

上水道総合管理システム

Total System for Water Supply Control

水需要の増大に対処するために、ダム建設や水道施設の増設・拡充が計画・実施されているが、長期的には需要の伸びに供給が追い付かないのが実情であり、現在、将来とも施設の全能力を有効に発揮させ水を最高度に利用しようとする気運が高まっている。

それには、浄水場やポンプ場などの単独施設の監視制御だけでなく、水の需要量予測をも考慮した広域水道管理、いわゆる上水道総合管理システムが必要である。

本論文では始めに、上水道総合管理システムに要求される一般的機能とソフトウェアについて概略を述べた後、具体例として世界的にも技術レベルのうえで最高の横浜市水道局の総合管理システムの一端を紹介する。

神林 智博* *Kanbayashi Tomohiro*
 長谷川 清** *Hasegawa Kiyoshi*
 原田 壽明*** *Harada Toshiaki*
 山中 邦男**** *Yamanaka Kunio*
 宮岡伸一郎***** *Miyaoka Shin'ichiro*

1 緒 言

経済規模の拡大、都市への人口集中、生活水準の向上などのために水需要量の増大が続き、長期的には水の絶対量不足という問題が顕在化した。また水質面においても原水の汚濁が進行している。このような状況下で「良質な水を、適正な圧力で、必要とする量をタイムリーに供給する」という水道事業の使命を達成するためには、上水道の需要供給特性をダイナミックにとらえ、需要のコントロールをも志向した総合的な管理制御を行なうことが必要である。

この総合管理システムについては、既に横浜市水道局で一部稼動中であり、他の自治体などでもこのようなシステムを計画中である。更に国外では、フィラデルフィア、デンバー、ホノルル(アメリカ)、ウスター(イギリス)、チューリッヒ(スイス)などで実施又は計画中であり、今後この種の総合管理システムはますます増えていくものと思われる。

2 上水道総合管理システムの概要

上水道の特徴を監視制御という点から見れば、

- (1) 原水量、需要水量の不安定性(季節、気象条件、天候、使用目的などが原因)
- (2) 供給系統(特に配管網)の複雑性
- (3) 供給系統の特性(時間遅れ、他の輸送系に比較して多量な漏水量の発生)

などである。この特徴を踏まえて、既存の施設・設備を一部改造して、効率の良い水運用の実施により水の安定供給を図ろうとする考えが普及しつつある。

この効率的運用を達成するためには、水運用実施のためのアプリケーション・ソフト及び監視制御のためのコンピュータが一体となって初めて最も効果が発揮でき、これらを含めた施設の総合管理が志向されねばならない。

コンピュータは、従来から浄水場やポンプ場などに種々の形で導入されているが、コンピュータ万能という錯覚のもとで、コンピュータに必要以上の機能を持たせたり、あるいは水運用のためのアプリケーション・ソフトが不備であるために、所定の目的を十分達成していない事例が多い^{1),2)}と言われている。これらについては、コンピュータで実施すべき業務

を十分検討し、水道局のニーズに適切にマッチした内容のソフトウェアを選定することにより避けられる問題である。

日立製作所は、水運用に関するソフトウェアについては、**図1**に示すように、原水の流入量予測より需要家の配管網内の圧力監視制御に至るまでの広範囲なソフトウェアを持っているが、これらのソフトウェアがそろって初めて、アプリケーション・ソフトが完備したということができよう。

2.1 上水道総合管理システムの機能

水の効率的運用の実施に当たっては、各施設より入手したデータ及びシミュレーション結果、更に従来の経験を加味して運用計画を立て、その計画値を基礎に制御を行なうようにするのがよい。このためには、**図2**に示すような機能が必要となるが、これらの機能は従来の計装設備では対処できなくなり、コンピュータの導入は必須である。例えば、このシステムは経営管理システム、運用管理システム、監視制御システムに大別されるが、これらのシステムの有機的媒体としてのデータベースや、水運用者のための問合せ・応答のシステムとしての情報サービス機能は、コンピュータの最も得意とする情報処理機能である。

2.2 運用管理システム

上水道は取水口から需要端までの複雑に連結した大規模ネットワークであるが、このネットワークを上手に運用して、需要家の要求する水(量・圧・質)を低コストで供給する必要がある。

運用管理システムは、総合管理システムの中核であり、浄水場やポンプ場などの個々の施設の運用だけでなく、原水及び浄水の配分計画も立てるシステムである。このために、流入量や需要量の予測を、アプリケーション・ソフトを使って立案することが必要である。

2.3 監視制御システム

運用管理システムの下で、水道システムが適切に運転されるためには、全システムの情報を中央で監視し必要に応じ迅速に制御しなければならない。

このため、監視制御システムでは

- (1) Security Control: 水質、水量、水圧及び施設・機器の

* 横浜市水道局工務部部長 ** 日立製作所システム技術本部 *** 日立製作所計算制御技術本部
 **** 日立製作所大みか工場 ***** 日立製作所システム開発研究所

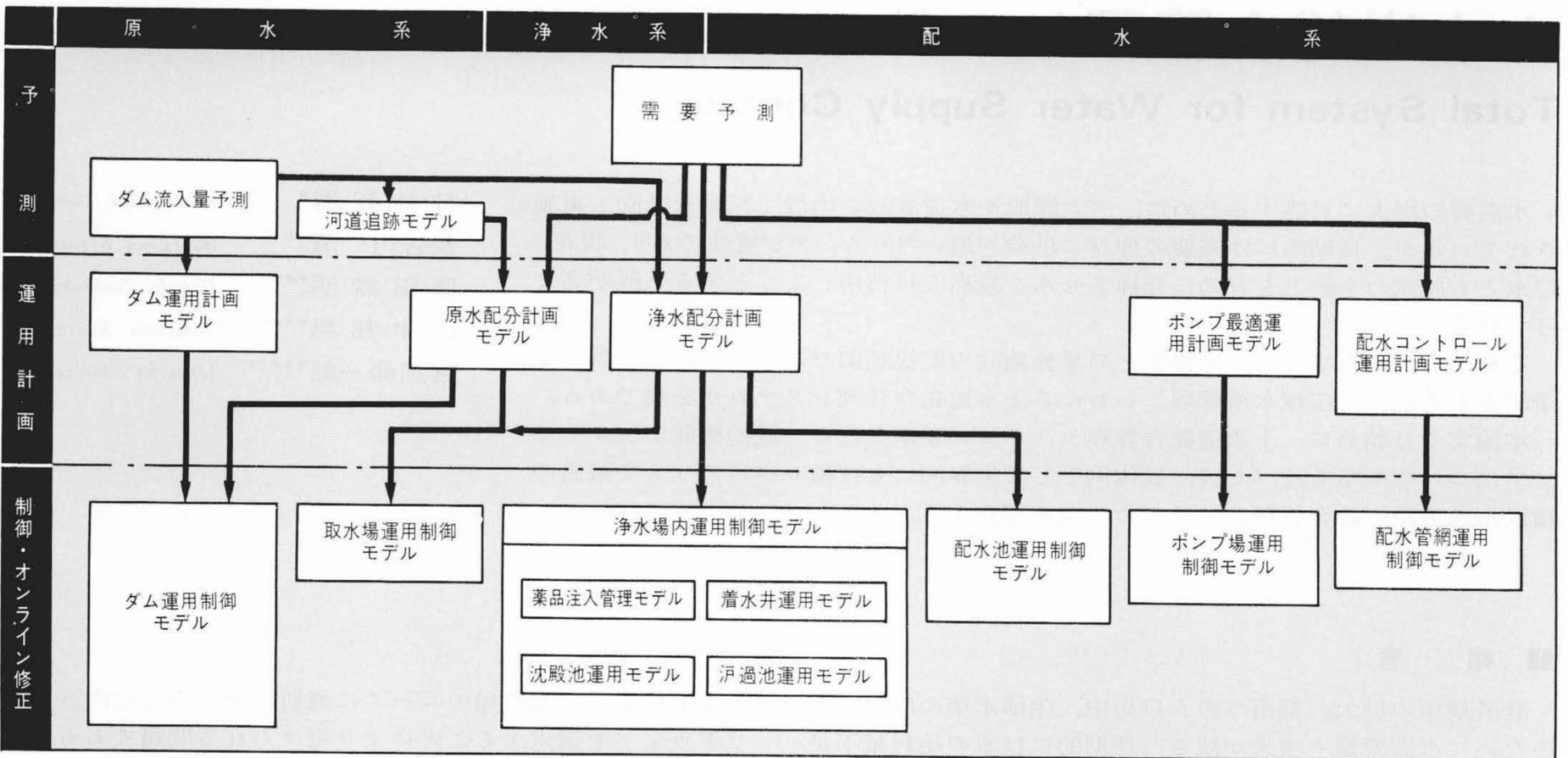


図1 上水道総合管理システムに要求される水運用アプリケーション・ソフトの全体図 原水の流入量予測より、需要家の配管網内の圧力監視制御に至るまでの広範囲なソフトウェアが完備されている。

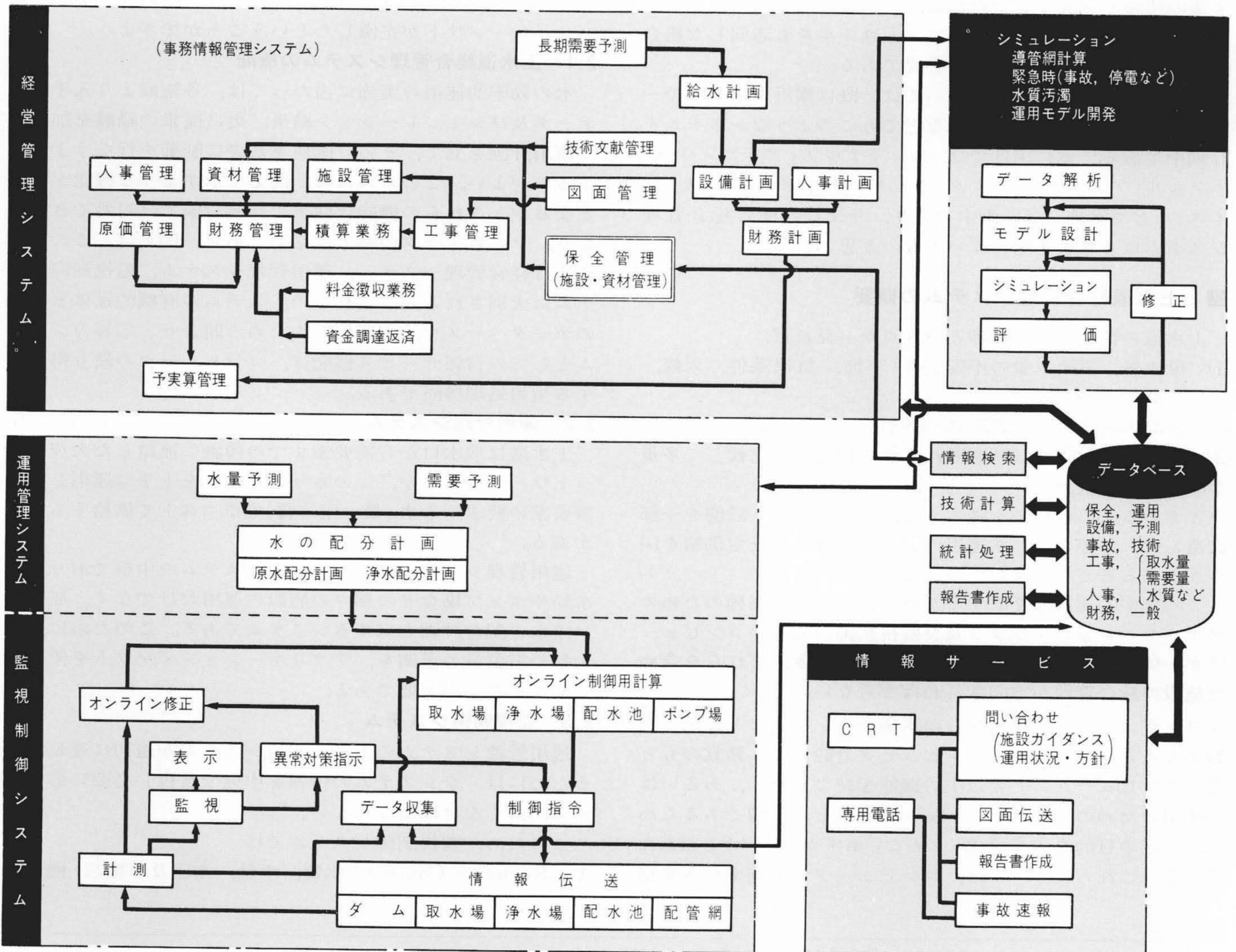


図2 上水道総合管理システムの機能系統図 上水道総合管理システムは、経営管理システム、運用管理システム及び監視制御システムから成り立つ。

安全性の確保

(2) **Optimum Control**：最適な取水・流量配分及び最小のコストで使用可能な水質の確保

(3) **MMC (Man Machine Communication)**：運転状況、異常状況を迅速確実に把握し、的確な処置、操作を行なうための人と計算機との意志疎通(協調性)の確保

の三つを監視制御システムの基本思想としている。

Security Controlは、異常発生の前・後に応じ、予防制御、緊急制御及び復旧制御に、また**Optimum Control**は長短期、翌日スケジュールに分類できる。また**MMC**については、ディスプレイ機能が十分発揮できるカラーディスプレイ(7色)を利用し、需要予測、実績値などをグラフィック表示し、また施設の故障に対しては発生箇所、種類、及び対策ガイダンスを出力するなどしている。一方、マクロな監視用としてグラフィックパネルを使うなどして、監視制御の個々の目的に見合った機器を使い分けている。

3 横浜市水道局における総合管理システム

横浜市水道は、我が国最初の近代的水道として明治20年(1887年)に創設され、現在の給水量は135万 m^3 /日の規模に達したが、横浜市が相模川で保有している約130万 m^3 /日の既得水源では、急増する水需要はまかなえない状態に至った。このため、新たに遠隔の酒匂川から神奈川県内広域水道企業団(以下、企業団と略す)を通じて既得水源保有量のほぼ50%にも相当する605,200 m^3 /日の配分水量を受水し、市内に給水することを目的とした第8回拡張事業(昭和46~54年度)と、浄水場などの計装設備の近代化を図ることを目的とした浄水施設整備事業(昭和51~56年度)を実施中である。

この両事業において、施設の適切な運営、水の有効利用など全水道施設の水運用を総合的に調整管理するシステムを計画し施工中である。このシステムは、西谷浄水場内に設置される総合的水運用センターである調整センターを頂点とし、

4浄水場をサブセンターとしたハイラーキ構成となっている。このシステムは、水道局の水運用システムとしては他に例を見ないユニークなシステムであり、以下に調整センターを中心に総合管理システムについて紹介する。

3.1 横浜市水道の特徴

横浜市水道の水系は、図3に示すように、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 /日)、川井浄水場(106,400 m^3 /日)、鶴ヶ峰浄水場(106,400 m^3 /日)、小雀浄水場(1,009,200 m^3 /日)で浄水する系統と、酒匂川水系から取水し、企業団を通じて浄水を受水する系統から成り立っている。

このうち道志川系、相模湖系は自然流下で導水し、川井、鶴ヶ峰、西谷の3浄水場で浄水され、馬入川系は、取水ポンプ、揚水ポンプと2段加圧で導水し小雀浄水場で浄水したのちその一部は横須賀市にも分水している。一方、企業団系は、企業団相模原、西長沢の両浄水場で浄水し、横浜市水道は、西谷浄水場配水池、港北配水池ほか2箇所を受水することになっている。

市内には、上記4浄水場のほか、17配水池、34ポンプ場が約5,000kmに及び送配水管網によって連絡され点在している。この給水系統は、100mに近い高低差を持つほど起伏に富んでいるため、給水区域の約70%以上がポンプ加圧給水区域である。このような地形上に90年の歴史的所産として建設された各種の施設が複雑に絡み合っており、これらの施設の管理運営を、水道施設全体との有機的なつながりのなかで適切に行なうことは極めて難しく、従来の経験による水運用が困難になりつつある。

そこで多様化した流水の体系と複雑な諸施設を安全、かつ円滑に管理運営する方法を種々検討した結果、全市を21のブロックに区分し、全水道施設を論理的に体系づけ取水場~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ることによって解決を図ることとした。

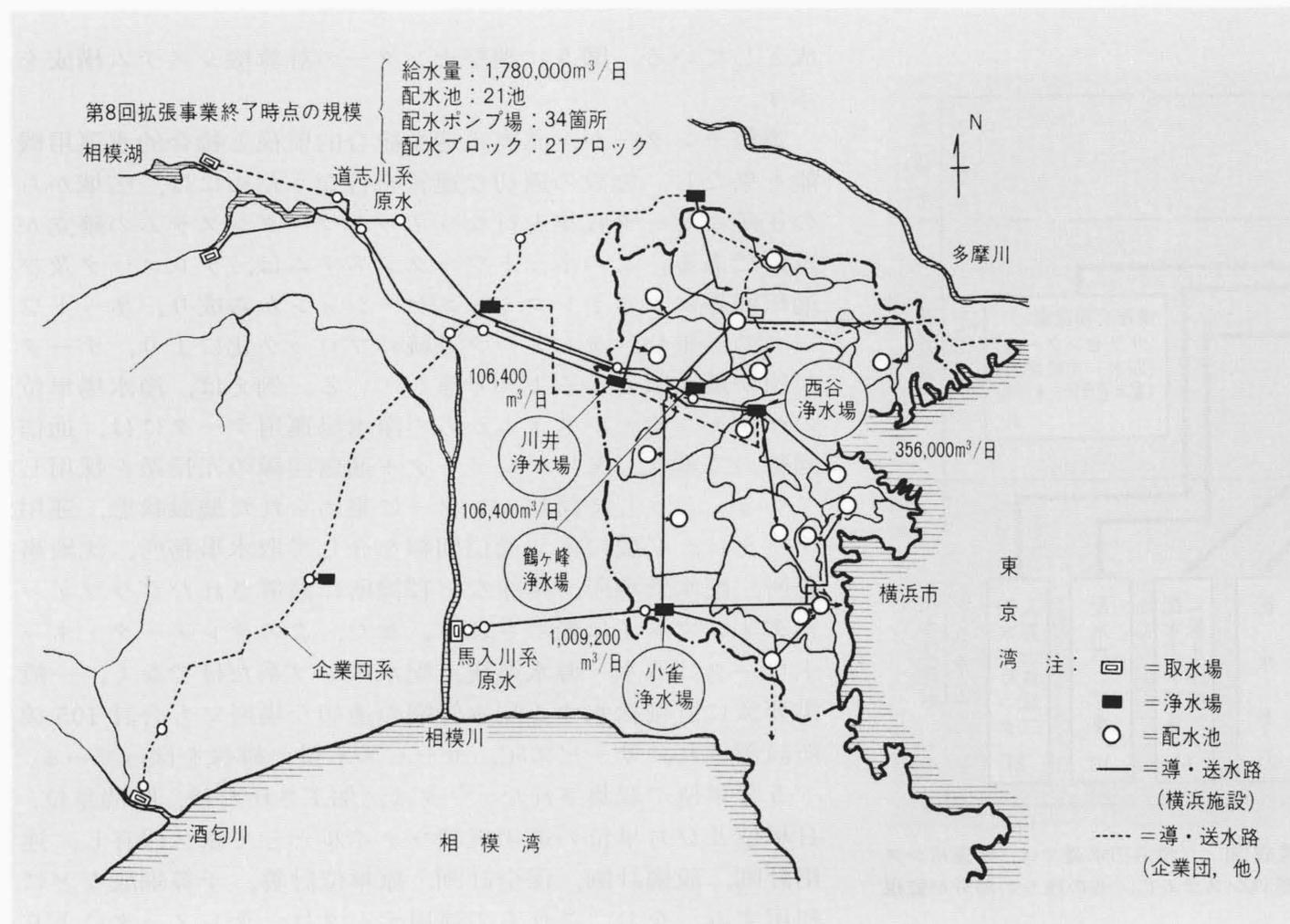


図3 横浜市水道の全体水系図 道志川、相模湖、及び馬入川より導入する。

3.2 総合管理システムのハード構成

横浜市水道の総合管理システムの設立目的は、「施設の適切な運営による安定給水」であり、これを実現するための基本的な機能・ニーズは、

- (1) 効率的な水使用
- (2) 水圧の均等化
- (3) 水質管理
- (4) 経済的取水
- (5) 水運用上のフェール・セーフ

であり、これらの機能・ニーズを満足させるためには、次に示すような業務を行なうことが必要である。

- (a) 監視盤、操作卓、カラーディスプレイ装置、タイプライタ及びラインプリンタによる迅速、かつ確実な総合的監視機能
- (b) 安定した水の供給を図るための総合的な水運用計画の決定及び情報送出
- (c) 運転実績の収集とファイリング機能
- (d) 情報交換設備による情報サービス機能
- (e) バッチオフラインによる各種技術計算機能

これら業務を遂行するために、この総合管理システムではシステム構成を図4に示すように3階層化して構築している。すなわち、(1)水そのものを浄化、輸送するための取水場、浄水場、配水池、ポンプ場及びこれらを結ぶ導送配水管路などから成る施設システム、(2)施設からのデータを収集し、遠隔制御するためのテレコン(遠隔制御装置)、テレメータシステムと計算機システムを中心とする各種の計装及び自動化装置などのハードウェアシステム、最後に(3)各種の情報を収集、解析し、総合的運用監視をベースとした水運用システムである。

また、総合管理システムのセンターである調整センターの計算機は、上記の業務処理を高信頼、高能率に実行するために、従来より各種産業分野で実績のある大規模制御用計算機HIDIC 700を2台使用し、ロードシェアデュプレックス構

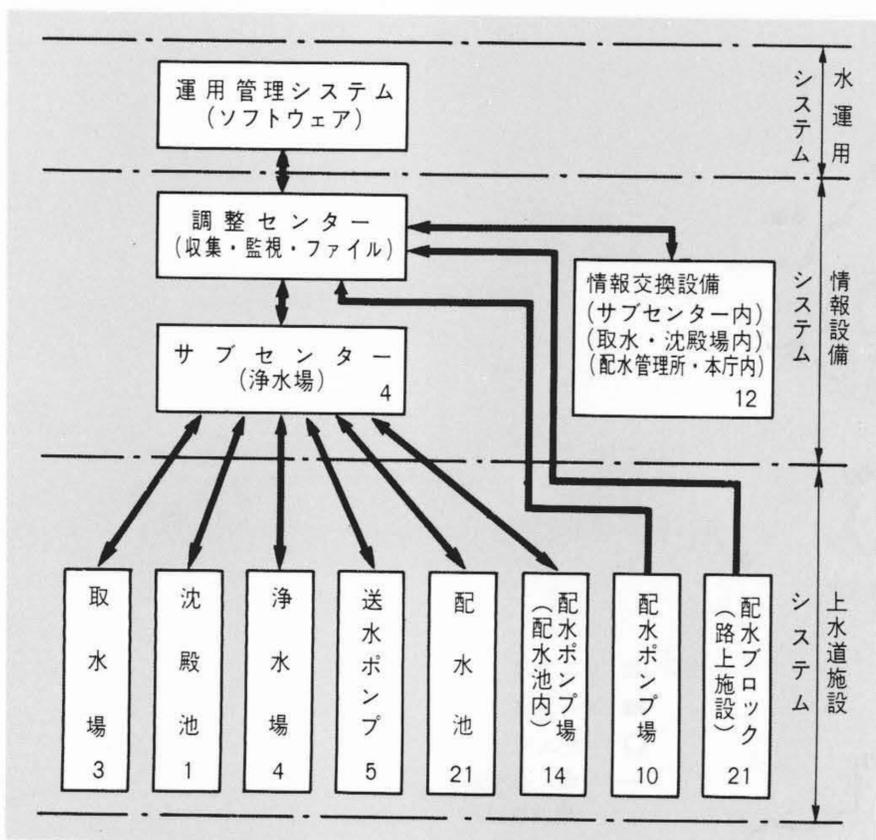
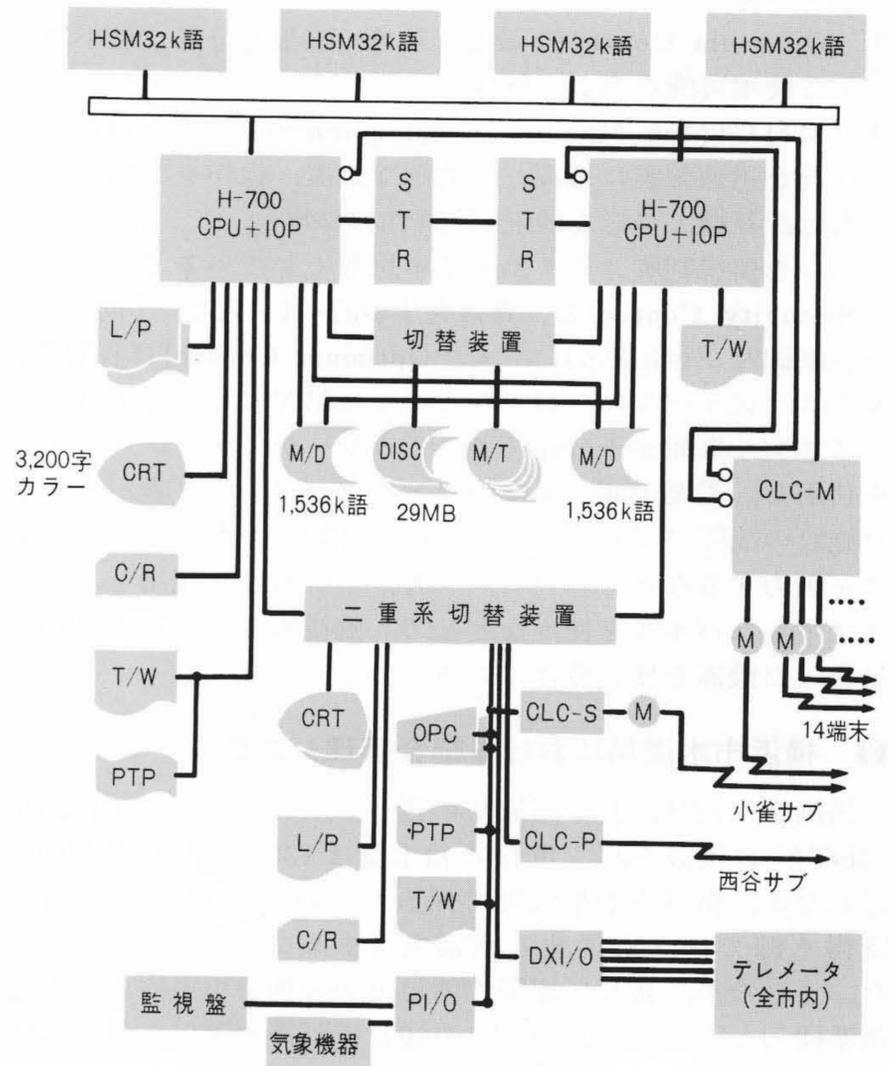


図4 上水道総合管理システム構成図 横浜市水道では、水運用システム、情報設備システムの一部が運用管理システムに、他の残りの部分が監視制御システムに相当する。



- | | |
|-------------------|-------------------|
| 注：HSM=コア・メモリ | M/D=磁気ディスク |
| H-700=HIDIC 700 | OPC=オペレーターズ・コンソール |
| STR=ステータス・レジスタ | PI/O=プロセス入出力装置 |
| CPU=中央処理装置 | M/T=磁気テープ |
| IOP=入出力制御装置 | CLC-M=多重通信制御装置 |
| L/P=ライン・プリンタ | M=モデム |
| CRT=グラフィック・ディスプレイ | CLC-P=通信制御装置 |
| C/R=カード・リーダー | DXI/O=データ交換入出力装置 |
| T/W=タイプライタ | CLC/S=通信制御装置 |
| PTP=紙テープせん孔機 | |

図5 調整センター計算機システム構成図 大規模制御用計算機によるデュプレックス構成

成としている。図5に調整センターの計算機システム構成を示す。

調整センターが、确实迅速な総合的監視と総合的水運用機能を果たし、施設の適切な運営を行なうためには、広域からの正確なデータ収集を行なうネットワークシステムの確立が重要である。このネットワークシステムは、テレメータ及び通信回線によるテレコミュニケーションから成り、ネットワークの二重化、テレメータシステムのブロック化により、データ欠損が最小限となるよう考慮している。例えば、浄水場単位のサブセンターシステムからの浄水場運用データには、通信回線の二重化、又はテレメータ+通信回線の冗長系を採用している。こうして調整センターに集められた施設状態、運用データは、必要に応じ通信回線を介して取水事務所、沈殿事務所、配水管理所、本庁などに設置されたグラフィックディスプレイに表示される。また、このテレメータ・ネットワークは取水・導水系統、配水ポンプ系だけでなく、一般需要家に直接給水する配水管網の適切な場所にも合計105箇所設置され、サービス圧、サービス水量の確保を図っている。

5分単位で収集されたデータは、加工された後、時間単位、日単位及び月単位の運用実績ファイルとして永久保存し、運用計画、設備計画、保全計画、原単位計算、予算編成などに利用する。なお、これらの運用データは、テレメータにより

サブセンター及び調整センター両方に入力し、重要情報は二重監視するなどしてデータの信頼性・安全性の確保には十分考慮している。更に、テレメータ系統そのものの異常についても、各回線ごとに監視し、適切な運用に支障なきよう考えている。

3.3 総合管理システムの主要ソフトウェア

横浜市の上水道を対象として、各種モデル^{3),4)}を開発したが、ここでは、翌日運用計画モデルと配水コントロールについて紹介する。

(1) 翌日運用計画モデル

翌日運用計画モデルは、翌日の需要予測に基づき、取水口から配水池までの水系における原水及び浄水の配分計画を立てることを目的としており、実際の運用は、計画値が当日の実績送水量、給水量と異なった場合は、オンラインで修正し、これに基づき取水、導水及び送水を実施するものである。

なお、翌日運用計画モデルは、予測モデルと配分計画モデルにより構成されるが、予測モデルについては、本誌13ページで紹介の「上水道システム運用技法」で述べた手法と同様であるので、以下では配分モデルについてだけにとどめ述べる。

横浜全市の浄水場及び配水池を五つに分割し(分割単位をゾーンと呼ぶ)、モデルを空間的、時間的スケールの差異により三つのサブモデルに分け、その階層的結合により構成した。それらは、(a)取水計画、相模原沈殿池運用計画モデル、(b)ゾーン間配分モデル、(c)ゾーン内配分モデルである。各サブモデルと予測モデル及び実系統との関連を図6に示す。

(a) 取水計画、相模原沈殿池運用計画モデル

全市の日単位需要量に基づき、相模原沈殿池の週単位の運用(ウィークデーにその貯水を利用し、土曜、日曜に回復)を図り、企業団との月間契約受水量を満足するように、

翌日の取水計画を立てるモデルである。

(b) ゾーン間配分モデル

取水及び浄水場の運転変更回数の減少という観点から、1日を需要の多い昼間と需要の少ない夜間とに分け、昼間及び夜間の取水量、ゾーン間配分量(原水配分量と異なる浄水場からの送水系統間での融通量)を決定するモデルである。

ゾーンにより構成されるネットワークを図7に示す。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(流入点)、需要点をシンク(流出点)とするネットワークの最小コストフロー問題となる。この最適配分問題では、各輸送路における流量制限の下で、薬品注入費、輸送費の和が最小となるような流量解を求めるため、グラフ理論によるネットワーク流の解析手法を採用した。この方法は、ネットワークの最小費用径路問題と最大フロー問題を交互に繰り返し解くことにより、最小費用フローを求める手法^{5),6)}である。

(c) ゾーン内配分モデル

このモデルは、配水池ごとの需要予測に基づき、浄水場から配水池までの浄水配分計画を立てるモデルである。モデルの目的あるいは制約を次のように設定した。

- (i) 配水池の水位、送水管路からの需要分岐点の圧力は許容範囲内に収める。
- (ii) 流量制御機器の切換操作回数を減少させる。
- (iii) 配水池は、基準の水位(通常満水)でスタートし、需要量の変化に応じてその貯水を有効に活用し、基準水位に復帰させること。

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、水系の持つ流量と圧力の非線形関係を、下流側からの水量の積み上げ計算により直接扱える方式とした。

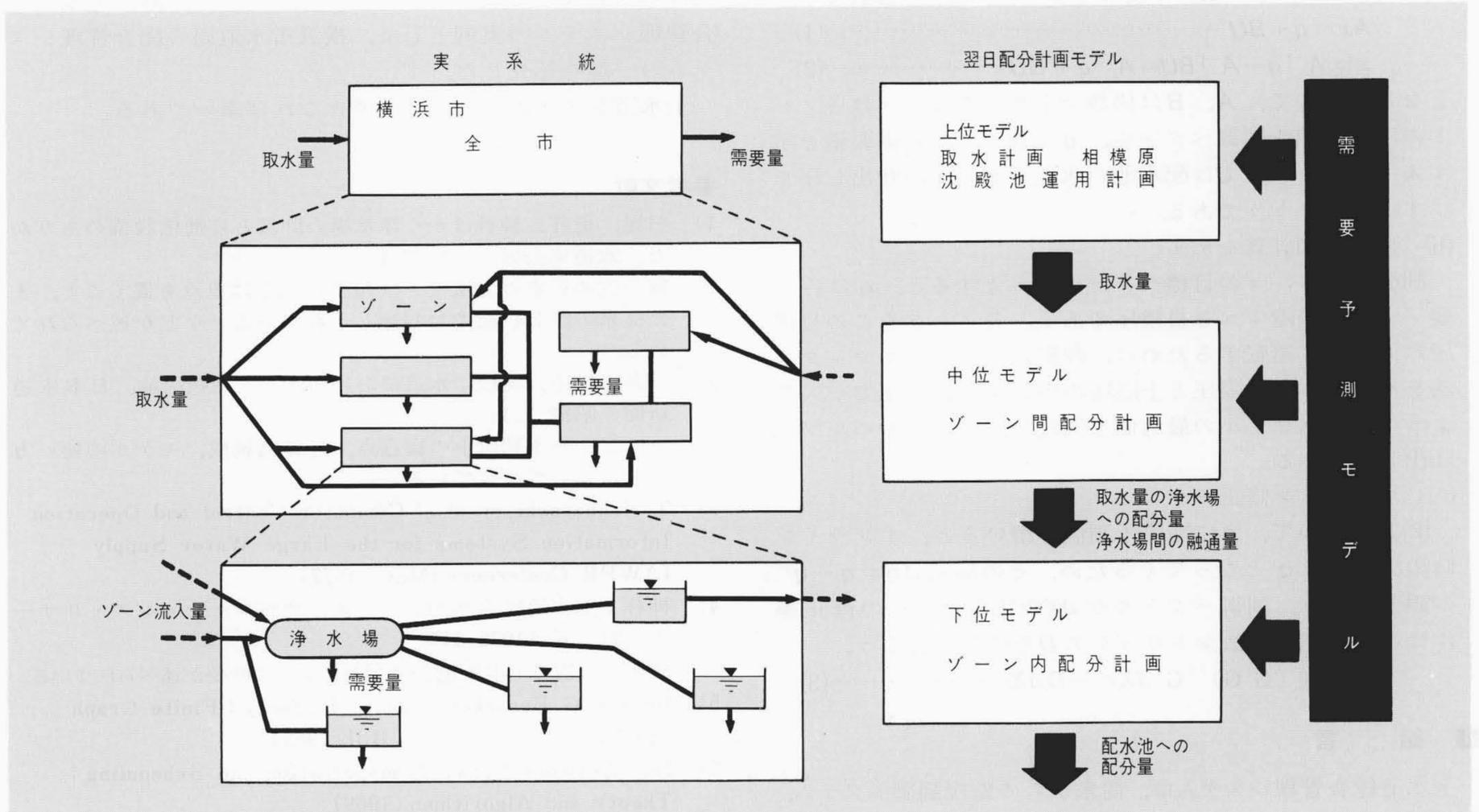


図6 横浜市水道の実系統とそのモデル 翌日配分計画モデル自身、ハイアラーキ構成となっている。

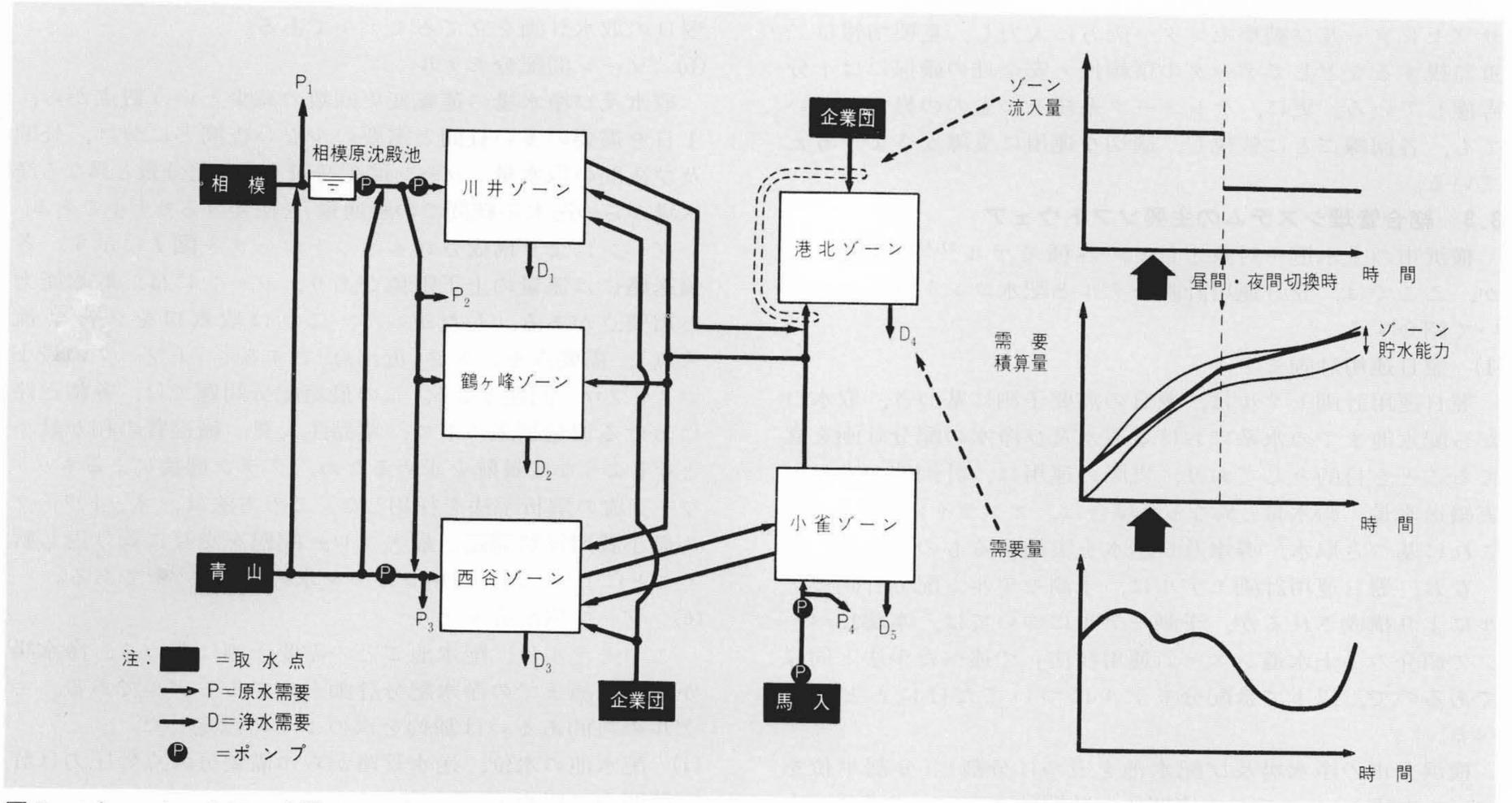


図7 ゾーンネットワーク図 各ゾーンの中で、薬品注入費及び輸送費が最小となるように流量解を求める。

(2) 配水コントロール

配水管路網をサービス圧近傍で運転するためのサブシステムで、次のモデルから成る。

(a) 管網計算モデル

管路網内の圧力と流量の関係式としてヘーゼン・ウィリアムスの式を用い、この式に管路のアドミッタンス Y_{ij} を用いて $Q_{ij} = Y_{ij}(H_i - H_j)$ と変形すると、管網方程式は、

$$Ax = q + BU \dots\dots\dots(1)$$

$$x = A^{-1}q + A^{-1}BU = A^{-1}q + GU \dots\dots\dots(2)$$

となる。ここで、 A 、 B は係数マトリックス、 x は各ノードの圧力を示す制御ベクトル、 q は各ノードの需要量を示す入力ベクトル、 U は配水池の水位とポンプの吐出し圧を示す操作ベクトルである。

(b) 最適管網計算モデル

制御ベクトル x の目標ベクトルを x_0 とすると、 x_0 は各需要ノードで保障すべき目標圧である。各ノードをこの目標圧に近づけて運転するために、線形計画法にミニマックス法を組み込み、下限圧と上限圧の中にすべての圧力が入るように操作ベクトルの最適値を決定し、ポンプやバルブの吐出し圧とする。

(c) オンライン修正モデル

(2)式において、 q に需要予測値を用いると、オンライン時の実需要は q' となってくるため、その偏差 $\Delta q = q - q'$ が誤差となり、制御ベクトルが ΔX 変化する。その修正操作は次式の感度係数マトリックス D を用いて行なう。

$$\Delta U = -(G^t G)^{-1} G^t \Delta X = -D \Delta X \dots\dots\dots(3)$$

4 結 言

上水道総合管理システムは、従来からの監視制御システム、経営管理システムに加えて、今後は運用管理システムがますます必要となってくる。このシステムは、上水系全体の監視

制御を行なう計算機と、上手に水運用を行なうための水運用アプリケーション・ソフトがあって初めて効果が発揮できるものである。これらについて概要を述べた。

なお、この総合管理システムは、上水系の運用及び監視制御の融合された大規模システムであるので、その実現には高度のシステム技術と関連機関の緊密な協力が必要であり、今後は順次普及していくものと思われる。このため、上水道総合管理システムの実例として、横浜市水道局の総合管理システムの一端を紹介した。

上水道システムの計画に参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 村尾、亀井、神林ほか：浄水場の計装と自動化設備のありかた、水道協会雑誌(昭52-1)
安全性の追求と生産性・信頼性の向上に重点を置くこと、また従来の計装技術では対処しきれないことなどが述べられている。
- 2) 船井、田中、関根：水道におけるポンプ系技術論、日本水道新聞(昭52.1.1)
コンピュータ利用上の留意点、計算機構成、モデルの使い方などについて述べている。
- 3) T. Kanbayashi, et al. : Computer Control and Operation Information Systems for the Large Water Supply IAWPR Conference (May, 1977)
- 4) 神林：上水道総合運用システム、オペレーションズ・リサーチ、21-6 (1976.6)
横浜市水道の上水道総合運用システムの概要が述べられている。
- 5) Robert G. Busacker, Thomas L. Saaty : Finite Graph and Networks, McGraw-Hill (1965)
- 6) Iri : Network Flow, Transportation and Scheduling : Theory and Algorithms (1969)
- 7) 平沢、浜田、端山ほか：上水道配水管網の圧力最適化法とオンライン圧力制御、全国水道研究発表会講演集 (1976)