

広域上下水道システムの総合制御

Integrated Control Systems for Overall Managing of Extensive Water and Wastewater Systems

都市の発展とともに、上下水道システムは広域化、複雑化している。このため、広域的な水供給、処理の効率化及び安定化を、システム全体からながめた総合的な制御により、行なうことが急務となっている。上水道については、需要予測に基づく取水計画と配分計画をもとに、取水場や浄水場などを制御するための階層化モデルにより、多様な運用目的を満たし、同時に人間による計画値のチェックや修正を容易にした上水道運用システムを開発した。次いで、下水道については、雨水流入量予測に基づく雨水排除や、流入水質の平均化、処理場の運転平滑化のための管渠内一時貯留、幹線間の混合、希釈、雨水沈殿池の運用などを含んだ広域システムの実現が可能となった。本稿は、これらの技法について述べる。

松本邦顕* Kuniaki Matsumoto
塩谷 真* Makoto Shiota
柏木雅彦** Masahiko Kashiwagi

1 緒 言

上下水道の普及拡大と、設備の大容量化及び複雑化に伴い、広域水系を総合的に監視制御する運用システムが導入されつつある^{1),2)}。上水道では、曜日、天候、気温などの要因による需要変動の予測に基づいた日々の配分計画と、保守、事故などによる施設条件を勘案した取水場、浄水場、配水池などの設備の制御が必要である^{3),4)}。実用化の問題点は、(1) 大規模上水道系の複雑な制約、多様な運用目的をいかに効率良くモデリングするか、(2) 人間による計画値のチェックや修正をいかに容易にするか、の2点である。これらの問題点を解決するために、配分計画モデルを時間的にも空間的にも階層化した時空間階層構成とし、横浜市水道の総合運用システムに適用した¹⁾。

下水道では、処理水質の高度化と安定化、及び溢水や冠水防止⁵⁾、更に効率(経済性)向上のために、処理場外と場内の制御の確立が必要である。処理場外の制御は、複数の処理場、ポンプ場、管渠など全体をながめて最も最適となる制御を行なう広域下水道システムによって実現される。広域下水道システムは、監視・規制システム、雨水放流制御システム、混合希釈制御システム、負荷平滑化制御システム及びポンプ運転制御システムから構成される。これらの制御システムは、予防制御、緊急制御及び復旧制御に分け、状況に応じ組み合わせて適用する。

2 広域上水道運用システム

2.1 運用システム全体構成

上水道系は、取水場、浄水場、配水池、ポンプ場、需要端などが導水管と送水管で相互に結合され、大規模かつ複雑なネットワークを構成している。上水道運用システムは、このようなネットワーク上で、次のような多様な運用目的をもつ。(1) 契約の遵守(他事業体からの契約買水の遵守)、(2) 経済的運用(薬品注入費とポンプ輸送費の最小化)、(3) 運転の定常化(運転の容易化と機器の疲弊の防止)、(4) 貯水施設の有効かつ安全な運用(需要変動に対するバッファと配水池間の水位不均衡の防止)、(5) 適正圧の確保(サービス圧の確保と漏水の抑制)。

横浜市水道は、1日最大178万 m^3/d を給水可能な大規模上水道システムである。水系は相模川水系の道志川、相模湖、

馬入川の3系統から取水し、西谷浄水場(356,000 m^3/d)、川井浄水場(106,400 m^3/d)、鶴ヶ峰浄水場(106,400 m^3/d)、小雀浄水場(1,009,200 m^3/d)で浄水する系統と、酒匂川水系から取水し、神奈川県内広域水道企業団を通じて浄水を受水する系統から成っている。

市内には、上記4浄水場のほか19配水池(近い将来21配水池になる。)、28ポンプ場が約5,000kmに及ぶ送配水管網によ

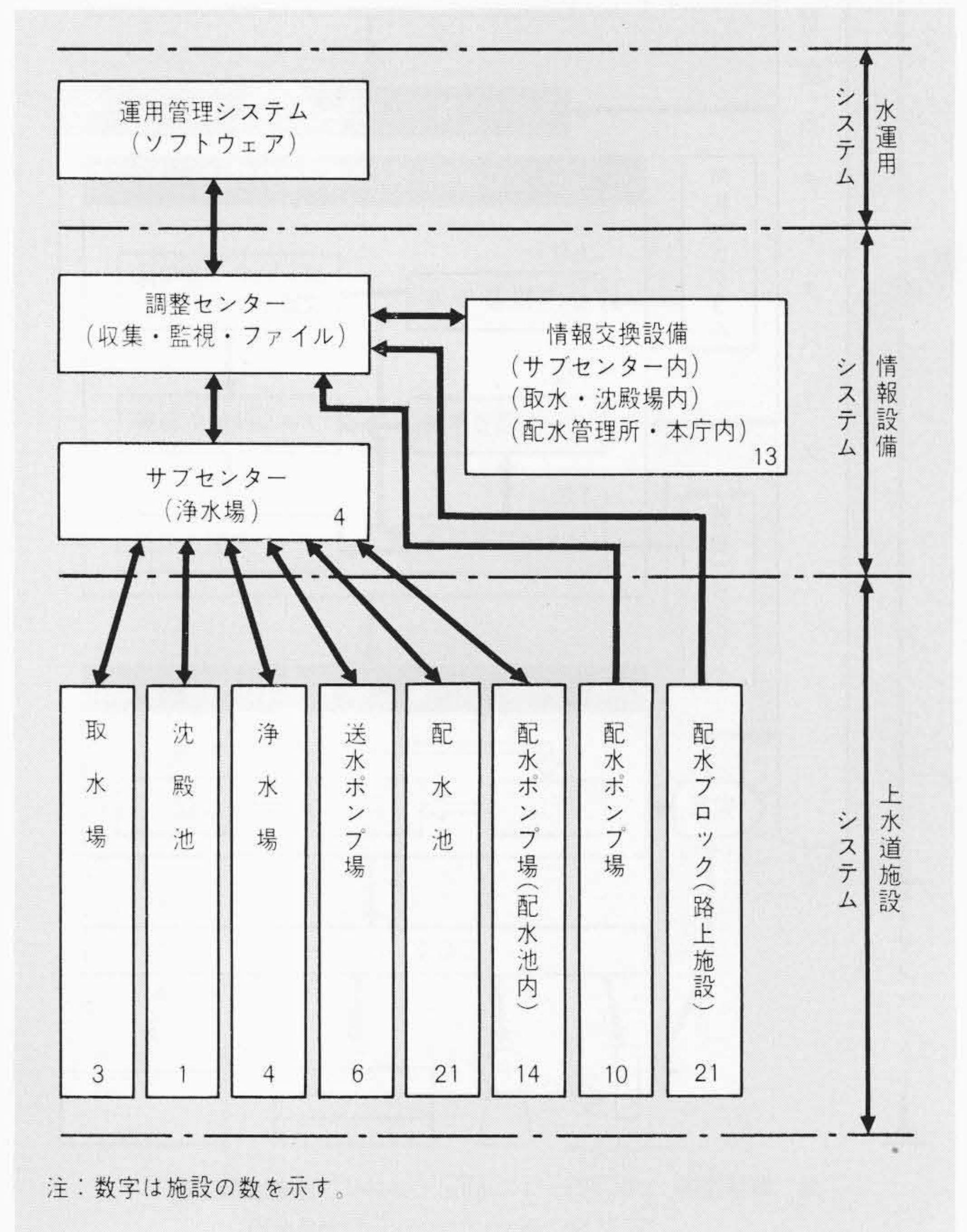


図1 上水道総合運用システム全体構成(横浜市) 横浜市水道では、水運用システム及び情報設備システムの一部が運用管理システムに、他の残りの部分が監視制御システムに相当する。

* 日立製作所システム開発研究所 ** 日立製作所大みか工場

って連絡され点在している。これらの複雑な施設を安全、かつ円滑に管理運用するために全市を21のブロックに区分し、これらのうち同一水系の複数のブロックをまとめてゾーンとし、5つのゾーンに分割した。これをもとに、全水道施設を、取水場～浄水場～配水池～配水ブロックという流れを基本としたネットワークとしてとらえ、水運用を総合的に管理調整するシステムを導入し、その中心が調整センターである。総合運用システムの構成は、図1に示すように3階層構成をとっている。

総合運用システムは、(1) 必要なデータを調整センターに収集して水道施設の運転状況を把握するとともに、運用計画の立案及び局内主要事業所への各種の情報サービスを行なう機能と、(2) 調整センターから運用計画をサブセンターに伝え、浄水場、配水池などを監視・制御する機能をもっている。

調整センターで立案する運用計画は、

(1) 長期運用計画(年単位10年間、月単位年間、週単位月間)

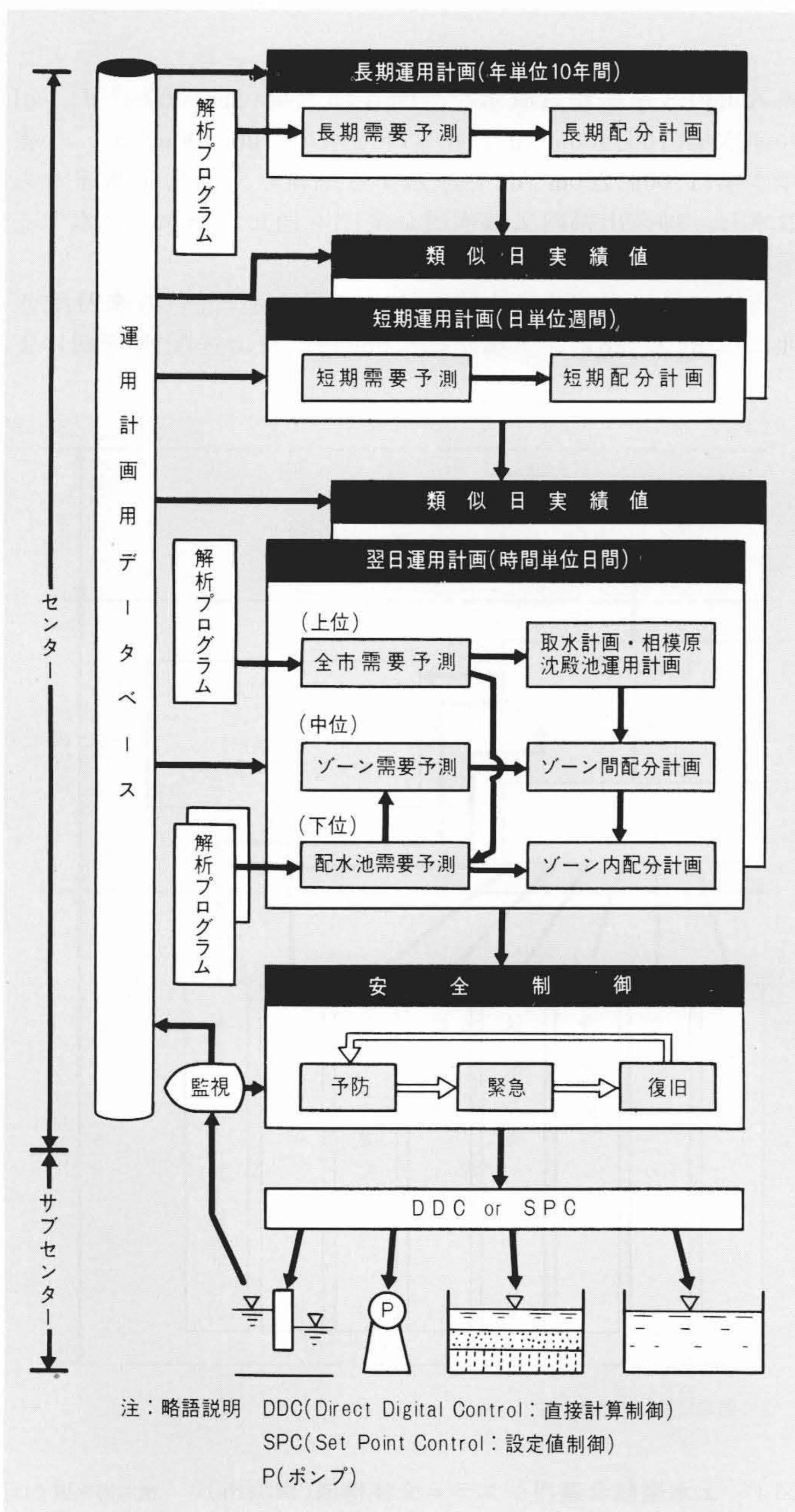


図2 上水道総合運用システムモデル構成 オフラインモデルとして長期運用計画が、またオンラインモデルとして短期運用計画、翌日運用計画及び安全制御がある。運用計画は、モデルの計算と類似日実績値(2年分のデータ保持)の検索による方法のどちらでも立案可能である。

(2) 短期運用計画(日単位週間)

(3) 翌日運用計画(時間単位日間)

(4) 安全制御(オンライン修正を含む予防、緊急及び復旧制御)である。各運用計画は、需要予測と配分計画から構成されている。このうち翌日運用計画は、各施設の運転計画値を直接決めるものであるため、運用計画立案時にオペレータが、計画値の適否を水の流れのプロセスに沿って、段階的にチェックできるように、全市、ゾーン間及びゾーン内の階層型に分けてある。運用計画モデルの構成を図2に示す。このほか、設備計画用として管網計算プログラムをもっている。

2.2 需要予測

図2に示した長期、短期及び翌日の需要予測のうち、重要な(1) 長期の全市年単位需要予測、(2) 翌日の全市日単位需要予測、及び(3) 翌日のゾーン内時間単位需要予測の各方式について概説する。

(1) 全市年単位需要予測

長期予測はその使用法を考慮し、(a)統計モデルと(b)原単位モデルに分けた。統計モデルは、(i)時系列傾向予測による回帰モデルと、(ii)各種要因(例えば、給水人口、水道水平平均価格など)を説明変数とする要因モデルから構成した。原単位モデルは、需要量を家事用水、業務用水及びその他用水に分け、更に、家事用水を給水人口、水洗便所設置数、自動車保有台数、1戸建新築住宅数などに伴う需要量に分け、各用水の予測値を積み上げて全体予測を行なう。

これらの統計モデルと原単位モデルに用いる関数形として、二次関数、ロジスティック関数、ゴンペルツ関数、べき関数などをあらかじめ組み込み、同時に異なった関数による複数個の予測値をCRT(Cathode Ray Tube)で見ることににより、予測値を多方面から判断できるようにした。長期予測のモデル構成を図3に示す。

(2) 全市日単位需要予測

日単位の需要量は、傾向(すう勢)変動、季節変動、週間変動及び不規則変動(当日の天候、気温などによる変動)から成るが、この中でも特に不規則変動による影響が大である。そのため、まず各変動要因と配水量との関係を解析し、各要因が配水量にどの程度の影響を与えるかを要因別に明らかにした。次に、この結果をもとに、予測方式は、前1週間の平均配水量から不規則変動を除去したものに、曜日比率(週平均配水量と当該曜日の配水量との比率)を乗じたものを基本配水量とし、これを翌日の天候・気温の予測値と、特殊日(正月、5月連休など)などの要因で補正する方式とした。

(3) ゾーン内時間単位需要予測

配水池群を、それぞれの需要属性によって5つのエリア(ビル街、住宅街など)に分けた。

次に、予測モデルを、(a) 各配水池の日単位需要量を予測する日単位予測モデルと、(b) これに基づいて各配水池の時間単位需要量を予測する時間単位予測モデルから構成した。

(a) 日単位予測モデル

日単位予測モデルでは、エリア間の振分け比率、エリア内の配水池振分け比率及び特殊日のエリア間振分け比率を、要因(季節・曜日・天候)別にデータとしてもち、翌日の予測に基づいて該当比率を検索し、(2)で求めた全市日単位需要量予測値に、この比率を乗算して各配水池の日単位需要量を求める。

(b) 時間単位予測モデル

時間単位予測モデルは、エリア別のベースパターンデータと、各エリアごとに前日の実績需要パターンで毎日更新

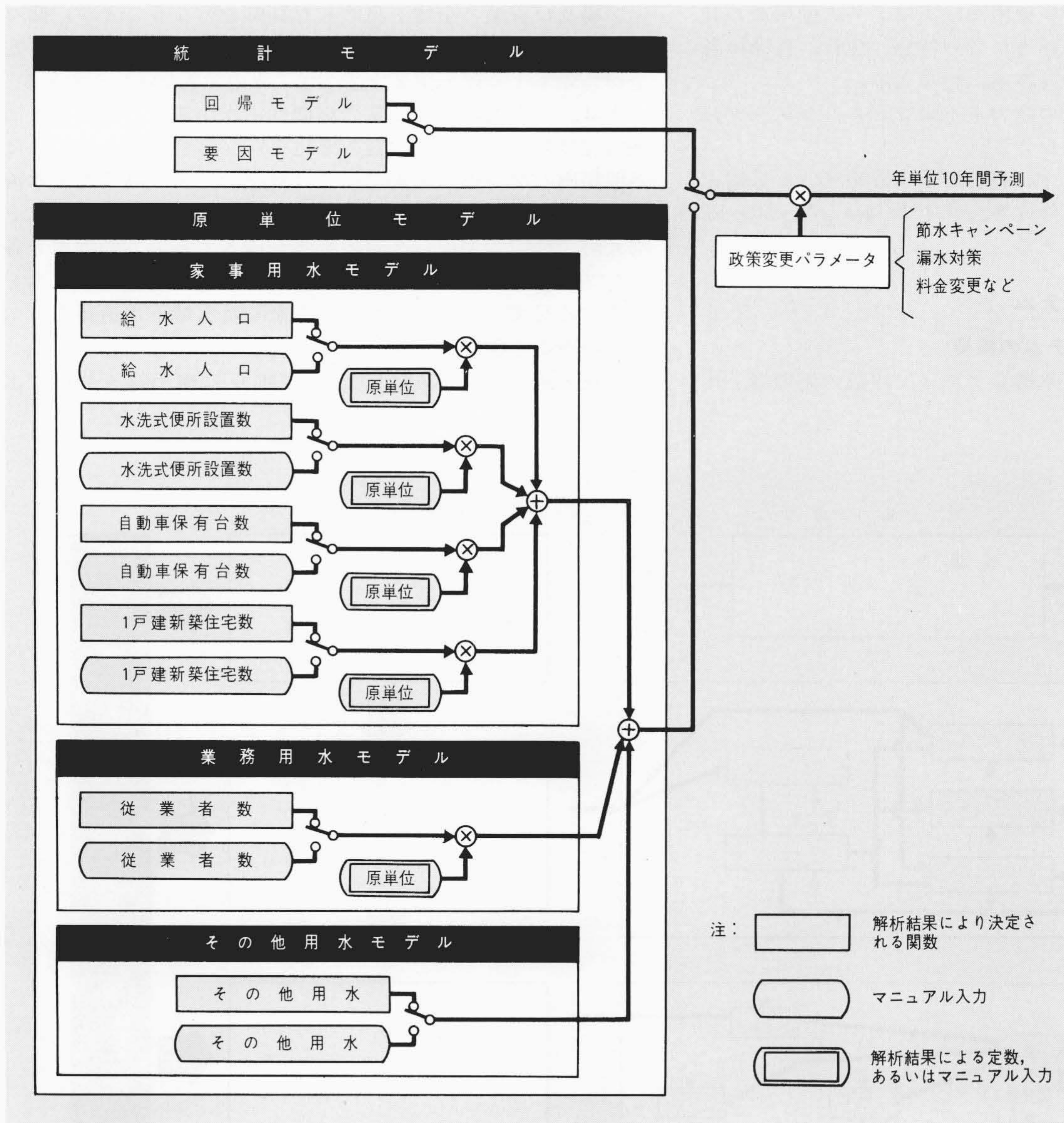


図3 長期需要予測モデル
各予測モデルは、複数の関数を用いて複数の予測値を計算し、10年後までの毎年の予測値を台風進路予測のイメージで、CRT上で見ることができる。

するカレントパターンデータをもつ。配水池別時間単位予測は、翌日の季節、曜日、天候予測値を基に、各エリア別にこれら両データからそれぞれ該当パターンを検索し、これらを指数平滑して予測パターンを作成し、(a)で求めた配水池別日単位予測量を乗算することによって、時間単位予測に展開する。なお、(1)～(3)で説明した予測モデルを含む全予測モデルのパラメータは、図2の中に示した解析プログラムを用い、CRT上からの要求に応じて自動的に更新できる。

2.3 配分計画

図2に示した長期、短期及び翌日の配分計画のうち、重要な(1)長期配分計画、(2)翌日のゾーン間配分計画及び(3)ゾーン内配分計画の各方式について概説する。

(1) 長期配分計画

長期配分計画は、月単位年間需要量を基に、経済的な企業団受水量、原水取水量、4浄水場処理量及びゾーン間配分量を決定する。この計画値は、短期配分計画の入力となる。なお、最適配分の技法として、ネットワークの最小費用流れ問題の解法であるPrimal-dual法を採用した。

(2) ゾーン間配分計画

翌日配分計画は、図4に示すように上位、中位、下位の3階層モデルとなっている。ゾーン間配分計画モデルは中位モ

デルであり、ゾーンを節点とするネットワーク上で、昼、夜それぞれの時間帯で運転計画値が一定となるように、各浄水場の処理水量や浄水場間の融通量を決定する。ゾーン間ネットワークの各輸送路には流量の上下限值があり、ゾーンには貯水能力と需要点がある。したがって、これは取水口をソース、需要端をシンクとするネットワークの最小コストフロー問題となるため、薬品注入費とポンプによる輸送費の和が最小になるような流量解を求める。最適化手法には、(1)で述べたPrimal-dual法を採用した。

(3) ゾーン内配分計画

このモデルは、図4に示した3階層モデルの下位モデルであり、ゾーン内の浄水場から配水池までの配分計画を決定するものである。このモデルでは、ゾーン内の送水系統が主としてツリー状である点に着目し、水系のもつ流量と圧力の非線形関係を、下流側からの流量の積上げ計算により直接扱える方式とした。なお、モデルの汎用性を意図して、送水系統を五つの基本要素で記述できるように工夫した。すべてのゾーン内の配分計画は、この五つの要素を組み合わせて計算している。

2.4 マンマシンシステム

マンマシンシステムとして、下記の機能をもっている。

- (1) 運用計画立案時のモデル使用か、実績データ使用かの計算方式の選択、及び立案手順としての特急、急行、普通の各モードの選択をCRT上から容易に行なえる。
- (2) 運転条件の変更、施設的能力上下限などのパラメータ修正をCRT上から容易に行なえる。
- (3) CRTの新画面作成、画面修正及び情報サービス端末(問合せ端末)への伝送画面作成を、ライトペンとキーボードを用いて極めて容易に行なえる。

3 広域下水道運用システム

3.1 広域下水道運用システムの概要

大都市の下水道や流域下水道などでは、複数の処理場、ポ

ンプ場及び管渠の全体を見渡した制御を行なうことが、個々の処理場内のプロセス制御とともに、下水処理システムを安全かつ効率よく運転する上で欠くことのできないものである。例えば、終末処理場に多量の高濃度汚水が流入した場合、活性汚泥は死滅し、処理水質の悪化という事態になる。これは処理場内のプロセス制御だけでは解決できず、高濃度汚水流入を事前に検知し、これを希釈、除去する必要がある。また、雨天時では、管渠内に多量の雨水が流入する。この雨水を各ポンプ場で適量排除し、管渠からの溢水、ポンプ場の冠水を防止する必要がある。これらを考慮した広域下水道運用システムの概要を図5に示す。

監視・規制システムは、(1) 主要地点に検出端を設け、水

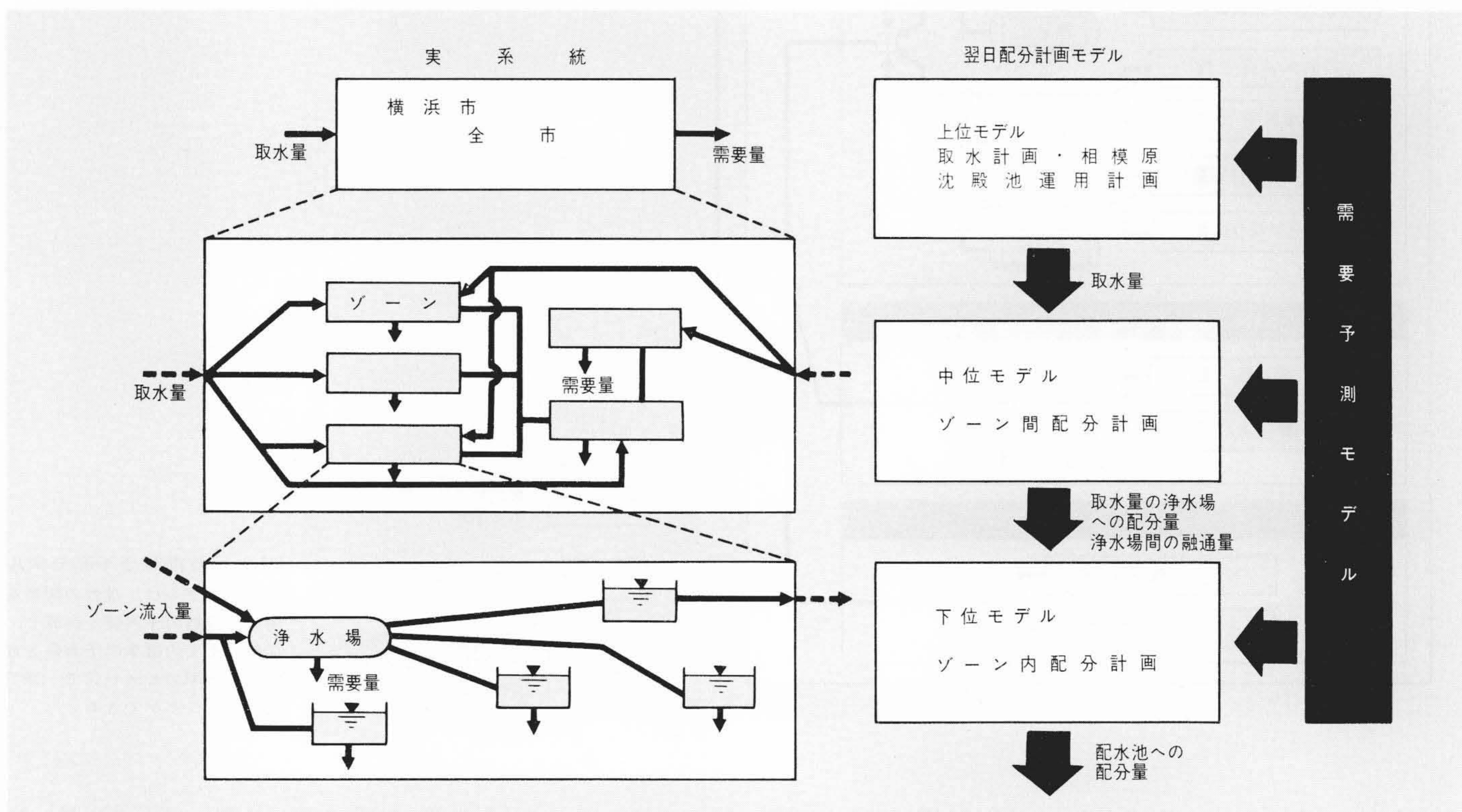


図4 横浜市水道の実水系と翌日配分計画モデルの構成

翌日配分計画は、オペレータによる計画値のチェックや修正を容易にするため、時間的、空間的に階層化を図っている。

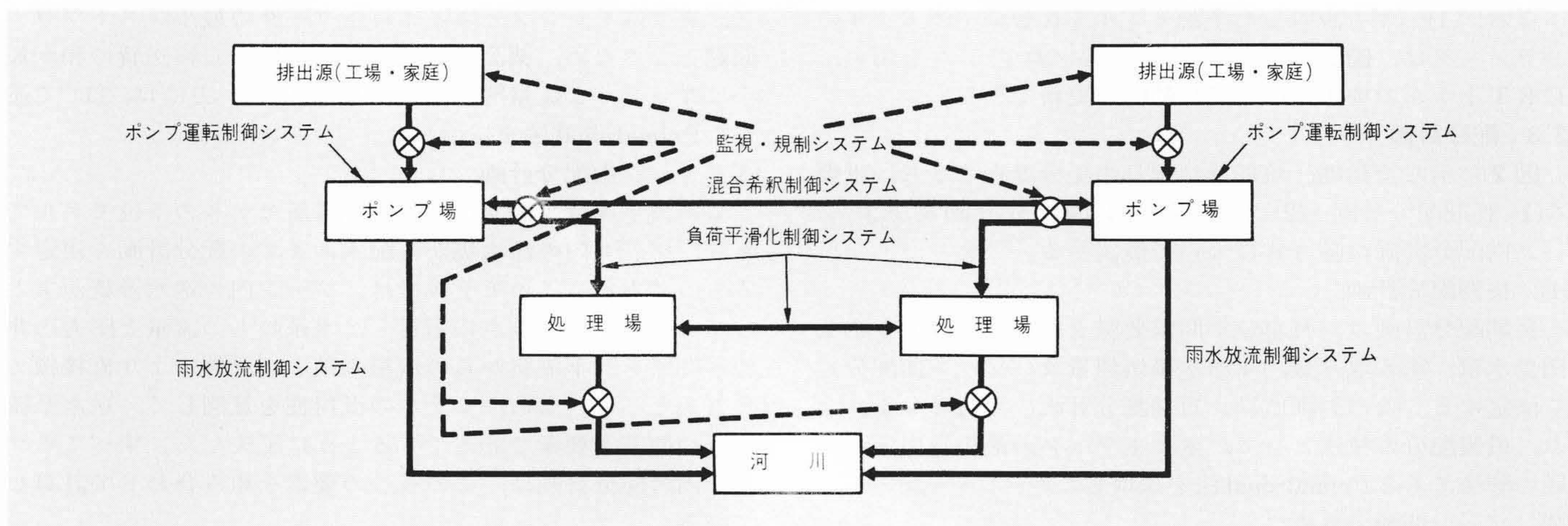


図5 広域下水道運用システムの概要 水量・水質の監視と排出源の規制を行なう監視・規制システム、溢水や河川汚濁を防止する雨水放流制御システム、高濃度負荷を軽減する混合希釈制御システム、処理効率向上と安定化を図る負荷平滑化制御システム及び基本システムとしてのポンプ運転制御システムから構成される。

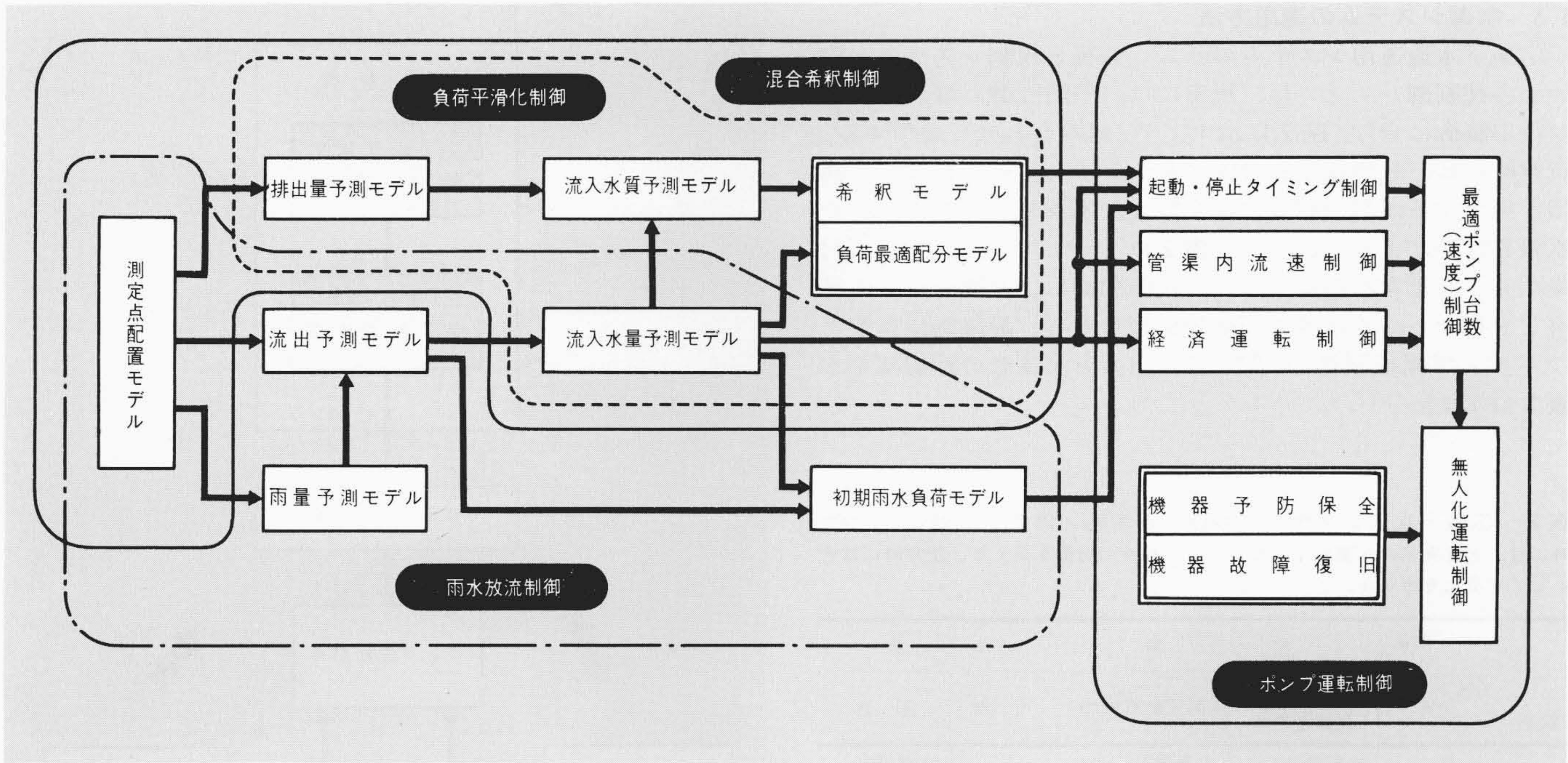


図6 広域下水道システムにおける制御システムの構成要素と、それら要素間の関連 雨水放流制御、混合希釈制御及び負荷平滑化制御に共通な要素として流入水量予測モデルがあり、また、ポンプ運転制御はすべての制御の実現に欠くことのできないものである。

量・水質特性を把握し、制御・規制のための基礎データを収集する、(2) 排出基準に違反する工場など、排出源に対し監視・報告を行ない、処理場の負荷軽減を図って河川の汚濁を防止する。

雨水放流制御システムは、河川の汚濁防止を目的とする初期雨水の貯留・処理と、溢水防止・機器冠水防止を目的とする雨水の河川放流を行なう。この制御はポンプ場や処理場を対象として行なう。

混合希釈制御システムは、処理場に対する重負荷を軽減するため、悪性汚水の希釈を行なう。この制御はポンプ場を対象として行なう。

負荷平滑化制御システムは、処理場への負荷変動を軽減して処理効率の向上と安定化を図る。制御はポンプ場と処理場を対象として行ない、(1) 高濃度汚水の希釈と(2) 負荷変動の軽減の両面から平滑化を行なう。

ポンプ運転制御システムは、管渠内への砂石などの堆積防止を目的とする管渠内流速制御、雨水放流、混合希釈、負荷平滑化などを目的とする流入予測と起動・停止タイミング制御、その他遠隔運転制御や省エネルギー経済運転制御を行なう。

これらの制御システムの構成要素と、それら要素間の関連を図6に示す。

3.2 検出端設置位置決定システム

広域下水道運用システムの実現には、各種の検出端の利用が不可欠になり、その設置位置をどこにするかが問題となる。検出端は雨水流入予測のための雨量計や流量計だけでなく、排出源の監視・規制や流下下水の希釈制御のために水質計も必要となってくる。

この設置位置を決定する方法の概略は、まず、監視・制御・規制の目的別に好ましい設置位置を抽出する。次に抽出された位置をずらして、多くの目的に共用できる位置を探すことにより、検出端の数を少なくする、というものである。

この方法を各種測定項目に適用して、得られた一般的結論を表1に示す。

表1 用途別・目的別の検出端設置位置 検出端の用途は水量予測か、水質予測か、処理場運転か、また、目的は監視か制御か、規制かを考慮して設置位置を決める必要がある。

用途	測定項目		目的		
	代用指標		監視	制御	規制
流入水量予測	流量 水位+流速 水位		●流量変化点 ●処理場入口	●各ポンプ場までの流下時間 15分ぐらいの所	●排出源近く
	—	雨量	—	●各ポンプ場排水区ごと	—
流入水質予測	重金属	Hg Cr ⁶⁺ その他	●各汚染質濃度変化点 ●処理場入口	●濃度変化点 (できるだけ排出源近く)	●排出源近く
	毒物	シアン その他		●各ポンプ場までの流下時間 15分ぐらいの所 ●処理場入口	
	油	油分	●排出源近く	●各ポンプ場までの流下時間 15分ぐらいの所	●排出源近く
	有機物	TOC 酸化還元電位 濁度	●濃度変化点 (できるだけ排出源近く) ●処理場入口	●濃度変化点 (できるだけ排出源近く) ●各ポンプ場までの流下時間 15分ぐらいの所 ●処理場入口	●排出源近く
処理場運転	DO 水温 pH		●ポンプ場入口 ●処理場入口	●処理場入口	—

注：略語説明 TOC(Total Organic Carbon：全有機炭素量)
DO (Dissolved Oxygen：溶存酸素量)

3.3 制御システムの適用方法

広域下水道運用システムのうち、監視・規制システムを除いた各種制御システムは、現実には、予防制御、緊急制御及び復旧制御に分け、図7に示すように組み合わせて適用する。正常時には、日単位運転計画に基づき予防制御を行なう。異常が発生すると緊急制御に切り替え、水質異常か雨水による水量異常かにより、それぞれ表2に示した対策を行なう。対策が完了し正常状態になると、復旧制御により運転計画の見直しを行ない、正常時の予防制御にもどる。最終的に重要となるポンプ運転制御⁵⁾に関しては、ポンプ運転の評価基準を表3に示す。

表2 広域下水道システムにおける正常時・異常時の対策 異常時には、水質異常か水量異常かにより、それぞれ対策を変える。正常時には主として平滑化を行なう。

状態	対象	水 質		水 量	
		重 金 属・ 高濃度汚水	雨天時有機物	汚 水	雨 水
異 常 時	オンライン 検知 予測制御	水質悪化 検知 + 予測 + 検知後貯留 希釈	水量増加 検知 + 事前揚水* + 初期雨水貯留	—	水量増加 検知 + 予測 + 事前揚水
		水質予測 + 事前貯留 平滑化	—	水量予測 + 平滑化	—
正 常 時	オフライン 計画 オンライン 検知修正制御	—	—	—	—

注：* 事前揚水(水量増加に対応するため、貯留水を事前に処理場へ送水すること。)

表3 ポンプ運転方法の評価基準 評価基準には溢水防止など制約条件的なものと、機器長寿命化など重要度で順位付けのできる、いわゆる評価基準がある。

大 項 目	目的・理由	内 容
制約条件	1 溢水防止	(1) 路上浸水、共同溝浸水(ポンプ所外) (2) 沈砂池床上冠水(ポンプ所内)
	2 ポンプ故障防止	(3) ポンプ井水位異常低下→空気吸込
	3 ポンプ始動不能防止	(4) 同時始動時の時間間隔の短すぎ→母線バンク
評価基準	1 機器長寿命化	(1) 特定ポンプの始動・停止頻度大 } ローテーションルール不良 (2) 特定ポンプの運転時間大 } (3) 再始動までの時間間隔短い。
	2 運転員の時間的余裕	(1) 始動までの時間的余裕少ない。 } 始動・停止水位 (2) 停止までの時間的余裕少ない。 } 水位設定幅、その他運転ルールの不良
	3 経済性の向上	不必要な運転により運転コスト寿命を悪化させる(管内貯溜などを考慮しない)。
	4 水質保全	(1) 流速低下による管内沈降堆積(管渠特性も変化) (2) 降雨時初期汚染質負荷の河川放流 (3) 処理場への負荷変動大きい。

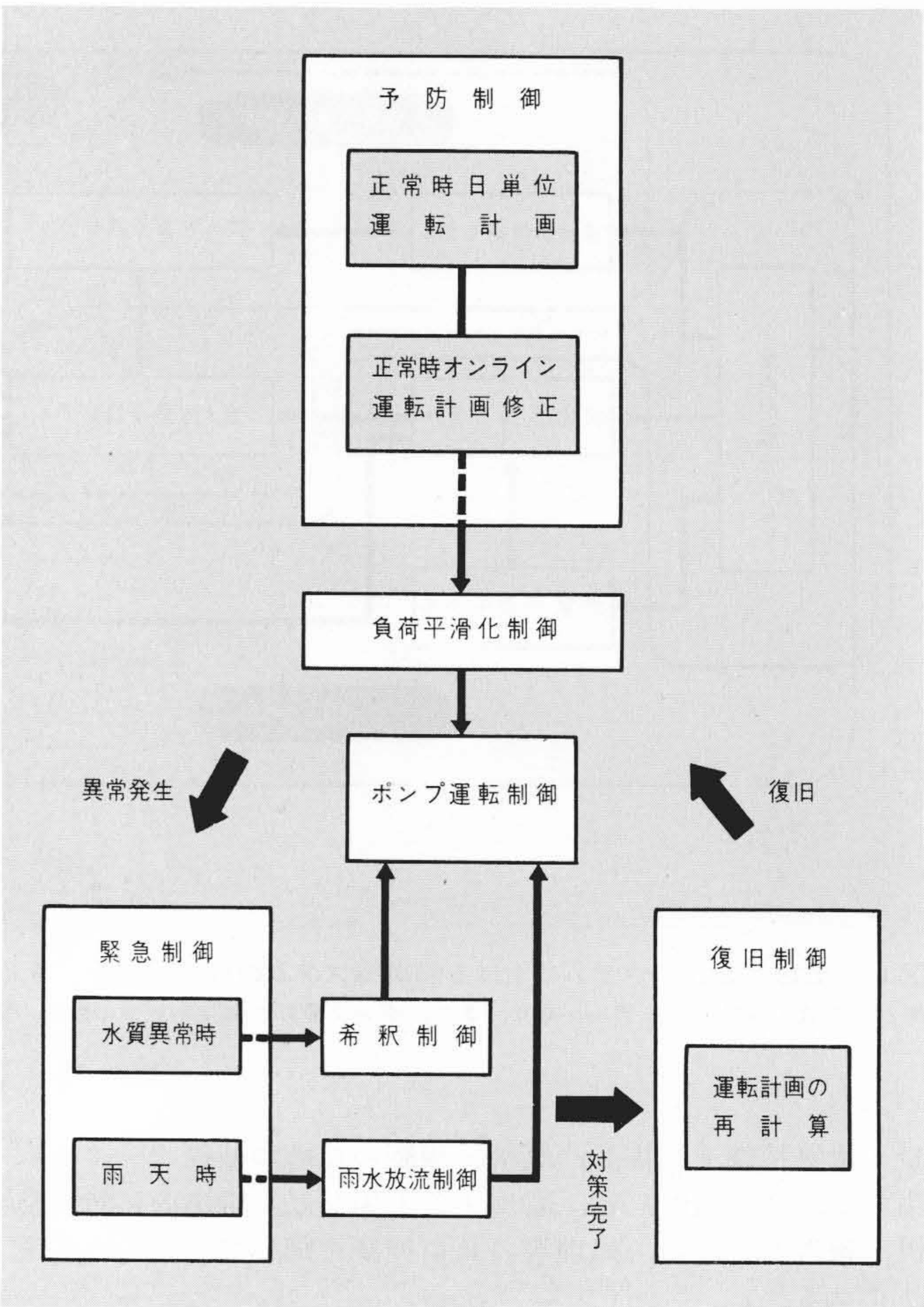


図7 広域下水道システムにおける各種制御の適用 正常時には予防制御を行ない、異常が発生すると緊急制御に切り替える。対策が完了すると、復旧制御により運転計画の見直しを行なう。

4 結 言

省資源、省エネルギーが叫ばれている現在、水資源管理の範囲はますます広域化し、かつ管理対象も多様化しているため、今後、上下水道とも全システムをながめた総合運用が必要になってくる。総合運用システムを実現するためには、ハードウェアシステムの信頼性、運用モデルの機能性、ファイル情報の正確性、制御アルゴリズムの確実性、マンマシンシステムの操作性などが必要であり、これらの機能がすべてそろって、より安全で安定なシステムが達成されるものであり、そこに大規模システム技術の課題がある。

終わりに、上水道運用システムの開発に当たり、御指導いただいた関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

1) 松本，外：上水道総合運用システム，システムと制御，Vol. 22，129～137（1978-3）
2) 松本，外：上下水道の総合管理システム，計測と制御，Vol. 16，57～64（昭52-1）
3) 岡本，外：上下水道システムにおける制御用計算機の応用，日立評論，61，573～576（昭54-8）
4) 上田，外：上水道システム運用技法，日立評論，59，631～636（昭52-8）
5) 加藤，外：流入量予測に基づく汚水及び雨水ポンプの最適制御，日立評論，59，661～666（昭52-8）