

上下水道におけるシミュレーション技術

Simulation Technology in Water and Wastewater Systems

上下水道システムの運用、制御を高度化するため、確立されたシミュレーション技術は、(1)上水道、導・送水系：階層化モデルを用い、需要予測からPrimal-dual法で配分計画を求める。(2)上水道、配水系：NEFLAN-Cによりエネルギー最小式と管網縮約を用い、操作端設定値繰返し計算時間を大幅に短縮した。(3)下水道、雨水排水系：流入量予測を基に、ポンプをゲートと協調させながら最適スケジューリングを行ない、実験設備で実証した。(4)下水処理プロセス：曝気槽、沈殿池及び制御モデルにより活性汚泥プロセス、総汚泥量制御を確立したほか、消化槽モデルも構成した。(5)支援システム：シミュレーションに用いる配列構造を確定し、CASE-CTL支援システムを構築し、シミュレーションを効率化した。

大音 透* *Tōru Ōto*
船橋誠寿** *Motohisa Funabashi*
塩谷 真** *Makoto Shioya*
田沼正也*** *Masaya Tanuma*
依田裕明**** *Hiroaki Yoda*

1 緒 言

上下水道は、単一のあるいは複数の地方行政区域を一単位として、水に関する安全を確保するための都市の基本施設であり、典型的な巨大、広域システムを形成する。普及率が90%を超える高普及時代に入った上水道では、そのニーズは上水道事業経営の高効率化、合理化が重要となった。このため、広域にまたがるサービス区域を適正ブロックに分割し、総合運用が大規模に行なわれるようになった。下水道の普及率は約30%とまだ低い、処理区域、排除区域は急速に広域化し、総合運用が実現しつつある。

このため、上下水道システムの構造、挙動を計算機あるいはアナログモデルによりシミュレーションを行ない、計画、設計、運用の各段階で的確に把握する必要が増大している。計画段階で考え方、方向を誤るとシステムが巨大、広域であるほど、完成後、取り返しがつかないため、従来、計画段階でのオフラインシミュレーションによる事前評価が特に重視された。現在ではシミュレーションは制御用計算機により、上下水道システムを最適状態に保つ最適化制御、あるいは適応制御の一部としてプロセス同定、及びパラメータの評価、決定、調整を行なうためにオンラインで広く実施されている。換言すれば巨大、広域化上下水道システムは、制御用計算機によって確実に運用され、計算機は常にシミュレーションを行なっている。上水道システムでは需要予測と配分計画、下水道システムでは流入量予測、最適タイミング制御及び活性汚泥プロセス制御でのシミュレーションが実用化された主なものである。以下、その詳細について述べる。

2 上下水道システム制御とシミュレーション

2.1 上水道、導・送水系の運用

上水道システムは配水池のもつバッファ機能を利用して、取水から配水池までの導・送水系サブシステムと、配水池以降の配水系サブシステムに分割して運用されるのが普通である。本節では導・送水系の、次節では配水系のシミュレーションについて述べる。

導送水系の運用には、水の需要を満足させながら、取水、水処理及び送水コストの最小化、起動・停止回数の低減による機器の長寿命化、保守手数の低減、外部買(売)水系に対する契約水量の遵守を測ることが重要である。このため、(1)水

需要量の予測、(2)予測値に基づいた施設の運用計画、(3)施設の実際運用が重要となり、各段階での計算機シミュレーションが重要な役割を果たしている。

横浜市水道は給水能力178万 m^3/d の巨大システムであるが、シミュレーションに基づく運用によって効率的な運営が実現されている^{1),2)}。需要予測は全市の日単位需要量を、時間的、空間的に展開して行なわれる。日単位需要量は、気象などにより変化する不規則成分と、週曜日に依存する定常的な基本成分に分け、それぞれの変動要因から予測を行なう。運用計画は、予測需要量を入力とし、導・送水系の挙動をシミュレートして求める。横浜市水道の場合、導・送水管路は亘長5,000kmにのぼる大規模、広域ネットワークを形成しており、一挙にシミュレートすることは条件の設定、結果の判定、修正が煩雑で運転者に過大な負担をかけることを避けるため、取水量、浄水場への配分量(浄水場間融通量)、配水池への配分量の3階層に分けてモデル化し、段階的に計画が行なわれる。各階層のシミュレーションには、Primal-dual法^{*1)}を用い水系運用上の要請を円滑に達成できるように施設、機器の運転条件を逆算できるように図った。

2.2 上水道、配水系の運用

配水系では、(1)管網末端での圧力を適正に保ち、需要家への給水サービスを向上するとともに、過大圧力に基づく漏水、あるいは管路事故を防止すること、(2)管路網への配水量を配水池間で融通し、水処理及び配水コストの最小化を図ることが重要で、このため管網内の水の挙動をシミュレートし望ましい操作点と、その設定値を求め、これにより配水系を制御すればよいが、これには次の課題を解決する必要がある。(1)配水系の操作端は管網内の、あるいは配水池出口のポンプ、バルブであるが、その台数、設置位置には制限がある。(2)管網内の流量、圧力の関係は非線形で、実系統では直径200mm以上の主要管路に限っても管路数は数百以上にのぼり、通常のシミュレーション技法によっては計算時間が長くなり、リアルタイム制御が難しい。(3)限定された操作端の最適設定値をシミュレーションにより逆算し、配水系の適正水压を実現するためのアルゴリズムがあらかじめ組み込まれている必要

※1) Primal-dual法：ネットワークの最小費用を求める解法の一つで、流れを積み上げて求める方法である。

があるが、通常の逆算手法では最適設定値が求められない場合が発生する。(4)シミュレーションにより求めた設定値は計算機の数式モデルによるものであり、実現象との乖離、誤差、差異を補正するメカニズムを必要とする。

NEFLAN-C(Network Flow Analysis and Planning Method-Control)は、これらの課題を解決し、配水制御を実現した。高松市水道局、配水制御システムには、HIDIC 80E制御用計算機とNEFLAN-Cが採用され、順調に運転している。これにより上記の課題が解決された状況を述べる^{3)~5)}。

(1) 計算時間の短縮

通常の管網挙動シミュレーション技法は、管路のノードでの流量収支、ノード間の圧力平衡を表わす連立方程式を解くものである。NEFLAN-Cでは、この方程式が成立することと、管路内の損失エネルギーが最小であることの等価性に着目し、損失エネルギー最小条件を満足する流れをネットワーク算法によって効率よく求めることができる。これにより計算時間は、従来の約 $\frac{1}{4}$ に短縮された。また、管網縮約を行ない、実在のノードを許容誤差範囲内で自動的に一つにまとめ、仮想の等価管路を形成することによって、高松市の場合、約500のノードを、約140にまとめ、計算時間は約 $\frac{1}{4}$ に短縮されている。

(2) 操作端設定値の逆算

制御結果が最適となるような操作端設定値を求めるために、NEFLAN-Cでは、管網内の圧力分布目標値とシミュレーション結果の差の自乗和を一つの指標とし、シミュレーションを繰り返して、この指標が改善される方向へ設定値を安定に変更してゆく技法(Simplex法)を採用した。改善不能限界での設定値が求める操作端設定値であるが、実水系の状況によっては、繰返し計算回数は160回にも達することがある。NEFLAN-Cは、上記のように1回当たり計算時間を大幅に低減したほか、この繰返し計算回数が多い場合はシミュレーション方法を切換え可能とするように考慮した。

(3) フィードバック制御による数式モデル乖離の吸収

数式モデルと現実の乖離は、シミュレーションによる予想圧力分布が維持されるように、操作端設定値をフィードバック制御によって微調整し、吸収する方式を採用した。

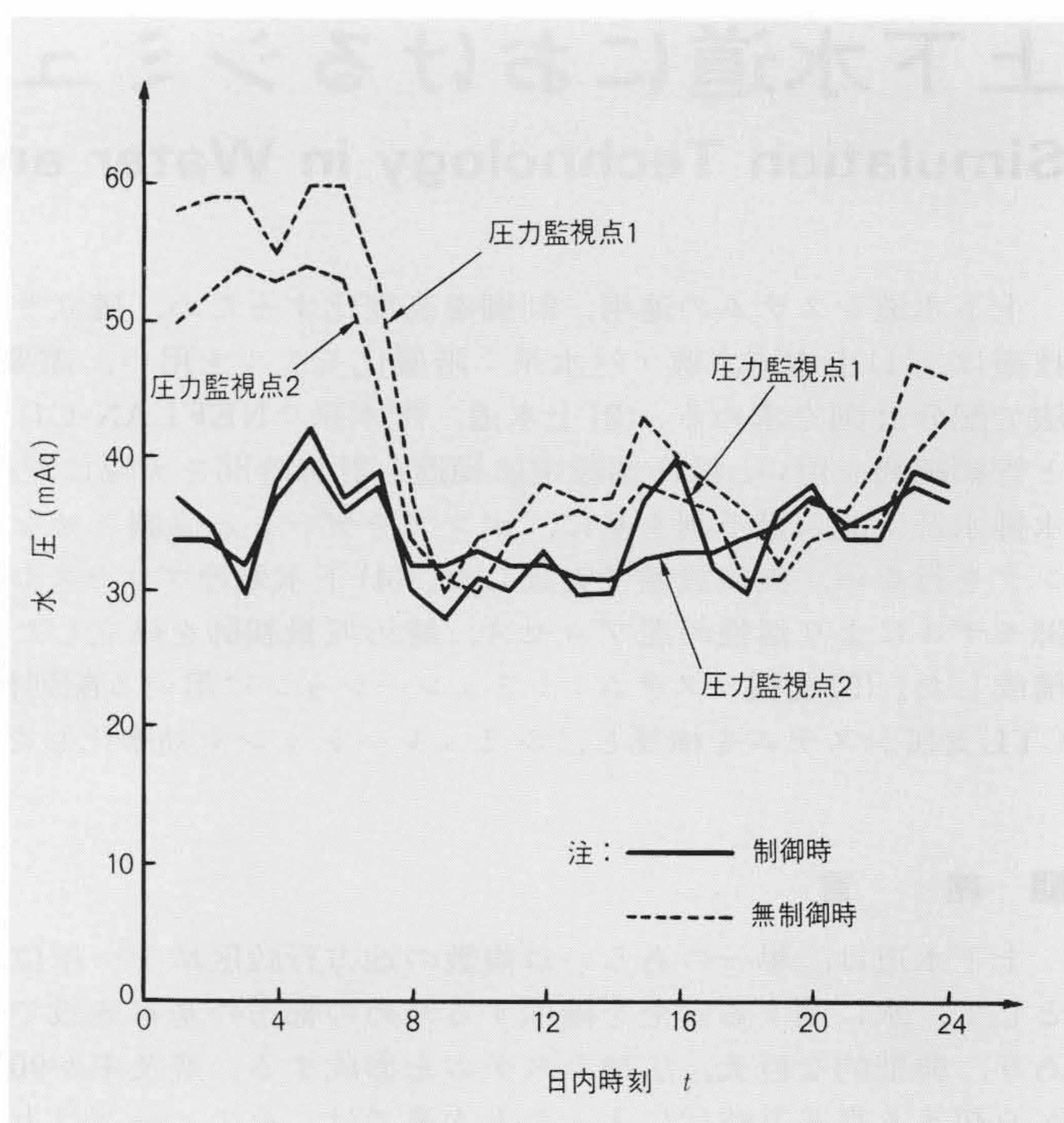
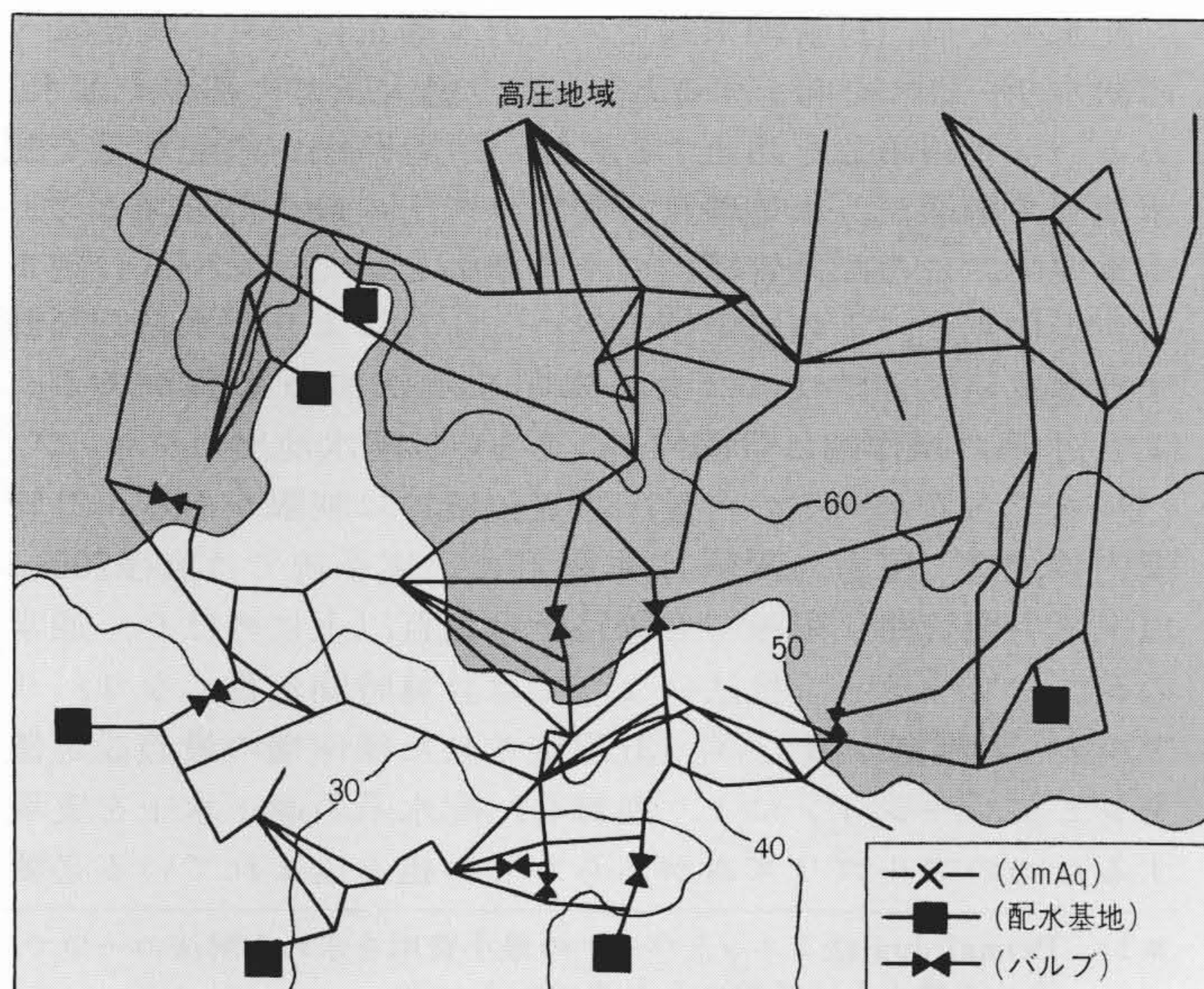


図2 高松市水道における圧力適正化の実績値 配水制御の導入前後の圧力監視点での実績値を示す。制御導入によって夜間の高圧現象が大幅になくなっていることが分かる。

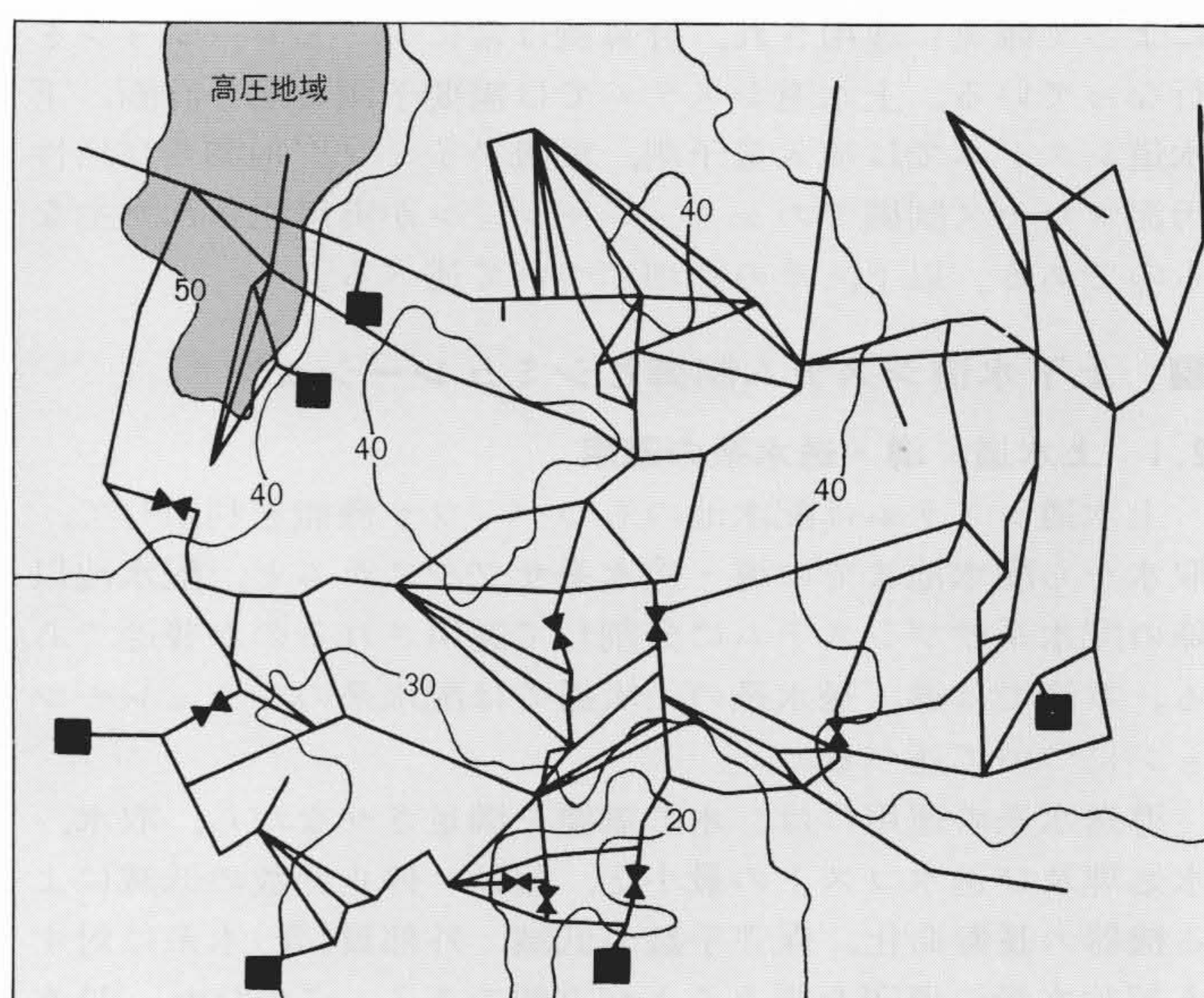
配水制御は、シミュレーション技術と制御技術の適切な組合せにより実現したもので、図1はNEFLAN-Cによる圧力分布適正化制御シミュレーション結果を示す。制御によって過大圧力地域が大幅に縮小可能なことわかる。図2は、高松市の実績を示す。制御の結果、夜間の過大圧力を避けることに成功している。この圧力適正化により、漏水量は従来の約20%削減可能の見込である。

2.3 下水道における水量制御とシミュレーション

道路舗装率が上昇した結果、特に市街地の合流式下水道では、激しい降雨の場合、管渠への雨水流入量が急激に増加し、路上溢水、あるいはポンプ所冠水などの事故に至る危険が大



(a) 配水制御前の圧力分布例



(b) 配水制御後の圧力分布例

図1 配水制御効果の評価シミュレーション結果例 適正圧は30mAqといわれている。制御前の広範囲な50mAq以上の高圧領域が、制御後ほとんどなくなっている。

きい。これを防止するため、広域の大規模下水排水系統の計画が増加しているが、これを適切に計画、建設、運転するため、シミュレーション技術の重要性が増大している。本節ではその概要について述べる。

2.3.1 流入量オンライン予測⁶⁾

降雨時、流入量を予測できればポンプは的確に運転できる。予測の方法には、(1)雨量と流入量データを用いる統計的技法、(2)管渠内流量、又は水位実測値を用いる水理学的技法を開発しているが、本節では水理学的技法について述べる。実データが蓄積されていなくても、オンライン実測値により予測することができる。この技法は、連続式及び運動方程式から成る2独立変数、2従属変数の双曲型非線形連立1階偏微分方程式のモデルで、管渠内の水の挙動をシミュレートし、予測するもので、上流の管渠内の任意の点の水位、流量測定値及びポンプ吐出し流量を入力し、管渠内の任意の点の水位、流量の時間変化を算出できる。満管部、非満管常流、非満管射流が混在する流れの予測も可能である。解法を工夫することにより、全計算時空点にわたり均一な精度と安定性を得るとともに、長さ7kmの管渠の1時間先の予測を5分以下(HIDIC 80E)の計算時間で行ない、オンライン予測を可能とした。上流の流量とポンプ吐出し量が増変したときの流量と水位の変化の計算結果例を図3に示す。

2.3.2 予測に基づくポンプの最適スケジューリング⁶⁾

流入量が予測されるとポンプの起動・停止の時刻と台数を、管渠の貯留容量を考慮しながら事前に最適に決定でき、余裕をもってポンプを運転できる。運転スケジュール決定方法は

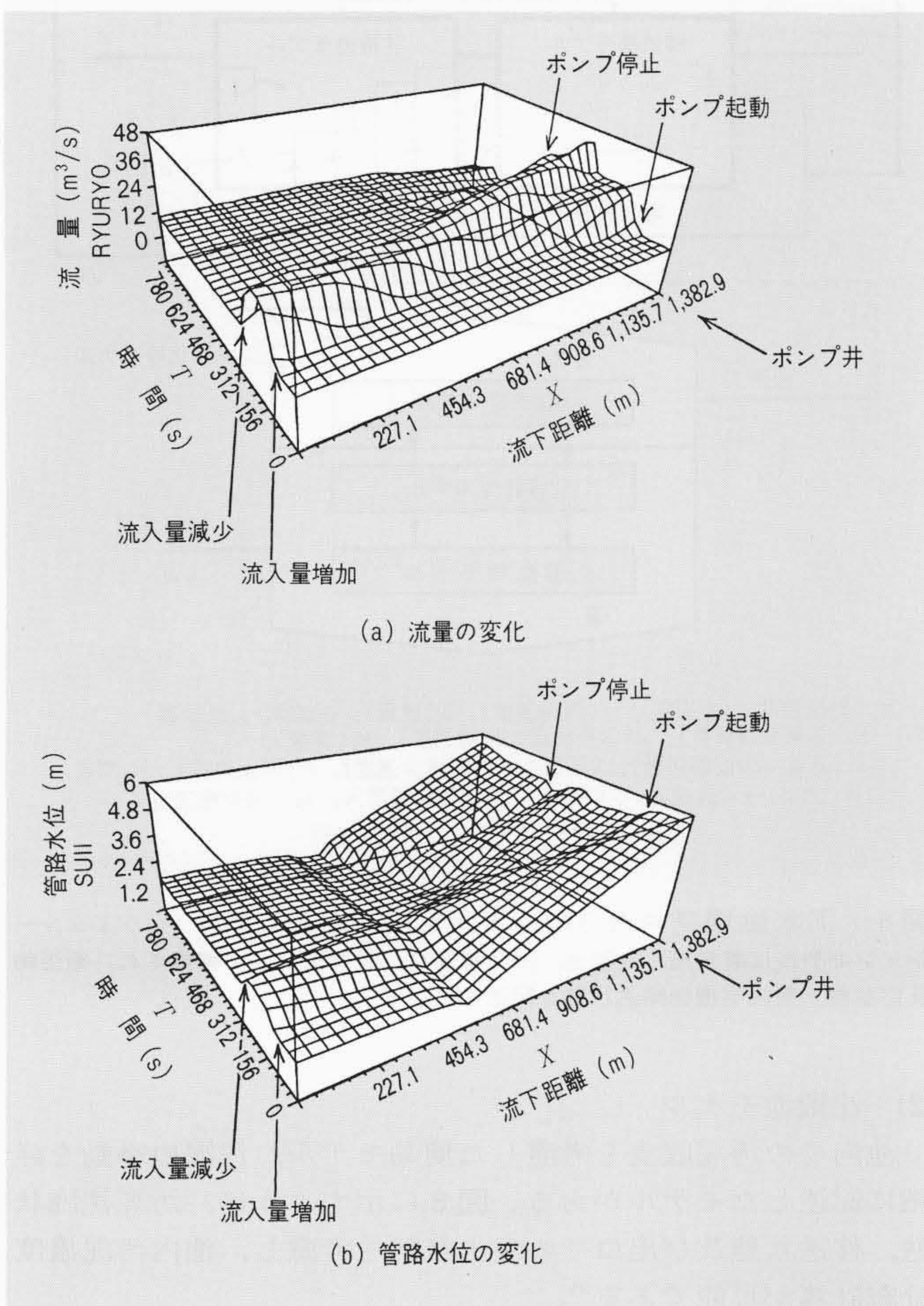


図3 流入量予測のシミュレーション結果 上流で流量が増減したり、下流でポンプを起動・停止したときの波の伝搬や水面形変化が読み取れる。

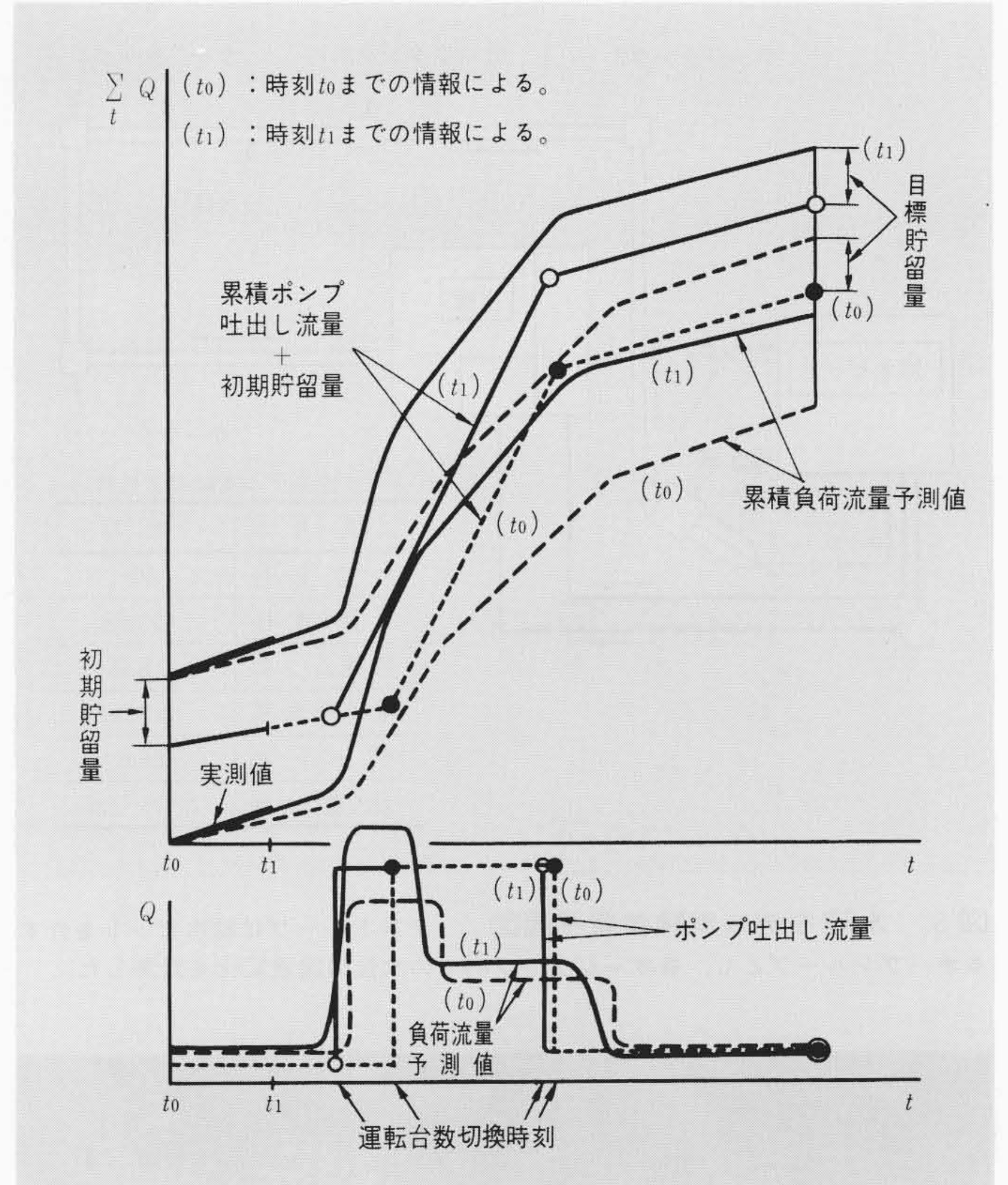


図4 ポンプ運転スケジュールの決定方法説明図 台数変更頻度の少ないスケジュールを幾何学的に探索し、予測値の変更に對しては起動・停止時刻を変更する。

次に述べるとおりである。

ポンプ運転台数は上下限水位の直前でだけ変更する条件で、流入量予測時間帯にわたるポンプ運転スケジュールを幾つか試算し、そのうち運転台数変更頻度、又は消費エネルギーなどの評価が最も良いものを選ぶ。流入量、又はポンプ吐出し量を時間的累積値として扱い、幾何学的技法で高速で探索を行なうものである。図4に示すように、選定した運転スケジュールが、最新のデータによる流入量予測値に対し、水位条件を満足するか否かをシミュレータは常にチェックを行っており、これを満足させるように、ポンプ起動・停止時刻及び台数が修正される。

2.3.3 開水路から閉水路へ移行可能な管渠の水理現象

市街地に設けられる広域下水排水ポンプ設備、及び流入管渠は地下深く設けられ、常時は開水路であっても、激しい降雨時、あるいは異常時には閉水路へ移行するケースが多い。この管渠の水理過渡現象を的確に把握することは、ポンプ設備の適切な計画、最適スケジューリング及びポンプ、バルブ、ゲート協調制御の基礎として重要である。これを解析する技法は、開水路のエネルギー式や連続式を、閉水路の剛体近似に基づく運動方程式と連立させ、特性曲線を用いる方法によるものである。時間的に変化する開水路と閉水路の接点は、繰返し計算によって追跡できる^{7),8)}。

2.3.4 下水排水系、水量モデルのアナログシミュレーションによる検証

以上述べた技法を、広域、長大管渠、大容量排水系(大阪市下水道局弁天抽水所)に適用するに当たり、計算機シミュレーションのほか、特に図5に示すように全長60m、直径120mmのアナログ模型を設け検証した。実管渠内の水の挙動を目で確かめながら、実在感をもって検証が行なわれた。流入制

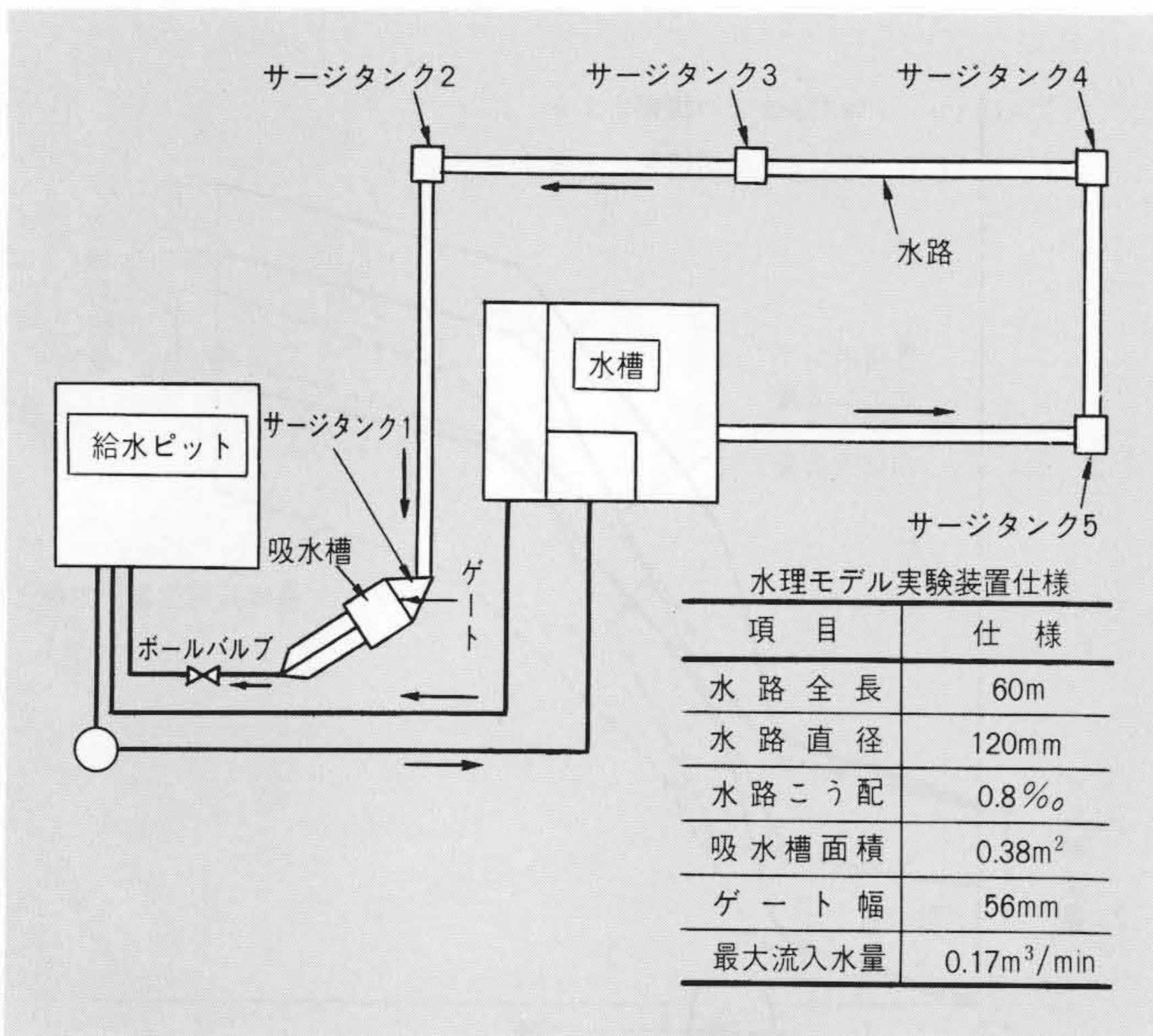


図5 水理モデル実験装置平面図 テストループは給水ピットを介するオープンループとし、各サージタンク内での水位の過渡変化を計測した。

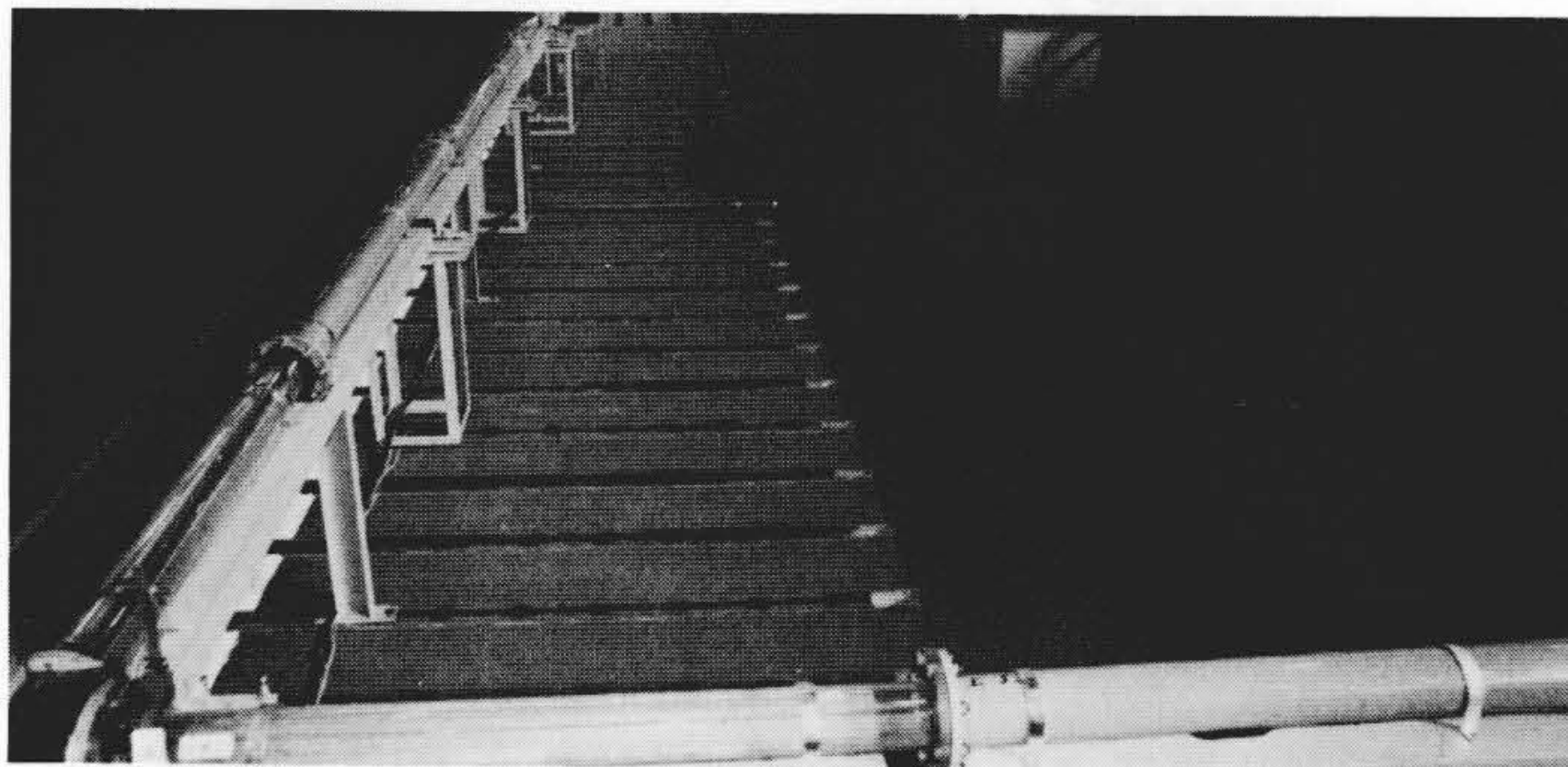


図6 水理モデル実験装置の全景 サージタンク2(左端)から上流側を見たところを示した。水路内の水は右端水槽から発し、水路を自然流下した後に、吸水槽を経て給水ピットへ戻る。

御ゲートは油圧駆動で、排水ポンプの運転はボールバルブの開閉で模擬し、水位変化は水位計に記録させた。図6は実験装置の全景を示すものである。図7に計算値と実験値の比較を示した。吸水槽、各サージタンクの水位変化計算値と実験値はよく一致し、開水路から閉水路への移行速度も、実用的に高い精度で一致することを確認した。

2.4 下水処理プロセスのシミュレーション

一般に下水処理に採用される活性汚泥プロセスは、その内部での生物化学的挙動が極めて複雑であるから、特に効果的な制御を行なえるようなモデル構造を立案すること、及びパラメータ調節を容易に行なえることが重要である。

図8はこの観点から開発したモデルの構成を示すものである。

2.4.1 活性汚泥プロセスのシミュレーション

活性汚泥プロセスの挙動をシミュレートするには、曝気槽、沈殿池及び制御モデルが必要である。

(1) 曝気槽モデル

槽内での活性汚泥、有機物の輸送状態を記述する押出し流水モデル、反応状態を記述するMonodモデル^{※2)}を用いる。

※2) Monodモデル：活性汚泥が污水中の有機物を除去する割合を次式のように記述するものである。

$$ds/dt = -k_m \cdot S \cdot X / k_s + S$$

ここに S ：有機物濃度、 X ：汚泥濃度

k_m ：汚泥の最大増殖率、 k_s ：Monod 常数

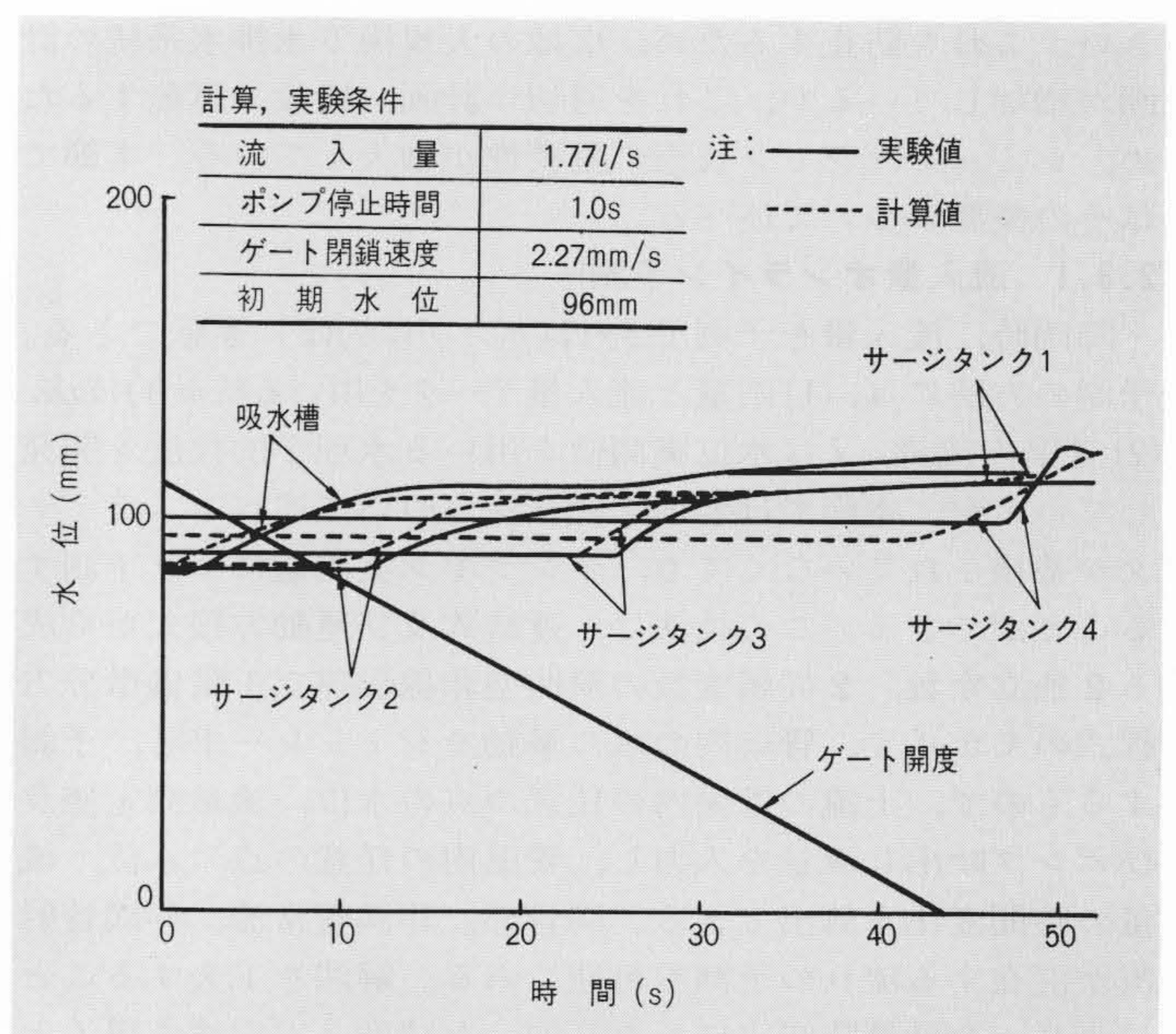


図7 サージタンク水位変化の計算値と実験値の比較 ゲートを閉状態でポンプを急停止した直後の各サージタンクでの水位変化を示した。サージタンクの水位が約120mmを越えると、その下流側水路には閉水路が形成された。

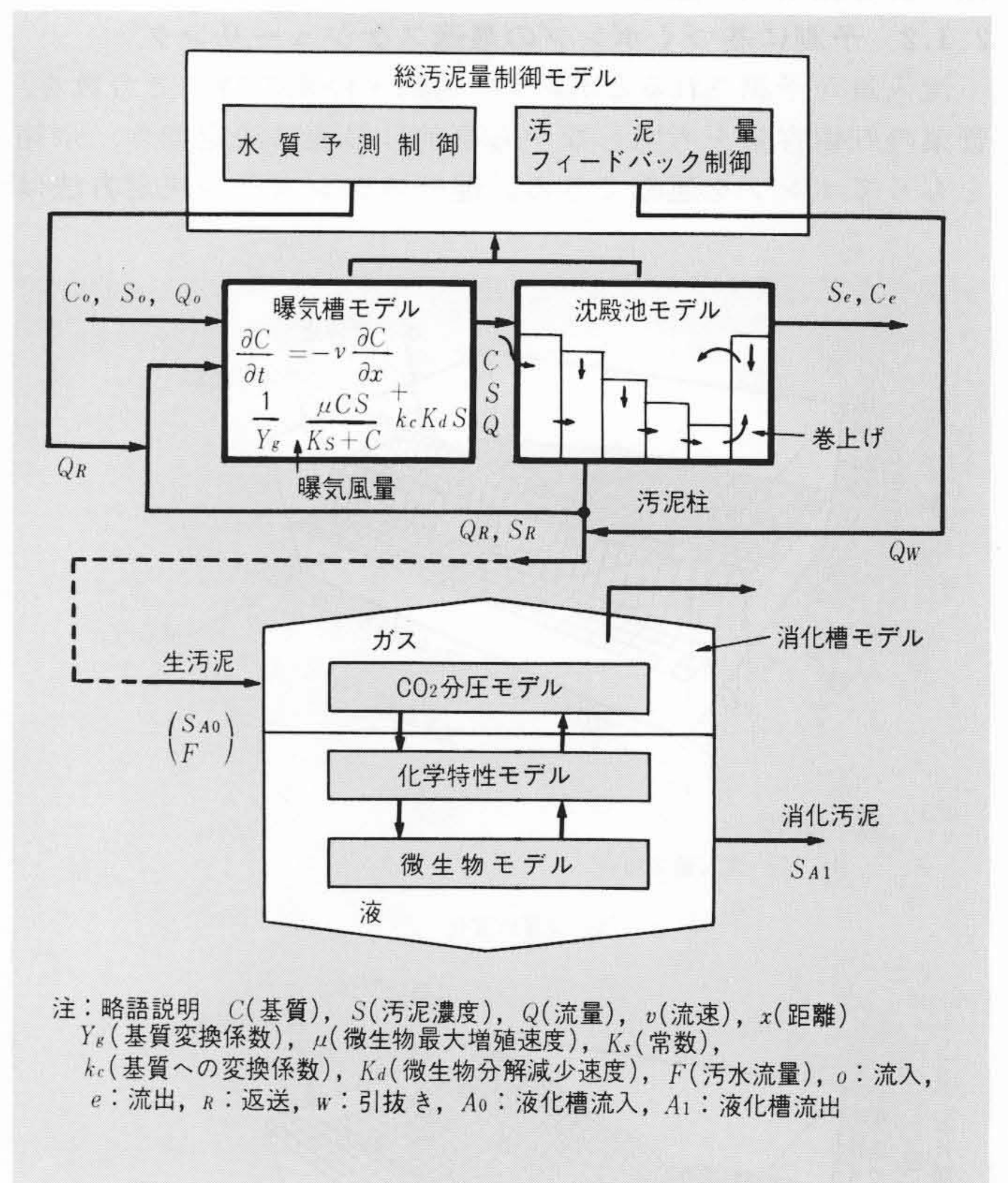


図8 下水処理プロセスのシミュレーションモデル シミュレーションモデルは曝気槽、沈殿池、消化槽及び、制御モデルで構成され、微生物反応状態と系内有機物輸送状態を記述している。

(2) 沈殿池モデル

池内での汚泥収支を考慮した簡易モデル、汚泥の挙動を詳細に記述したモデルがある。図8に示すように、汚泥沈降状態、移送状態及び出口での巻上状態を考慮し、池内汚泥濃度分布計算が可能である⁹⁾。

(3) 制御モデル

放流水質の変化を予測し、これを抑制するように返送汚泥

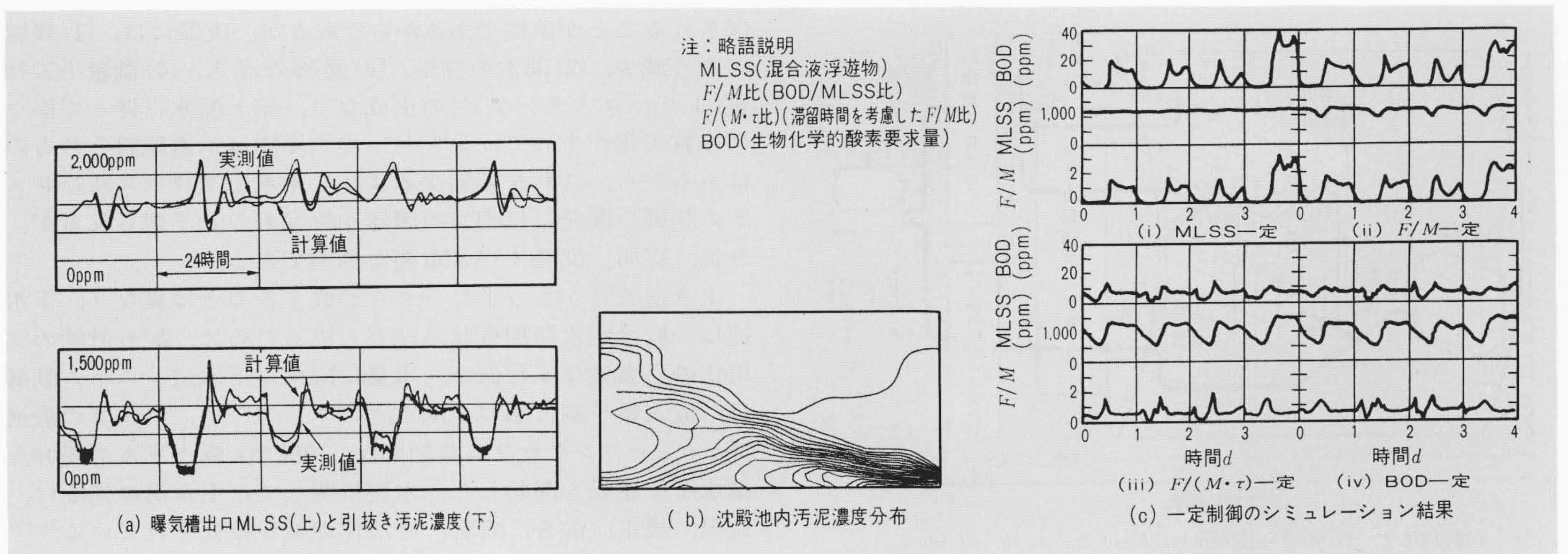


図9 活性汚泥処理プロセスのシミュレーション結果 シミュレーションにより、活性汚泥濃度変化や沈殿池内の汚泥濃度分布など、種々の特性が把握できる。

固形物量(返送汚泥量×濃度)を制御する水質制御モデルと、系内総汚泥量のフィードバック制御モデルによるシミュレーションのほか、汚泥濃度変化をブロック線図及び伝達関数によって検討する解析的アプローチが可能である¹⁰⁾。

図9にシミュレーション結果の一部を示す。曝気槽出口MLSS(混合液浮遊物)濃度、引抜き汚泥濃度、沈殿池汚泥濃度分布状態並びにMLSS一定、F/M比〔BOD(生物化学的酸素要求量)/MLSS比〕一定、F/(M・τ)比(滞留時間を考慮したF/M比)一定及びBOD一定の各制御でのBOD、MLSS、F/Mの挙動を的確にシミュレートし、活性汚泥プロセスの挙動は、重要な水質指標に関し、おおむね正確、的確に把握できるようになった。微生物反応モデルの精密化が今後の課題であり、例えばMonodモデルでは不可能な曝気槽での吸着現象をBusbyなどが示唆するように、汚泥内部に取り込まれる中間生成物を考慮した構造化モデル(Structured Model)により求める検討などがその方向である¹¹⁾。

2.4.2 汚泥消化槽のシミュレーション

消化槽では嫌気性発酵が行われ、メタンガスが発生する。ガス発生量のほか、pHが汚泥活性度指標として用いられる。シミュレーションでも、有機物濃度、微生物濃度のほか、多くの変数の計算を行なう必要があり、モデルは活性汚泥プロセスに比べ複雑であるが、Andrewsモデルがよく整理されたものである。図8に示すように、三つのサブシステムをもっている¹²⁾。

(1) 微生物反応モデル

微生物増殖速度は、非イオン化基質濃度に依存し、次式のように表わす。

$$\mu = \frac{\hat{\mu}}{1 + \frac{K_s}{H_s} + \frac{H_s}{K_I}}$$

ここに

μ ：微生物増殖速度(1/d)、 $\hat{\mu}$ ：最大増殖速度(1/d)

H_s ：非イオン化基質濃度(mol/l)、 K_s 、 K_I ：常数(mol/l)

分母第3項の阻害項を考慮することによって、過負荷に対する安定性を検討できるのが特長である。

(2) 化学特性モデル

消化槽内の液の炭酸ガス濃度を物質収支式から、重炭酸イオン(HCO_3^-)、水素イオン(H^+)、pHなどを液中のイオン平衡式と CO_2 濃度から求める。

(3) 炭酸ガス分圧モデル

ガス相での CO_2 分圧を求める。これは液からの CO_2 放出速

度に影響する。図10にシミュレーションの例を示す。消化槽の安定運転、炭酸ガス除去制御によるメタンガス濃度改善など、新しい成果が得られつつある。

3 シミュレーション支援プログラム

以上のシミュレーションを簡単に行なえる支援機構を備えることが重要である。制御方式、設備計画の開発に必要なオフラインシミュレーションを効率よく行なうCASE-CTL(Computer Aided Design for Systems Engineering-Control)について述べる¹³⁾。上下水道分野でのシミュレーション対象は非常に多いが、そのデータ構造には多くの共通点がある。図11はこの配列構造を模式的に表わしたものである。シミュレーションに際しては種々のパラメータを仮定し、対象モデ

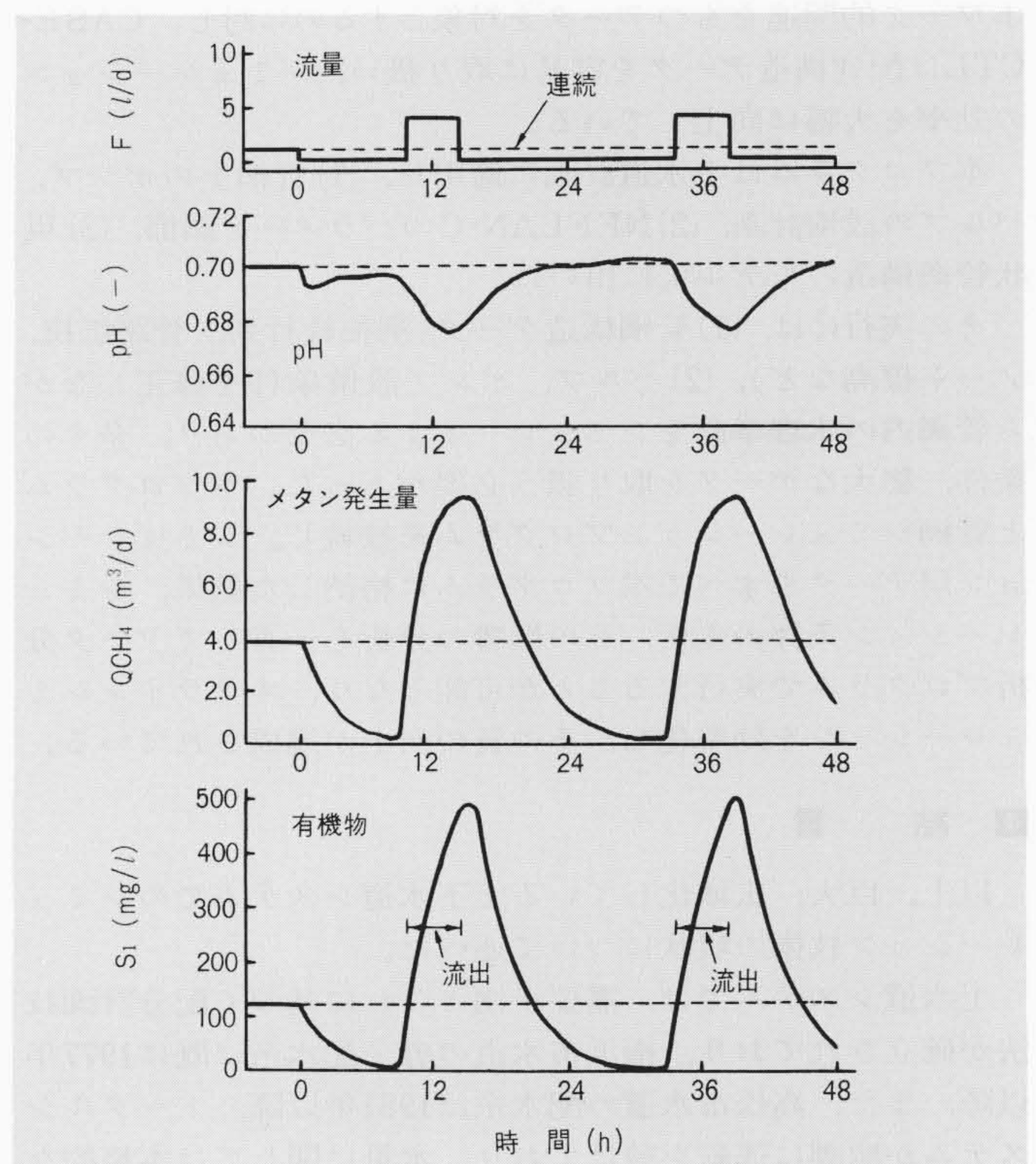


図10 消化槽のシミュレーション結果(汚泥間欠投入時の状態変化) 消化槽では、系が不安定になることがある。Andrewsのモデルを用いれば、汚泥負荷量変化や投入方法と系の安定性の関係を検討できる。

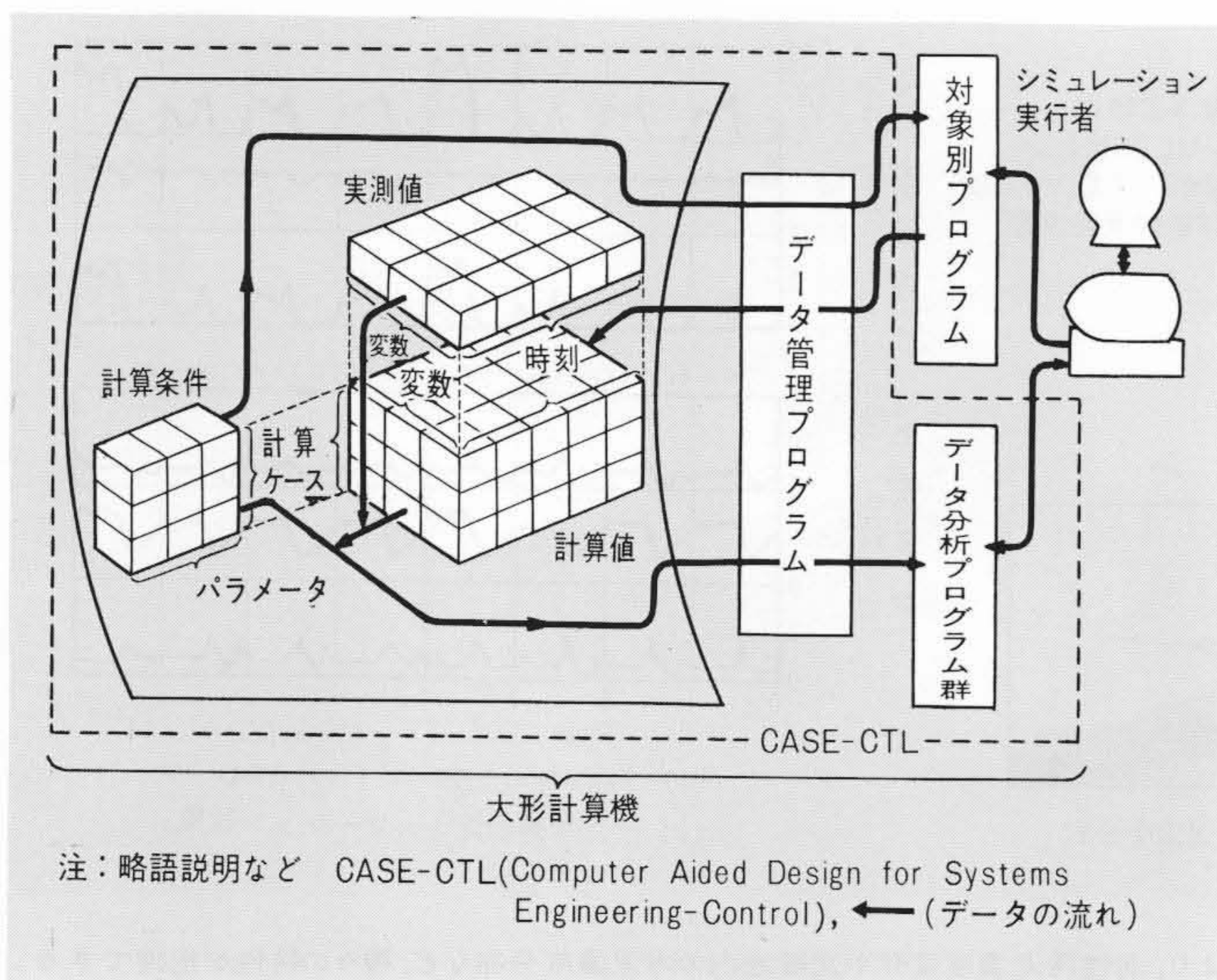


図11 シミュレーション支援プログラムCASE-CTLの構造 シミュレーションで扱うデータを格納するのに都合のよいファイルとデータ管理、データ分析プログラム群を備えており、対象別プログラムを接続することによって効率的なシミュレーションができる。

ルを計算し、結果を分析、評価することを繰り返す。対象モデルは個々に異なるが、分析、評価のためのプログラム群、例えば、グラフ作成、統計値算出、パラメータ推定などは対象が異なっても機能的には同じであり、データ構造の確定により共通化できる。以上の観点から、対象、目的に応じシミュレーションを効率化するために、配列構造のデータ検索、格納を支援するデータ管理プログラムと、このデータを分析、評価するデータ分析プログラム群をもつ汎用支援プログラム(CASE-CTL)を開発した(図11)。事務計算を支援する一般のデータ管理プログラムは、主として階層的、あるいはネットワーク的関連をもつデータを対象とするのに対し、CASE-CTLは配列構造データを容易に取り扱い、シミュレーションの効率を大幅に向上している。

本プログラムは上水道計画に適用し、(1)管網上のポンプ、バルブの設備計画、(2)NEFLAN-Cのパラメータ調節、(3)現状管網構造のモデル化に用いた。

その実行には、(1)管網構造データ(網接続行列、管路抵抗、ノード標高など)、(2)バルブ、ポンプ設備条件を修正しながら管網内の水理挙動をシミュレートする必要がある、多くの条件、膨大なデータを取り扱う必要があった。本プログラムと管網シミュレーションプログラムを接続し、シミュレーション用データをすべて本プログラムに格納した結果、シミュレーション条件の変更、その影響の分析を一貫してデータ分析プログラムで実行することが可能となり、オフラインシミュレーションを効率化し、その質の向上が達成されている。

4 結 言

以上、巨大、広域化している上下水道システムでのシミュレーション技術の現状について述べた。

上水道システムでは、需要予測とこれに基づく配分計画技法が確立されており、横浜市水道の導・配水系は既に1977年以降、また、高松市水道の配水系は1981年以降、トータルシステムが順調に運転を続けており、水量に関しては本格的なトータルシステム制御時代に入った。しかし、水質に関してはまだシステム制御は行なわれていない。これは浄水場で生産された水の品質の安全は管路により供給末端に至るまで確

保されることが前提であるからであるが、実際には、(1)残留塩素の減少、(2)濁水の発生、(3)異物の混入、(4)微量汚染物質(トリハロメタンなど)の生成など、給・配水に伴って徐々に水質劣化が生じている^{14), 15)}。その原因は水道施設そのものにあるから、これを抑制するような上水道プロセス及びシステム制御の開発には相当の困難が伴うものと予想されるが、今後、克服、開発すべき重要な課題である。

上水道管路がネットワークを形成するのとは異なり、下水道は一般に開水路樹枝状系統から成るために、配分計画の実用化の必要性はまだ低い。水量に関する下水道システム制御は、流入量予測に基づく雨水ポンプ、ゲート、バルブの最適スケジューリング及び協調制御が、1982年大阪市下水道局弁天抽水所で運転を開始した。水質に関しては上水道に先駆け、監視、規正、混合、希釈、平滑化理論が確立されている^{2), 16)}が、管渠のネットワーク化が課題であり、これが進めば、流量配分計画とともに下水道システム制御は大きく進展するものと期待される。挙動の把握が難しい下水処理プロセスでも、シミュレーション技術は大きい役割を果たし、最適化制御を実現している。

システム制御、計画運用技法及びシミュレーション技術の開発に当たり、御指導をいただいた多くの上下水道関係の各位に対し、厚く御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) K. Matsumoto, et al.: Development of a Hierarchical Operation Scheduling Model and its Application to Large Scale Water Supply Systems, Preprints of 8th IFAC World Congress, S47(1981)
- 2) 松本, 外: 広域上下水道システムの総合制御, 日立評論, 62, 8, 553~558(昭55-8)
- 3) 宮岡, 外: 上水道配水制御技法“NEFLAN-C”の開発, 日立評論, 64, 2, 135~140(昭57-2)
- 4) 四宮, 外: 高松市水道局納め配水コントロールシステム日立評論, 64, 6, 447~452(昭57-6)
- 5) 宮岡, 外: ネットワークフロー理論の応用による大規模配水系統の圧力最適化法, 電気学会論文誌, 102, C3, 59~66, (昭57-3)
- 6) 塩谷, 外: 雨水排水系における流入量予測とゲート, ポンプ, バルブの協調制御, 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(昭55-10)
- 7) 井上, 外: 不定流の数値計算法の洪水問題への適用, 第22回水理講演会論文集(1978)
- 8) 水理公式集, 土木学会(昭46改訂版)
- 9) 増位, 外: 流入負荷量の日間変化予測値に基づく活性汚泥プロセスの基質負荷制御, 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(昭55-10)
- 10) M. Tanuma, et al.: Total Sludge Quantity Control for Activated Sludge Process, Water Science and Technology, 13, 427~432(1981)
- 11) J. B. Busby, et al.: Dynamic Modeling and Control Strategies for the Activated Sludge Process, J. WPCF, 47-5, 1055~1080(1975)
- 12) S. P. Graef, et al.: Stability and Control of Anaerobic Digestion, J. WPCF, 46-4, 666~683(1974)
- 13) 船橋, 外: 会話型設計プログラムと水系制御システムへの応用, 昭57電学大会シンポジウム, S-13(昭57-3)
- 14) 小出: 管網における水質分布計算, 水道協会誌, No.569, 31~50(1982-2)
- 15) 後藤: 配水管網における水質変化, 水道協会誌, No.569, 51~64(1982-2)
- 16) 大成, 外: 上下水道における設備, 運用計画技法, 日立評論, 62, 8, 547~552(昭55-8)