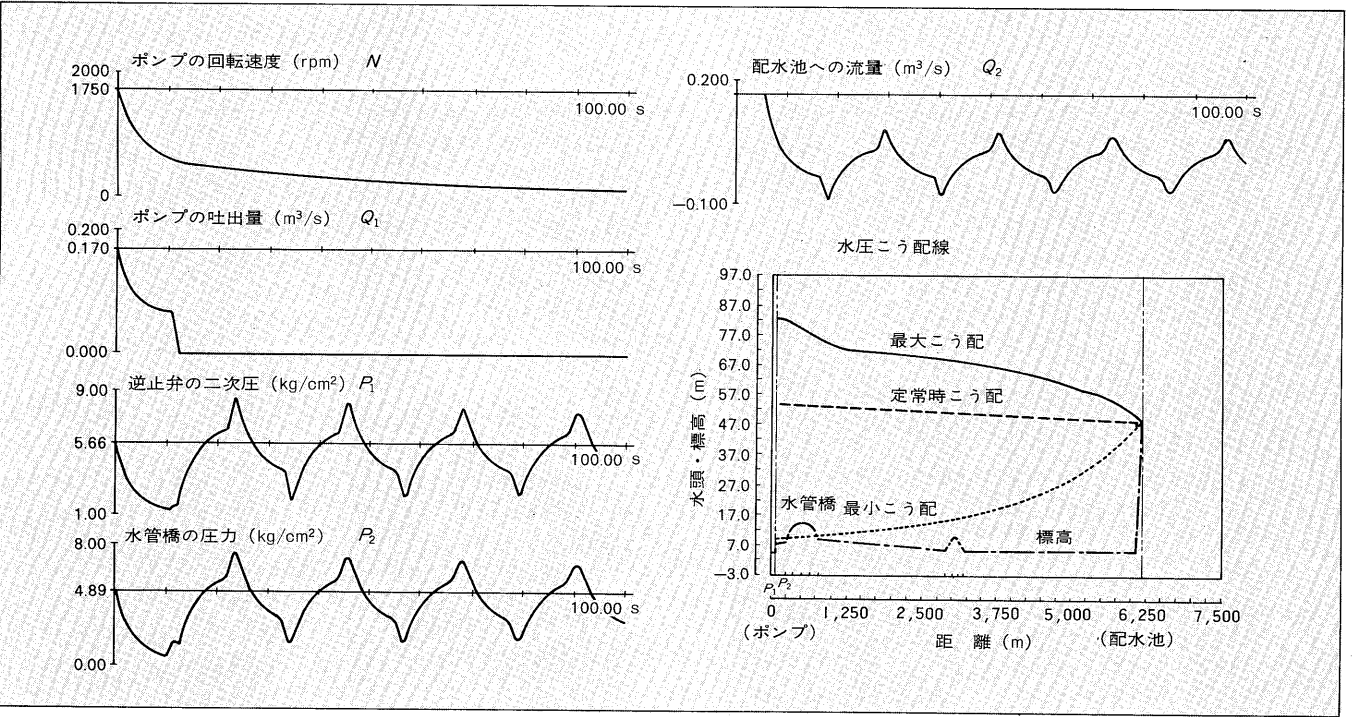


図5 ポンプ電源トリップ時の過渡応答



必要がある。このため、種々のポンプ設備の使用電力量を計算比較するためのシミュレーションプログラムを用意している。

図6は、日最大量60,000m³の配水ポンプ場（190kW×6台）の1日の消費電力の比較結果の例である。

5.3 需要予測シミュレーション

需要予測には種々の方法がある。ここでは、次のような方法で翌日24時間の時間配水量を予測した例を図7に示す。

まず、翌日の日配水量の予測を行う。予測の因子は前3日間の実績配水量並びに当日の予想最高気温、天候で線形予測式としている。係数はカルマンフィルタを用いて適宜決定する。この日配水量予測値に、天候、曜日、季節などに応じたパターンの時間係数を乗じて、翌日の各時刻の時間配水量の予測値とする。

5.4 配水池運用シミュレーション (14, 15)

配水池からの配水量は1日のうちで大きく変動する。これに対し、配水池への送水量はできるだけ一定であることが要求される。したがって、配水池水位を上下限範囲内に

保つという制約条件のもとで流入量の平滑化、あるいは調整回数の最小化を目的とした運用を行う。

流入量が送水ポンプの台数で制御される場合は、ポンプの使用電力量を最小化する運用法もある。

ここでは、調整回数を最小化する運用法をDP法で解いた例を図8に示す。

図6 使用電力の変動

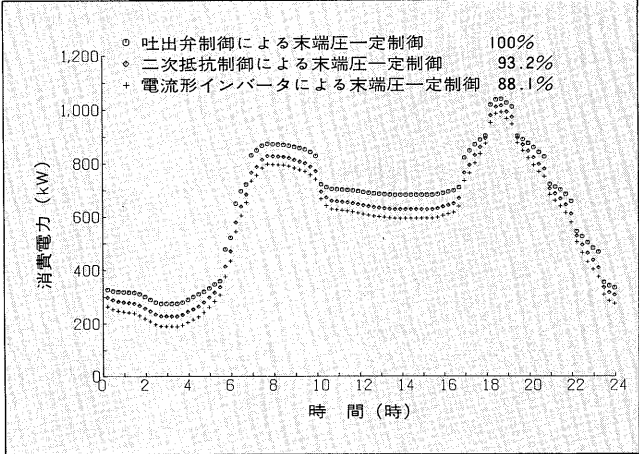


図7 配水量予測

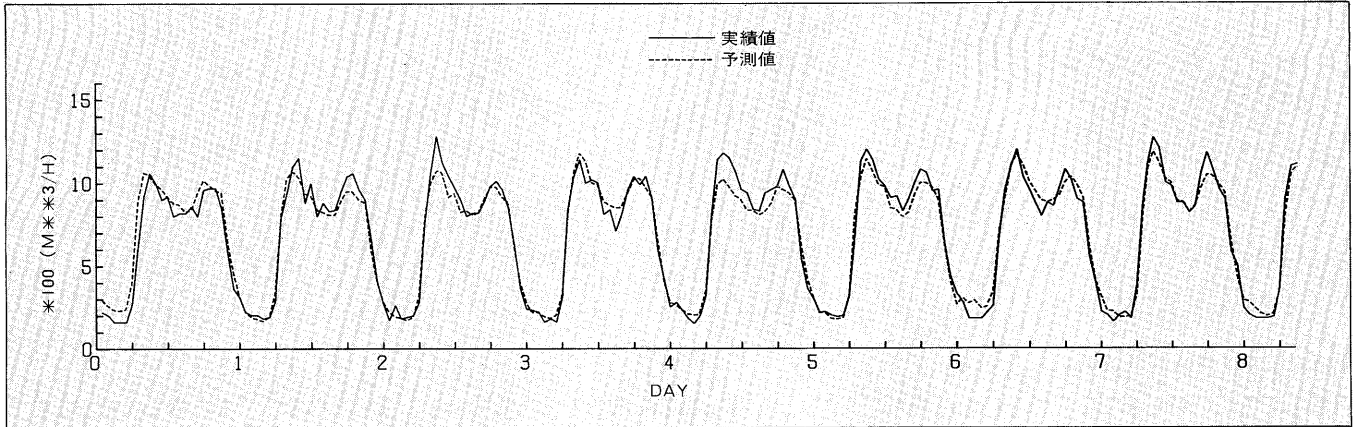
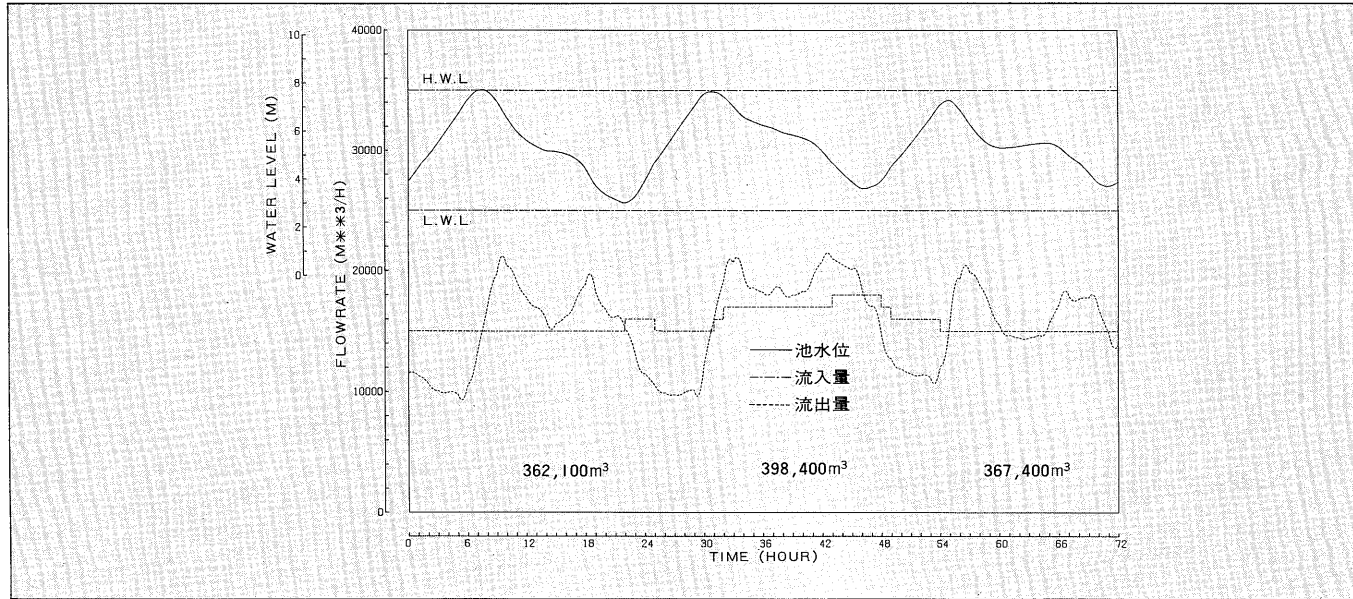


図8 配水池運用シミュレーション



5.5 配水制御シミュレーション⁽¹⁶⁾

3か所の配水池から自然流下で配水され、8か所の減圧弁と1か所の加圧ポンプにより圧力制御する例を示す。

配水管網の圧力は、許容範囲内でできるだけ低いことが漏水防止、安全性の面から望ましい。そこで、加圧ポンプ、減圧弁の加圧、減圧を操作量として、漏水量を最小化する操作量をLP法により解く方法を用いている。制約条件は節点の圧力の下限、操作量の上下限である。

この結果、得られた管網計算による圧力分布を図9に示す。圧力の下限は 1.5 kg/cm^2 としている。

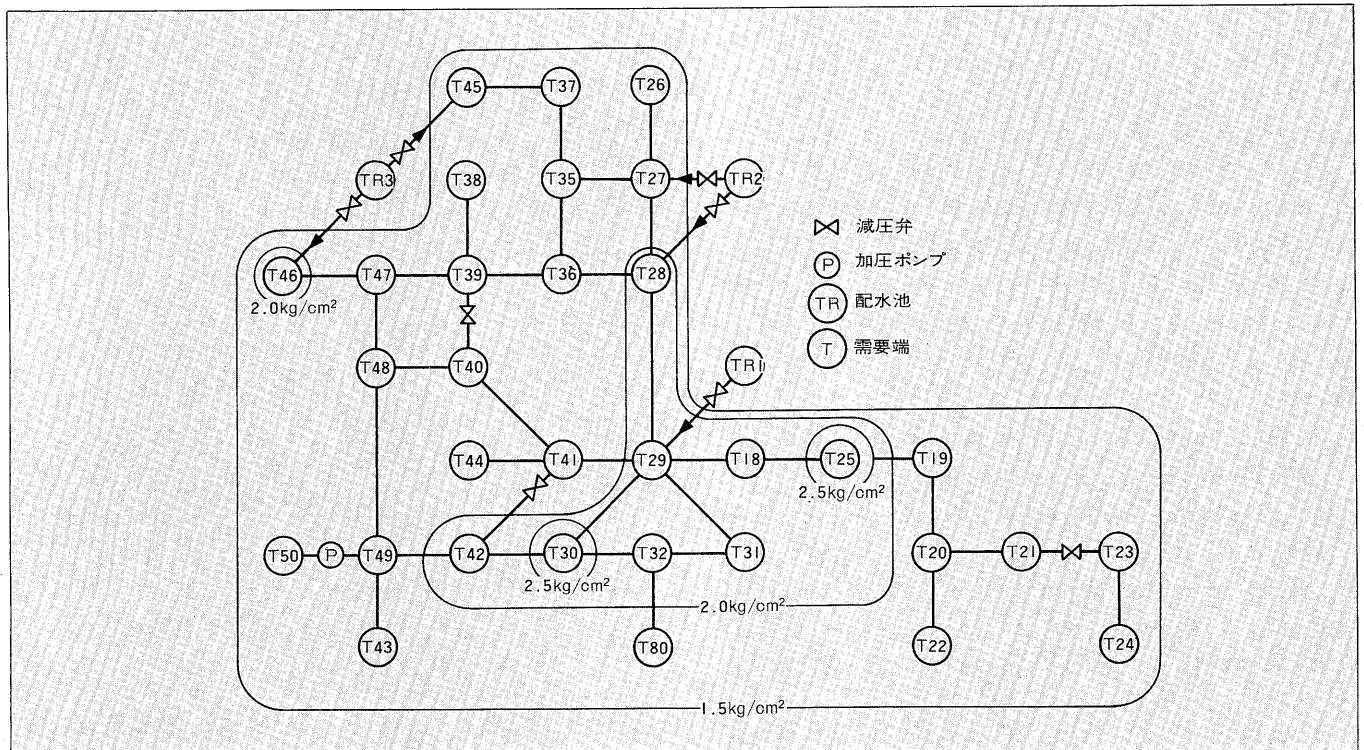
6 環境汚染拡散解析

水系の環境汚染拡散を計算機シミュレーションによって数値的に予測、再現することは、現在では広く一般に行われるようになってきた。これは実験・実測などによる豊富なデータの蓄積と、計算機及びシミュレーション技術の向上によるところが大きい。

これらの現象を数理的にモデル化すれば、基本的には移流拡散方程式で表すことができる。

移流拡散問題の数値解析には多くの場合、差分法や有限要素法による離散近似式が用いられる。しかし、流れが速く、移流項が卓越する場合には通常の方法では安定した解は得難い。これを克服するには田端の上流有限要素を用いる。この方法では離散最大値原理の成立のために弱鋭角型（非鈍角型）三角形上の線型補間を用いている。更に、重心領域で集中質量化を図ることで短時間に演算処理できるような工夫をこらしている。

図9 配水管網圧力分布



この種の問題では、数値解析上の技巧のほかに渦動拡散係数の推定が大きな要因を担っている。定説らしきものはあるものの、まだ十分な知見は得られていない。

以下に富士電機における二、三の実例を示す。

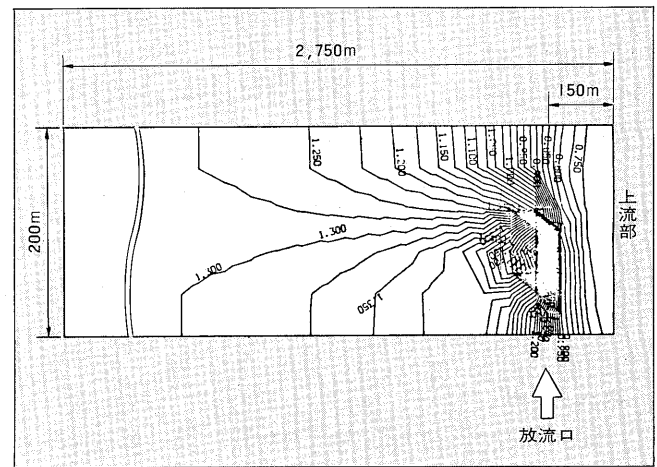
6.1 河川における汚濁拡散解析例

図10に汚濁拡散解析例を示す。図中、特に等高線が密になっている部分はジェット噴流を模擬した汚濁水放流口を示す。河川自体のもつ自浄作用は無視し、下流部に続く海による浄化が考慮されている。また、流速データはあらかじめ計算した浅水波解析の結果を用いている。

6.2 内湾における汚濁拡散解析例⁽¹⁷⁾

内湾におけるCOD（化学的酸素要求量）の移流拡散解析例をあげる。河川からの流入負荷の移流拡散以外に、光合

図10 河川における汚濁拡散解析例（BOD分布）



成による有機物の内部生産と分解作用という生物化学的過程を考慮している。湾流の解析には前例と同様社内開発プログラムを用いた。

6.3 運河の温排水拡散解析例

火力発電所の隣接する運河における温排水の拡散解析を行った。もともとは循環水の温度上昇の予測を目的としたものである。流速場を適当に仮定し、水温に依存した運河表面からの放熱を考慮した。

7 あとがき

水道においては水源の遠隔化、水処理の高度化、更に限られた水資源を有効利用するための水運用の効率化、喝水対策、漏水管理などから高度な水道管理システムの必要性が強くなってきている。

一方、下水道においても流域下水道や都市部の処理量の増加や処理水質向上への社会要請、汚泥処理の集中化などによる設備の大形・複雑化が進んでいる。このような背景から、設備や管理システム設計において省エネルギー、省資源、制御・操作の安定性の追求などのためにシステムのシミュレーションが欠かせないものになってきている。

今後ともこの分野の技術を充実して行きたいと考えている。技術開発において御指導いただいた上下水道関係者の皆様に感謝の意を表すとともに今後とも御指導、御鞭撻をお願いする。

参考文献

- (1) 加藤忠ほか：合流式下水道対策の検討，下水道協会誌，**17**，196，pp. 1～10（1980）
- (2) 中村栄一・伊藤修：合流式下水道における雨水流出制御のための数学モデル，下廃水処理の自動制御と水質の計測監視に関するワークショップ論文集，pp. 49～52（1980）
- (3) E. Nakamura & O. Itoh：Mathematical Model for Controlling Stormwater in Combined Sewer System，Wat. Sci. Tech.，**13**，pp. 111～116（1981）
- (4) 伊藤修ほか：汚水ポンプの速度制御による管内貯留とその活用の効果，第18回下水道研究発表会（1981）
- (5) 梅村健二郎ほか：活性汚泥プロセスのシミュレーション解析（その1），第12回下水道研究発表会（1975）
- (6) 中辻勝・梅村健二郎：活性汚泥プロセスのシミュレーション解析（その2），第12回下水道研究発表会（1975）
- (7) 加藤忠・梅村健二郎：活性汚泥プロセスのシミュレーション解析（その3），第12回下水道研究発表会（1975）
- (8) 中辻勝・梅村健二郎：活性汚泥プロセスのシミュレーション解析（その4），第13回下水道研究発表会（1976）
- (9) 中辻勝ほか：活性汚泥処理のシミュレーション，富士時報，**50**，11，pp. 588～596（1977）
- (10) 伊藤修・白井正和：立形多段焼却炉の汚泥燃焼シミュレーション（その1），第19回下水道研究発表会（1982）
- (11) 黒谷憲一ほか：送配水系統の水撃解析プログラム，第28回

全国水道研究発表会講演集，pp. 227～229（1977）

- (12) 大塚敬ほか：上下水道用ソフトウェアパッケージ，富士時報，**50**，11，pp. 579～587（1977）
- (13) 黒谷憲一ほか：配水ポンプの省電力運転方式，第30回全国水道研究発表会講演集，pp. 243～245（1979）
- (14) 黒谷憲一：ポンプ設備における省エネルギー，富士時報，**54**，8，pp. 577～582（1981）
- (15) 黒谷憲一ほか：送水ポンプの省電力台数制御方式，第32回全国水道研究発表会講演集，pp. 217～219（1981）
- (16) 黒谷憲一ほか：漏水量最小化のための配水制御，第33回全国水道研究発表会講演集，pp. 156～158（1982）
- (17) H. Kanayama & K. Ohtsuka：Coastal Eng. in Japan，**21**，pp. 157～171（1978）



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。