

上下水道における設備・運用計画技法

Novel Planning Methods for Realizing Efficient Facilities, Operation and Maintenance in Water and Wastewater Systems

上下水道システムの目的の一つは、水の流れを管路、開水路、池、ポンプ、バルブなどの設備により運用制御することである。このためには、各種の設備が適切に計画、設計されていなくてはならない。これらの要求にこたえるものとして、上水道の管路網での設備及び運用計画のための技法“NEFLAN”と、下水道や河川などの開水路での水の流下や揚水などのための設備運用計画技法“WELCOM”を開発している。これら技法は、設備代替案に関して運用計画を立て、それをシミュレートし、その中から最適な設備案を選ぶことを可能とするため、多くの都市の上下水道の省資源、省エネルギー計画に適用されている。一部の技法は、日立制御用コンピュータHIDIC 80に組み込まれ、オンライン制御にも利用されている。

大成幹彦* Mikihiko Ōnari
松本邦顕** Kuniaki Matsumoto
塩谷 真** Makoto Shioga

1 緒 言

上下水道の主要な機能は、水源から需要家までに水を送り、需要家で排出された汚水を下水処理場まで送ることである。水の輸送は、管路や開水路を輸送路とし、そこを流れる流量や圧力を、自然流下や、ポンプやバルブを用いて制御するのが一般である。

上下水道施設は、都市の発展や人口の増加に伴って、各都市で段階的に拡張され、整備されつつあるが、その過程で、各施設や管路を需要に見合うように計画し、施設導入後は適切に運用してゆく必要がある。このような設備や運用を計画するには、あらかじめ、上下水道の管路や諸施設をモデル化しておき、これらを用いて将来の水の需給動向の下で、施設の過不足が生じないかどうかを予測評価しておく必要がある。このための設備計画及び運用計画の技法を、管路網内の水を扱う技法と開水路を流れる水を扱う技法とに分けて、体系的に整備している。これらの技法を利用することにより、上下水道施設は、従来よりも合理的に計画したり、経済的に運転することが可能となる。

2 上下水道の設備運用計画技法

上水道での近年の課題は、有限量の水を広域にわたる需要家にむだなく経済的に供給することである。これは利用可能な水源のうちから、良質な水を多く確保するように取水することと、取水した水が広域に分布する需要家に対し、輸送費用と水の浄化に要する費用が最小となるように配ることを意味する。更に、最近では省資源、省エネルギーの要請から配水管路網での圧力を許容範囲内に抑えて漏水量を減少させる制御技法の開発が望まれている。

上水道施設は、都市の規模が大きい場合、取水源、浄水場、配水池などを複数にもち、水の輸送管路は複雑な構成になっている場合が多い。このため、管路網上での流量や圧力の過不足が生じないように管路網での流量や圧力の最適制御や、それを可能とする設備を計画する必要がある。これらの要請にこたえるものとして、管路網内の流体の挙動を解析し、最適な構成や制御方式を選択することのできる計画技法を、流体ネットワークの最適構成制御技法“NEFLAN” (Network

Flow Analysis and Planning Method) と命名し、体系化している。

水の輸送は、管路のほか、河川や放水路のように開水路を用いて行なう場合が多い。開水路での流量の制御は、自然流下の場合、堰や池により水路を堰止めて貯水し、必要に応じてゲートを開閉し、放流量を変更することにより行なわれる。この場合の課題は、河川洪水時や下水道の汚染濃度、流量が増大した場合などに応ずる制御方式を決定することである。下水道の洪水排水や上水の高所送水など、揚水の場合にはポンプが用いられるが、このときの課題は、与えられた条件のもとで、どのような機種のポンプを何台設置し、どのように運転するのがよいかを決めることである。開水路を用いる水の輸送は、自然流下と揚水とを合わせると、水資源の標高を変更することであると考えられるので、これらに関する技法を水資源標高管理制御技法“WELCOM” (Water Elevation Control Method) と命名し、体系化を図っている。

以下では、“NEFLAN”と“WELCOM”の両技法の上下水道への適用を中心に詳述するが、両技法には表1に示すように、他の分野でも利用可能なものも含めてある。

3 流体ネットワークの最適構成制御技法“NEFLAN”

3.1 管路網解析技法(新管網計算)“NEFLAN-A”^{1,2)}

上水道で、管路やバルブなどの設備を計画したり、供給制御の計画を行なうには、管路網(ネットワーク)の定常流解析が必要になる。通常、これを管網計算と呼んでいる。

管路網での定常流は、節点での流量収支式と閉路での圧力平衡式を満足している。水道の管路のように、流量と圧力の間に非線形の関係がある場合、流量及び圧力を記述する式は、非線形の連立方程式になる。これを解くための方法として、線形連立方程式を繰り返して解くHardy Cross法やMarlow法³⁾があるが、計算時間とメモリ容量を多く必要とし、満足できるものとは言えなかった。そこで新手法として、非線形連立方程式を直接解く必要のない方法を開発した。この方法は、流量収支式と圧力平衡式とを満足する流れが、ある種の最適

* 日立製作所システム開発研究所 工学博士 ** 日立製作所システム開発研究所

表1 上下水道設備運用計画技法 上水道管路網での設備及び運用計画のための技法“NEFLAN”と、下水道や河川などの開水路での設備運用計画技法“WELCOM”とに体系化されている。

技 法 名 称		目 的	内 容
流体ネットワークの最適構成制御技法“NEFLAN” (Network Flow Analysis and Planning Method)	Aqua	管路網解析(新管網計算)	○ 消費エネルギー最小化による平衡点計算法
	Blowing	ダクト系解析	○ 空調ダクト系の構成計画のための定常流解析
	Control	管路網制御(配水制御)	○ 管路網圧力分布の均一化計算法
	Dynamic	最適配分計画	○ 複数池貯留量の最適時間変化計算法
水資源標高管理制御技法“WELCOM” (Water Elevation Control Method)	Pump	流体送出系(ポンプ・ブロウ)の構成・運用計画	○ 組合せ数・評価対象数の早期減少による準最適化法
	QRS (Quasi-optimum Routing System)	ポンプの運転制御	○ ヒューリスティックな最長ルート探索法
	River	河川(ダム・堰・農業用水)制御	○ カルマンフィルタによる貯留量制御法 ○ 多段ダムの総合管理法
	Sewer	流域下水道(排水路)流量制御	○ 管内貯留を利用した希釈制御法 ○ 制御のための検出端設置法
	Trend	流入量(河川・下水)予測	○ 相関適応修正法(河川) ○ 重回帰分析手法(下水)

化問題の解になるという事実に基づいている。この最適化問題は、流量収支式を制約条件として、枝(管路)の消費エネルギーの和を最小とするような流れを求める問題である。管路網の消費エネルギー E を次式で定義する。

$$E(x) = \sum_j \int_0^{x_j} f_j(x_j) dx_j \dots\dots\dots(1)$$

$$f_j(x_j) = R_j |x_j|^{1.85} \text{sgn}(x_j) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 x_j 、 $f_j(x_j)$ 、 R_j はそれぞれ管路 j の流量、損失圧力及び抵抗であり、 $\text{sgn}(x_j)$ は x_j の符号を表わすものとする。流量収支式の制約下で、消費エネルギー $E(x)$ を最小化することにより、定常流解が得られる。最小化計算には、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。この解法は、線形問題しか扱えぬため、非線形である費用関数(消費エネルギー)を区間線形近似し、この手法の適用を可能とした。“NEFLAN-A”と従来法との原理比較を図1に示す。以上述べた方法の採用により、メモリ容量に制約のある制御用計算機(HIDIC 80など)でも本技法を組み込み、実用化することができるようになった。“NEFLAN-A”は、既に数都市のポンプ容量決定やバルブ設置位置決定に適用し

ている。これらの適用結果から、本技法は、計算時間と必要メモリが、従来法の $\frac{1}{2}$ 程度に減少することが判明した。計算結果の一例として、図2に示す管路網での圧力分布の一部を図3に示す。

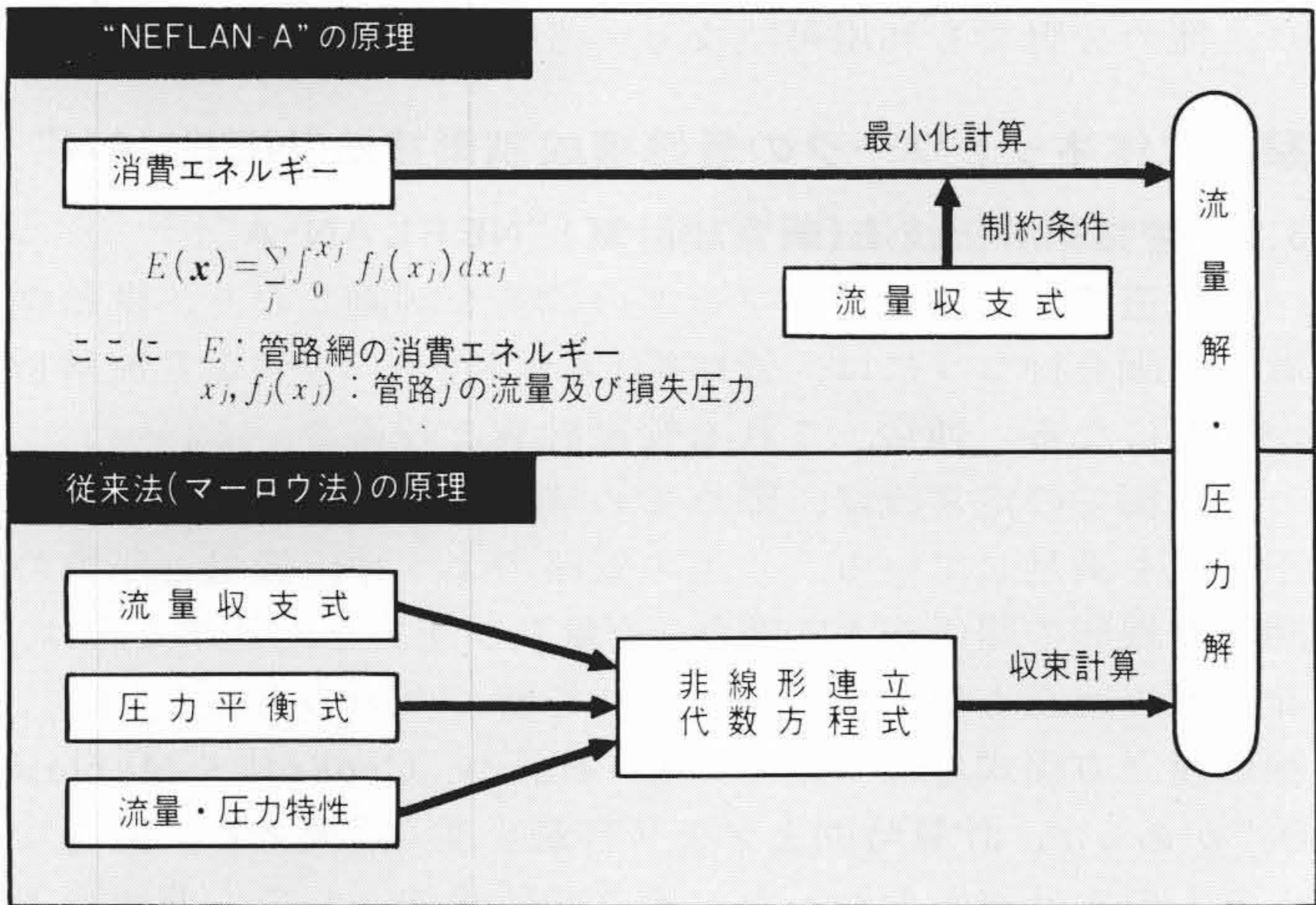
3.2 管路網制御技法(配水制御技法)“NEFLAN-C”

管路網内に設けられたポンプやバルブを操作し、管路網内の流量と圧力を適正に制御することにより、(1) サービス圧を確保(圧力不足の防止)し、(2) 漏水を低減(圧力過剰の防止)することが望まれており、これを配水制御と呼ぶ。管路網内の水の流れは、流量収支式と圧力平衡式とで表わすことができる。

配水制御は、両式の制約下で次の目的関数 J を最小にするポンプやバルブの最適制御量 u^0 を求め、ポンプやバルブを操作することになる。

$$J = \|p - p^*\|^2 \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 p ：ノード圧力、 p^* ：ノード圧力目標値である。最適化技法としては、最大こう配法を利用している。最大こう配法は、まず、現状の制御量 u^i と予測需要量 y に基づき、“NEFLAN-A”により、管路流量 x^i 、圧力 p^i の計算を行なう。



注：略語説明 “NEFLAN-A”(Network Flow Analysis and Planning Method-A)

図1 管路網解析技法“NEFLAN-A”と従来法との比較 新管網計算“NEFLAN-A”は、管路の消費エネルギーの和が最小となる流れを求める計算法である。

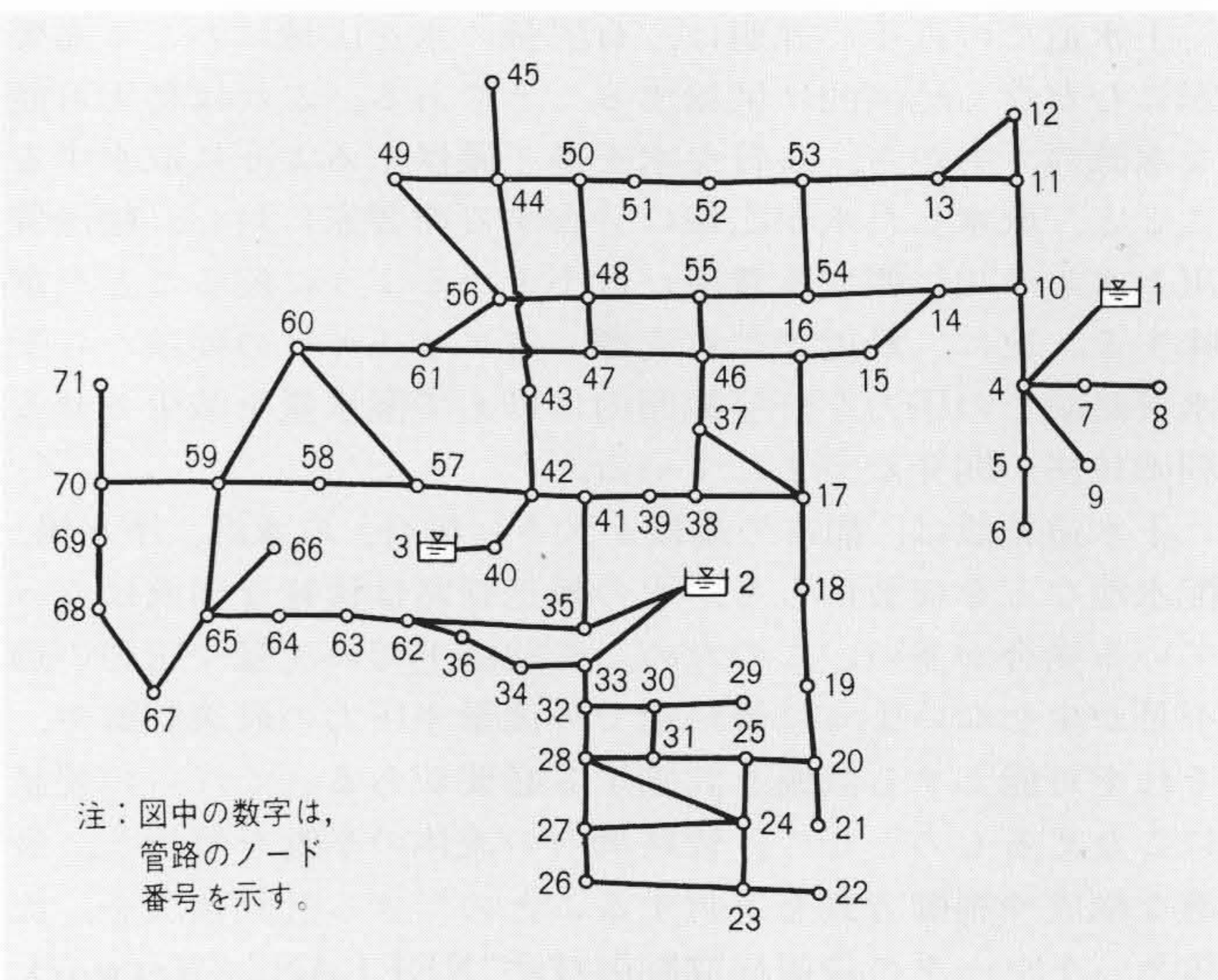


図2 配水管路網図の一例 管路は網のように複雑に接続されている。

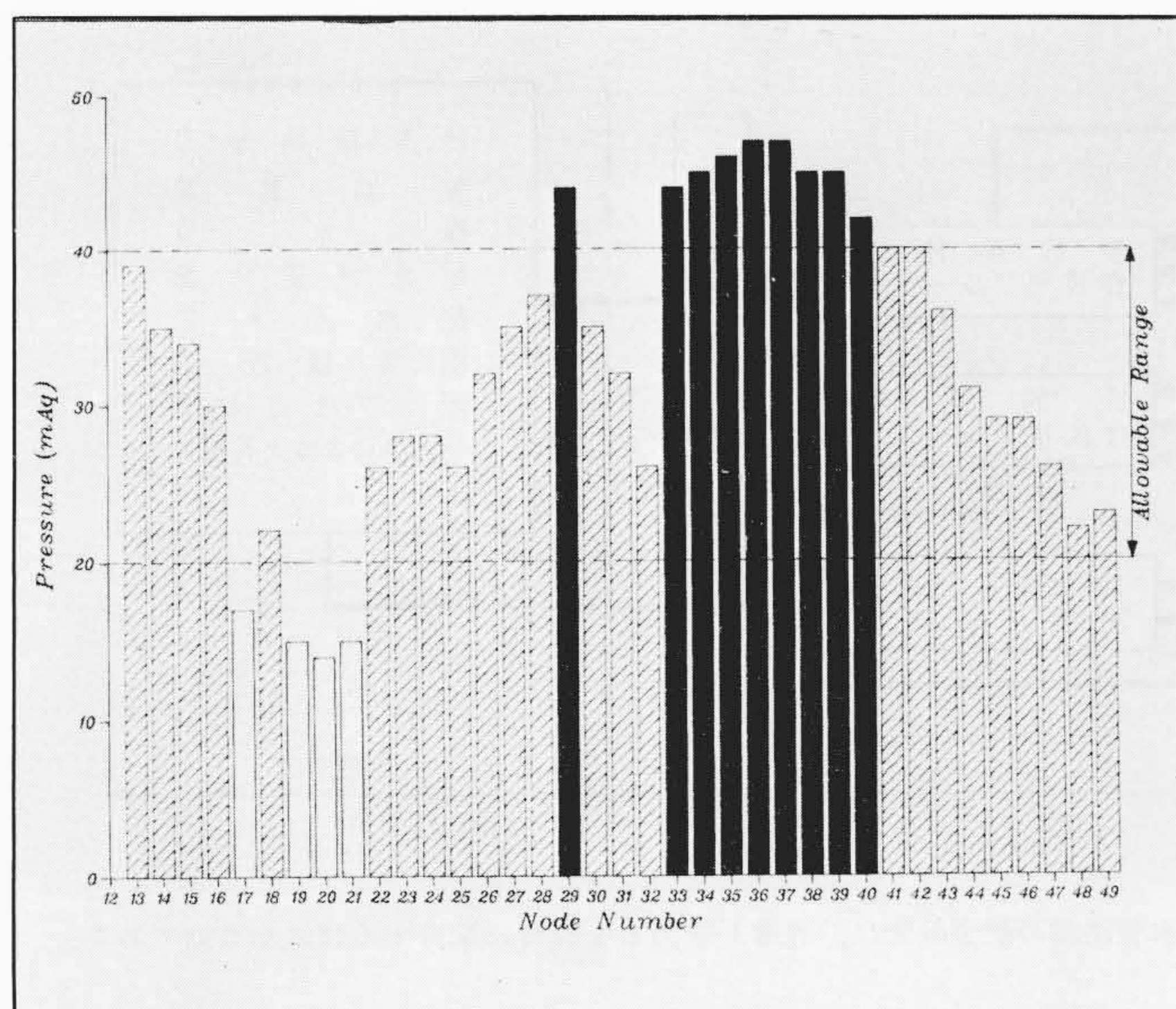


図3 “NEFLAN-A”による各ノードの圧力計算値 図2の管路網についてのシミュレーションの結果、圧力の過不足が評価できる。

求めた x^i 、 p^i に基づき、 u^i の修正量 Δu^i を、目的関数 J の改善度合が最大になるように決定する。すなわち、次式により修正量を求める。

$$\Delta u^i = -(G^T G)^{-1} G^T (p^i - p^*) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 G は管路網の接続関係を表わす行列、 G^T は G の転置行列である。修正された u^{i+1} について、“NEFLAN-A”を用い再度、管路網シミュレーションを実施し、次のステップの x^{i+1} 、 p^{i+1} を求める。このような繰り返しを、 x 、 p が一定値に収束するまで行なうと、最適制御量を求めることができる(図4)。

3.3 最適配分計画技法“NEFLAN-D”

都市上水道は、浄水場、配水池、需要端、ポンプ場などが導・送水管路で相互に結合され、大規模かつ複雑なネットワークを構成している。ネットワークに対しどのように水を流せばよいかを知るための配分計算の目的は、

- (1) 給水需要を満たすこと、
 - (2) 複数水源水を有効に利用すること、
 - (3) 需要家へのサービス水压を保ち、同時に漏水を減少すること、
 - (4) 運用コストを最小にすること、
- である。

配分計算法として、汎用性の高い流量・圧力同時配分計画方式を開発している^{4),5)}。この最適配分計画技法は、流量収支式、圧力平衡式及び損失水頭式を制約条件式とし、取水と輸送のコストを目的関数として、最適化計算を適用して目的関数を最小とする管路流量、圧力及び池水位を求めるものである。

最適化手法としては、線形計画法での感度解析手法を用いて、24時間の配分計算を高速で解くように工夫している。本技法のプログラム構成を図5に示す。

上水道は、施設の増設や事故時などで、ネットワークそのものが変化する。このため、本プログラムでは、制約条件式を構成する変数を入力するだけでよく、あとは、プログラム的に変数を従属変数と独立変数とに分類し、線形計画法の制約行列式を作成するようにしてある。

本技法は、大都市の幹線ネットワークを対象に、平常時、事故時、取水量制限時などの運用計画と、幹線及びポンプ所の容量を決定する設備計画に適用した。

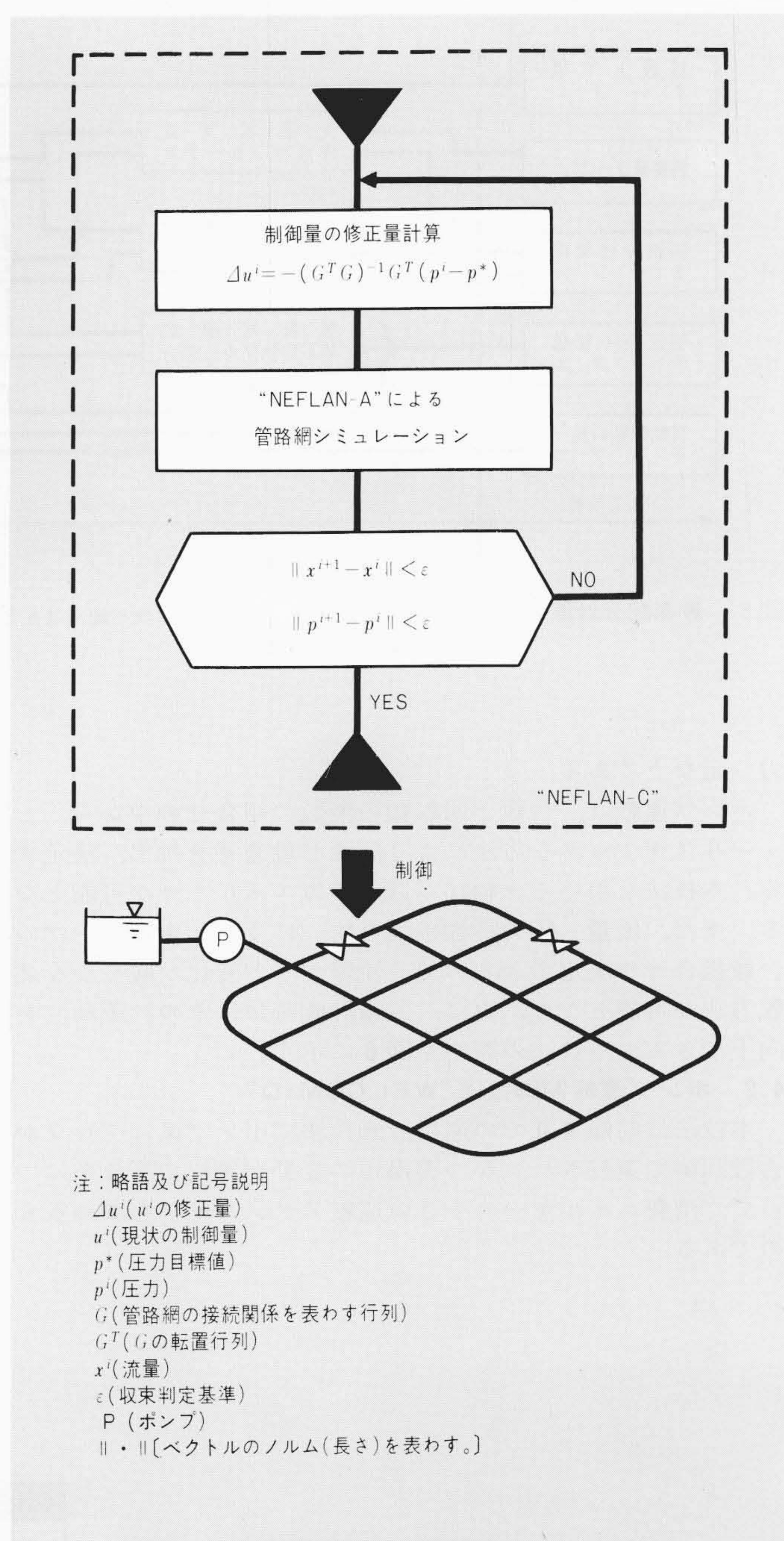


図4 管路網制御技法“NEFLAN-C” 配水制御技法“NEFLAN-C”により、管路網の流量と圧力の適正化が図れる。

4 水資源標高管理制御技法“WELCOM”

4.1 流体送出系(ポンプ・ブロワ)の構成・運用計画技法“WELCOM-P”

本技法は、回転速度、翼角度、弁開度などが可変なポンプ(又はブロワ、以下略す。)を含む複数台ポンプの最適構成・運用計画を立案するものである。最も消費エネルギーが少ない運転にするには、どれぐらいの容量でどの形式のポンプを何台設置し、また、どれぐらいの回転速度で何台何時に起動し、何時に停止すればよいかを決める。ポンプの制御方式によっては、回転速度の代わりに、最適な翼角度や吐出し弁開度を決定する。ブロワの場合には、最適な台数、吸入弁開度、吸入ペーン角度、放風弁開度などを決めることになる。適用できる運転指標は、吐出し圧一定、水位一定、流量一定、軸動

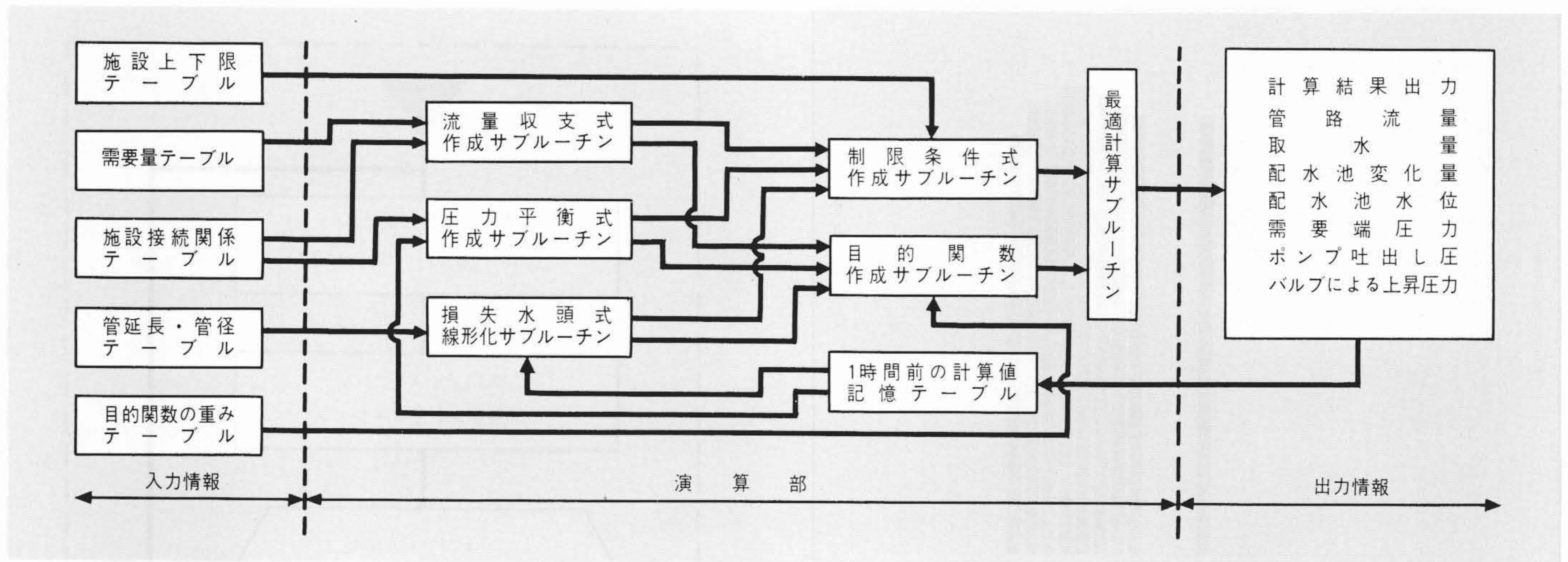


図5 最適配分計画技法「NEFLAN-D」 複数の浄水場や配水池を含む送水管路網の配分計画は、流量と圧力とを同時に配分する技法が有効である。

力一定などである。

ポンプ運転は、台数と回転数の無数の組合せの中から、ヒューリスティックな方法により評価し最適案を抽出、決定する。本技法を用いると約10%以上の省エネルギーが可能となる。また、流量-圧力特性平面を均一にカバーするポンプの台数組合せを決定できるので、流量や圧力変化が緩やかな運転方法が可能となる。更に、設備計画時にはその計画精度を向上できる。本技法の概略を図6に示す。

4.2 ポンプ運転制御技法「WELCOM-Q」⁶⁾

本技法は前節4.1での運用計画技法でポンプ又はブロワが台数制御で運転され、かつ実揚程の変動が無視できる系について、消費エネルギーの小さい運転スケジュールを決めるものである。

まず、負荷の予測量の時間的累積曲線と、それに池容量を加算した曲線を用意し、両曲線間を通りこの配が各台数の合計吐出し流量のどれかに等しい線分から成る折線をひく。この折線のこの配変化点が運転台数切換点に対応する。切換点の数が少ない折線を幾つか求め、それらの折線に従った運転をしたときの消費エネルギーを算出し、それが最小となる折線を選ぶ。

本技法は上記のようなヒューリスティックな方法を採用したため、人間になじみやすく、結果の修正も経験や勘を採り入れて容易に行なうことができる。本技法による計算例を図7に示す。

4.3 河川(ダム・堰・農業用水)制御技法「WELCOM-R」⁷⁾

河川制御では、洪水時、渇水時など環境変化に応じて目標

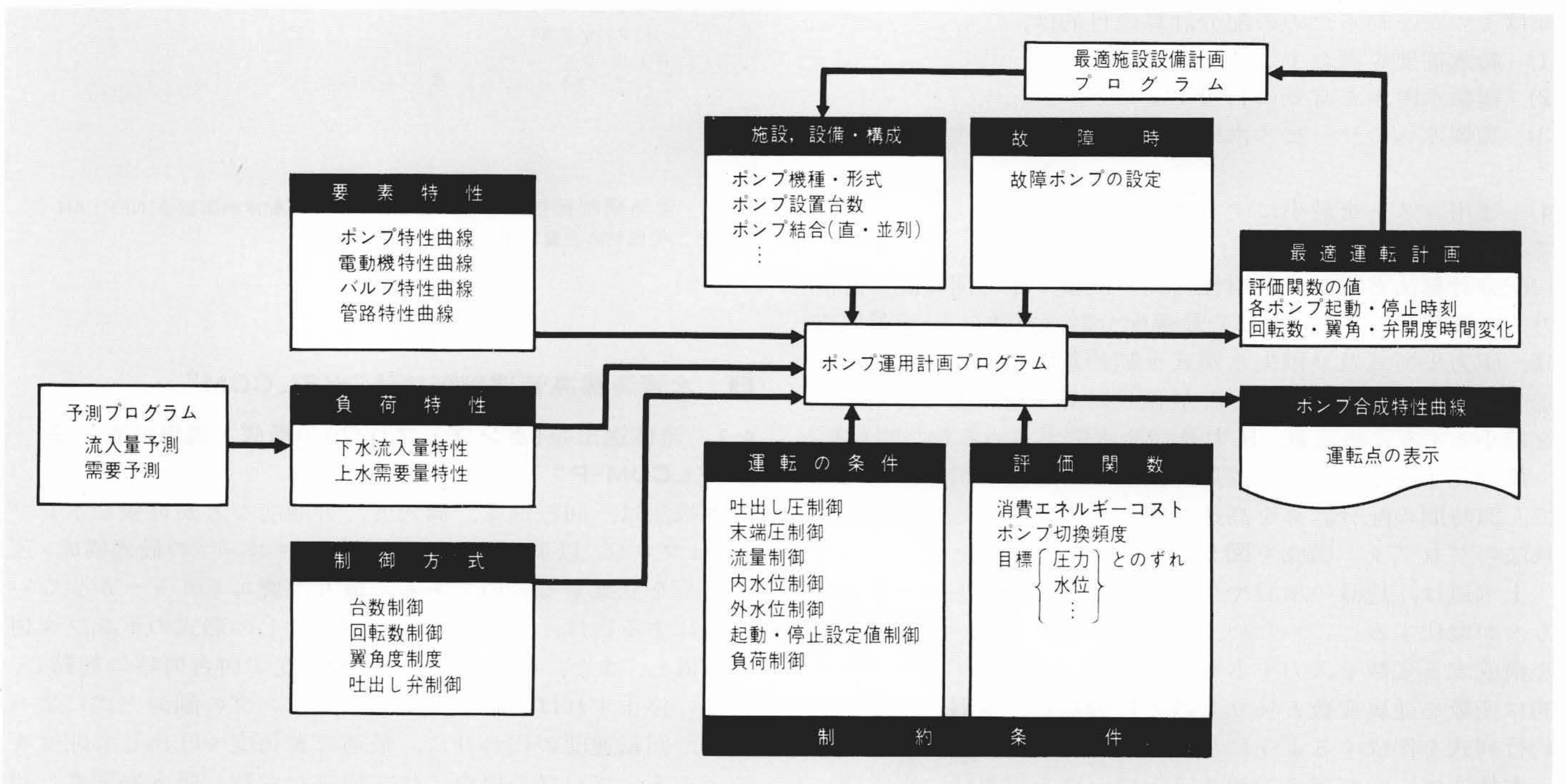


図6 流体送出系の構成・運用計画技法「WELCOM-P」(ポンプの場合) 最も消費エネルギーが少ない運転にするには、どれぐらいの容量でどの形式のポンプを何台設置し、また、どれぐらいの回転速度で何台を何時に起動し、何時に停止すればよいかを決める。

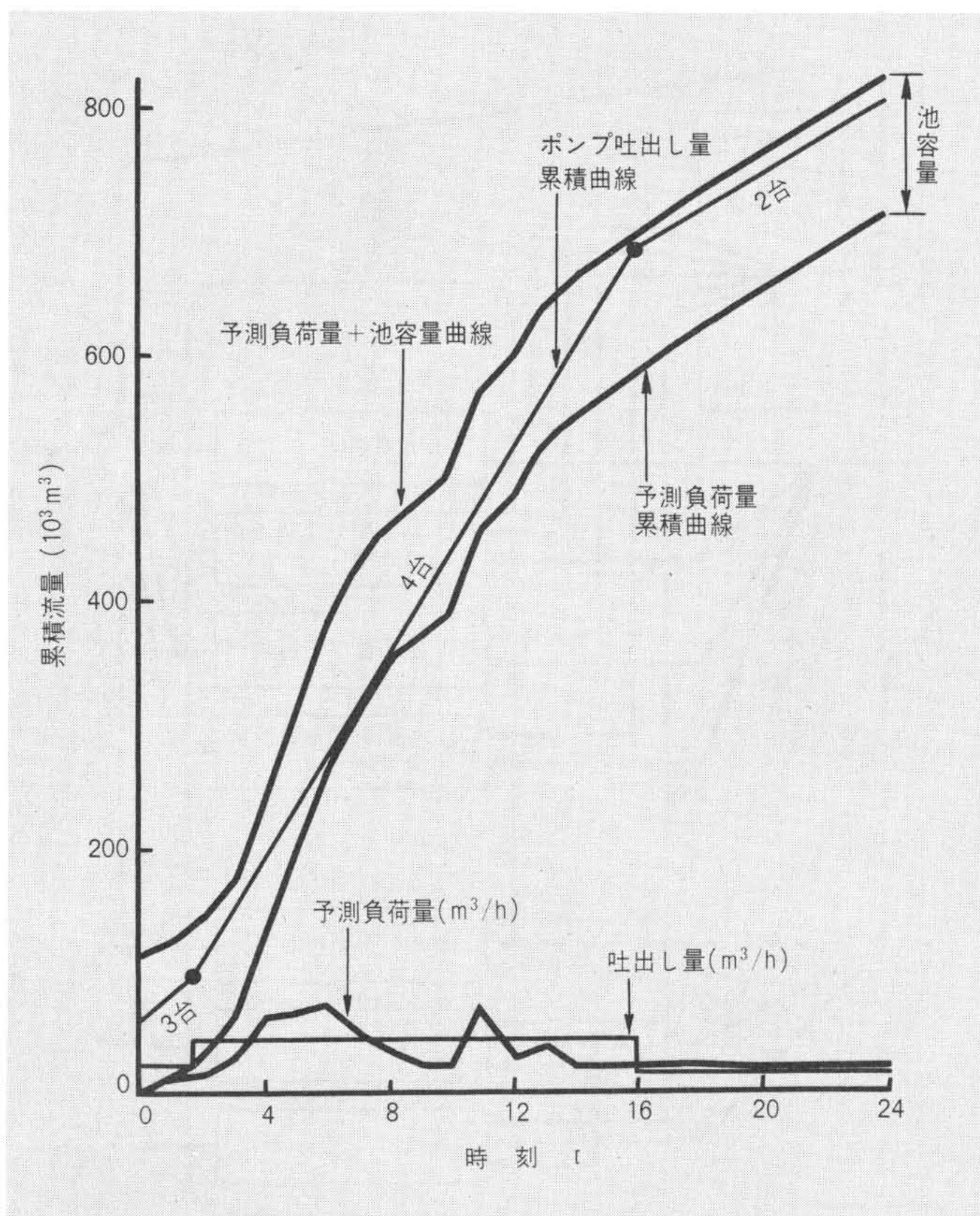


図7 ポンプ運転制御技法“WELCOM-Q”による計算例 予測負荷量の累積曲線と池容量とから作られる2本の曲線の間を通り、ポンプ吐出し量に相当するこう配をもつ折線を探し、その中から消費エネルギーが最小となるものを選び出す。

水位を切り替えるとともに、きめ細かいゲート操作が必要である。ゲート制御時に、上流側からの流入量やゲート放流量の変動に起因する水位振動が発生することがあるが、振動発生時にも制御を安定に維持することが重要な技術課題である。

振動ノイズを含む水位を観測し、貯水池貯留量を推定して制御量とすることにより、制御性能の向上を図った。貯留量の推定には、次式で示すようにカルマンフィルタを適用する。

$$\hat{h}_k = \hat{h}_{k-1} + A^{-1}(Q_{Ik-1} - Q_{Ok-1}) \Delta T + K_k [H_k - \{\hat{h}_{k-1} + A^{-1}(Q_{Ik-1} - Q_{Ok-1}) \Delta T\}] \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $\hat{h}_k$ は貯留量と等価な水位、 A は湛水面積、 Q_{Ik} はダム流入量、 Q_{Ok} はダム放流量、 ΔT は時間間隔、 K_k はカルマンゲインである。なお、流入量 Q_{Ik} は線形外挿による予測機能を付加することにより求める。

本方式は、河川特性を分布定数系モデルで記述した河川制御シミュレータ“RCSS”(River Control Simulation System)⁸⁾によって有効性を確認後、実システムに適用した(図8参照)。

4.4 流域下水道(排水路)流量制御技法“WELCOM-S”⁹⁾

現在の下水道システムは、排水区域が住居、商業及び工場地域のどれであるかにより、幹線ごとに生下水の水量、水質及びその時間変動状況が異なる。このため、終末処理場によっては常時あるいは特定の時間帯に過負荷となって処理機能が低下し、放流水質が悪化するおそれがある。これを避けるためには、幹線内又は幹線間で生下水を適切に混合し負荷(水量、水質)やその時間変動を平滑化すればよい。本技法は、この高濃度生下水の混合希釈制御に関するものである。

混合希釈制御は、高濃度生下水又はそれを希釈するための水を、ポンプ場やバイパス管などの流量制御可能な場所に貯留しておき、貯留場所で混合希釈し放流するか、あるいは適当なタイミングで放流し、下流の他幹線との合流点で希釈するという方法である。希釈を行なう場所、一時貯留する物質、バイパス管の有無により、図9に示す六通りの方法に分類できる。実際の下水道に適用するときには、各下水道の形態(管渠網の構成、排出源の分布状況、集水区の状況など)や構造(管渠の貯留容量、ポンプ所位置など)に応じ、これら各方法のうちから適用可能な方法を選択し、それらを組み合わせて、その下水道に最適な混合希釈制御方法とする。

4.5 流入量(河川、下水)予測技法“WELCOM-T”¹⁰⁾

我が国の多くの都市で採用している汚水と雨水を同じ管渠に流す合流式下水道では、降雨時に急激に流入量が増加し、溢水事故につながることもある。本技法は主として降雨時の下水流入量予測を精度高く行なうもので、ポンプの運転ガイダンスシステムに組み込み、運転操作を容易にするために用いる。

予測の方法としては、数分～数時間前の降雨強度、流入量

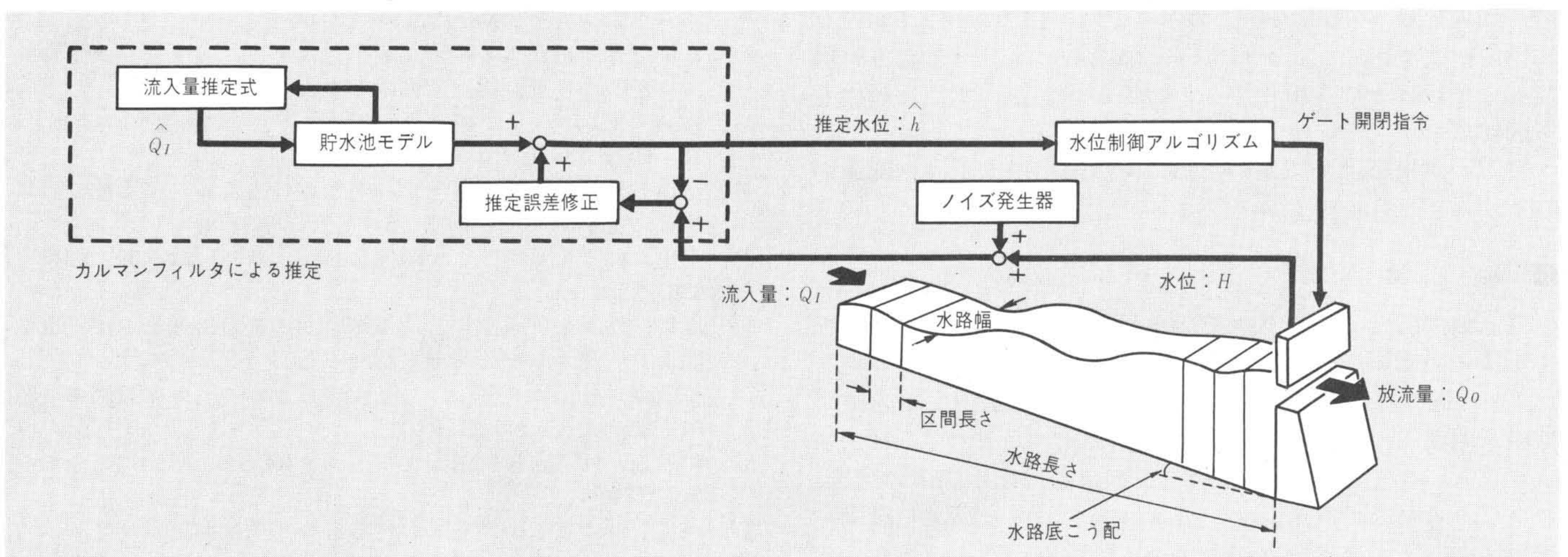


図8 カルマンフィルタによる貯留量制御方式の概念図

貯水池(ダム)で発生する水位振動は、カルマンフィルタを用いることによりその影響が除去され、安定な水位制御が可能となる。

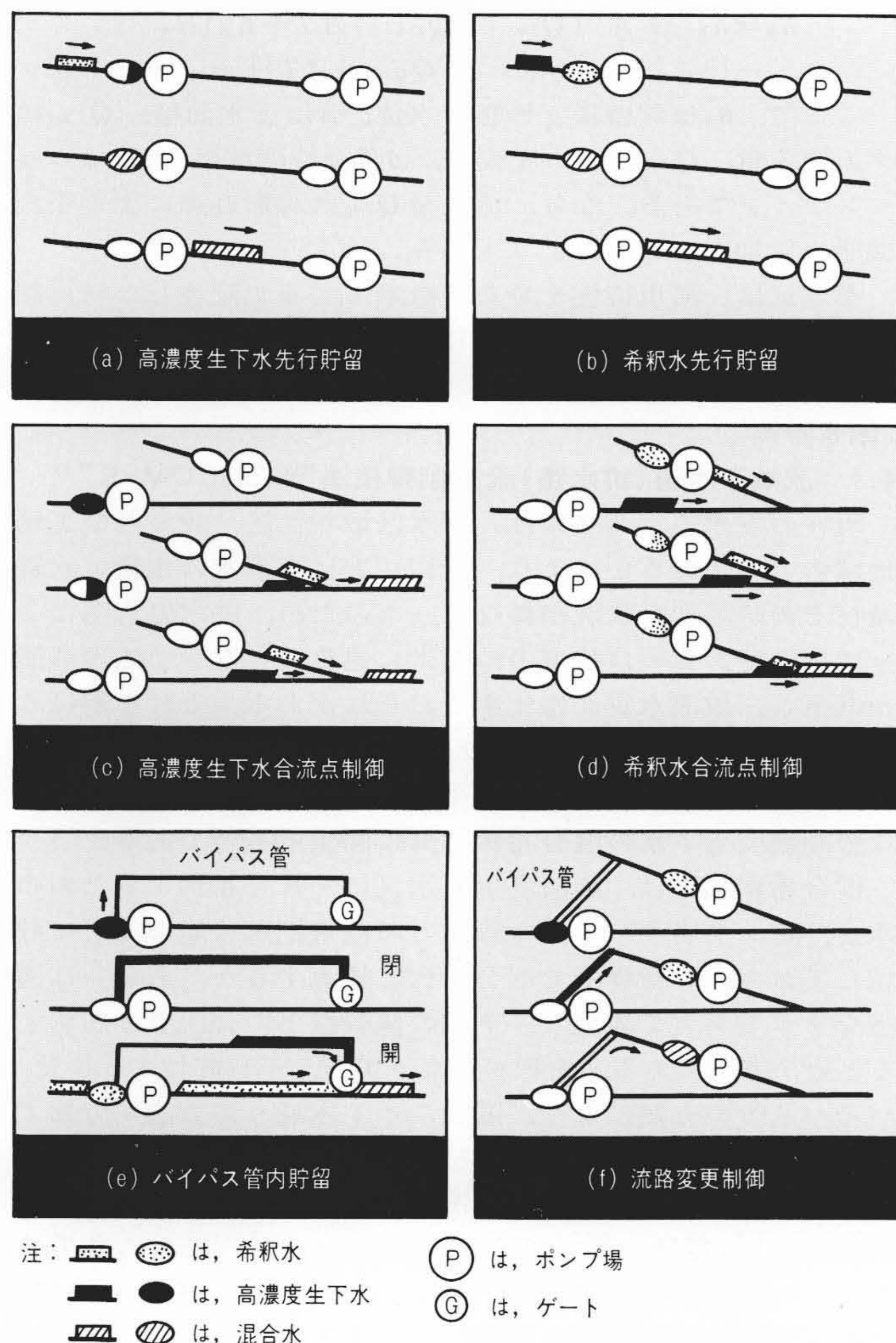


図9 各種の混合希釈制御方法 希釈を行なう場所、一時貯留する物質及びバイパス管の有無により、六通りの方法がある。

や水位の影響に重み係数を掛けて、数分～数十分先の流入量を算出する。重み係数は、いわゆる回帰分析により決める。降雨は降雨強度により幾つかのパターンに分けておく。また、データ蓄積前は水理学的なモデルにより、幹線内の検出端の測定値から流量や水位を解析的に算出する。予測の精度は、10分、20分及び30分先までの予測では許容誤差（ポンプ1台分の吐出し量＝ $200\text{m}^3/\text{min}$ ）のそれぞれ、43.0%、52.5%及び53.3%程度である。これにより、降雨時にポンプ1台を待機運転させれば十分実用化できることが言える。本技法の概念を図10に示す。

また、河川の洪水防止のための河川流出予測を、相関適応修正法により行なうものもある。

5 結 言

日立製作所では、上下水道で水量の運用制御を行なおうとする場合に必要な設備計画と運用計画技法を、幾つか開発した。上水道では、閉管路網内の流量と圧力の動作に、下水道では樹状開渠内の流量と自由水面水位の動作に、それぞれ技法の重点を置いた。これらの技法は、各都市での配水制御の計画、並びにそのための設備計画、排水機場の設備及び運転計画、河川制御、下水道トータルシステムの計画、下水道混合希釈制御、河川及び下水道の流入量予測などに関連して使用され、技術者や行政当局の判断を助けることができた。

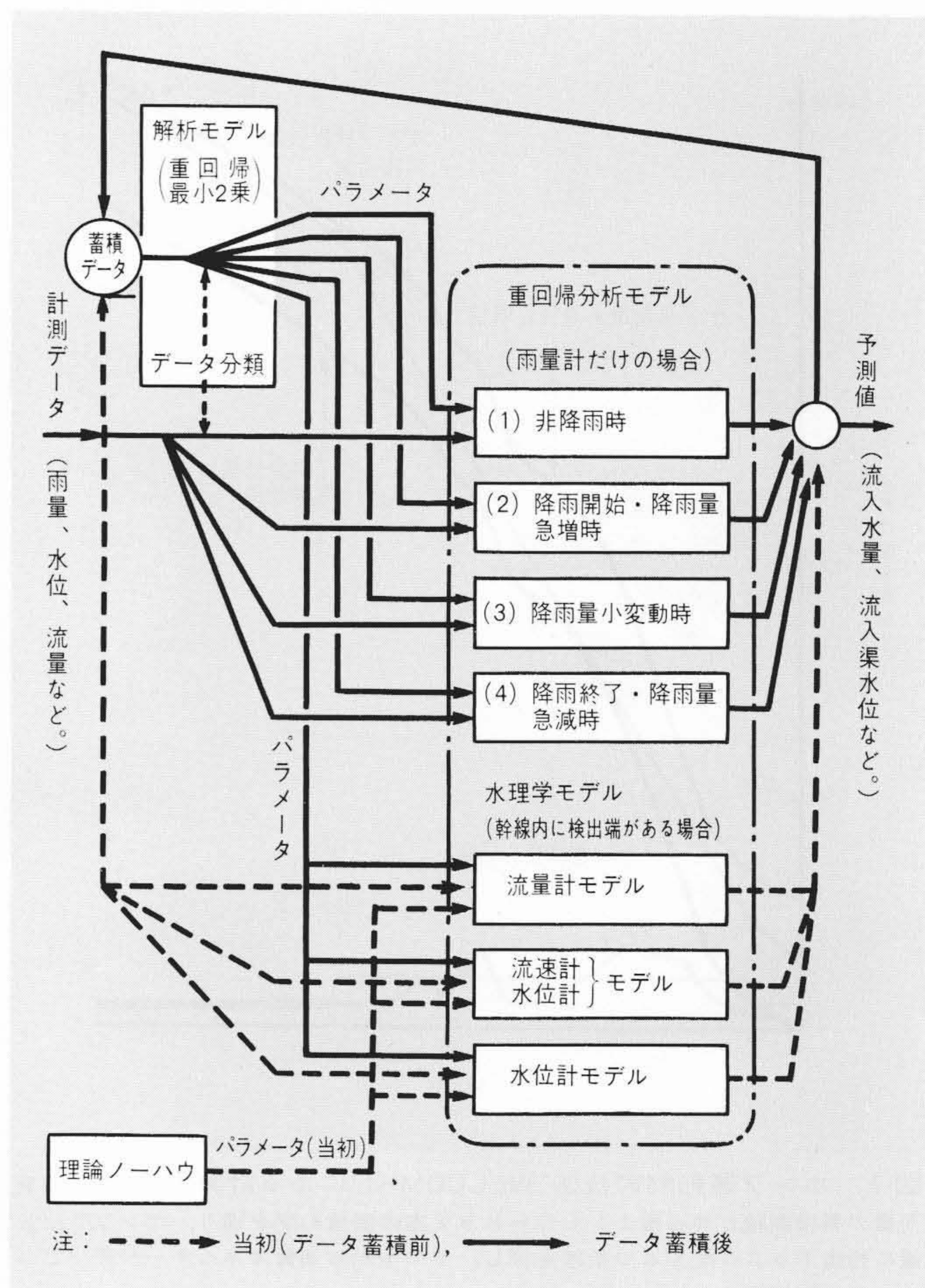


図10 流入量予測技法“WELCOM-T”の概念 数分～数時間前の降雨強度、流入量や水位の影響に重み係数を掛けて、数分～数十分先の流入量を算出する。重み係数は回帰分析により決める。また、降雨は幾つかのパターンに分けておく。

今後とも、これらの技法を用い、上下水道の設備計画と運用計画の充実に協力していきたい。

これらの技法開発に当たり、多くの都市の上下水道関係の各位からいただいた御指導に対し、厚く御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 宮岡, 外: 非線形特性を持つネットワークの定常流解析手法, 昭54電学全大会, No. 1324
- 2) 宮岡, 外: 消費エネルギー最小化によるネットワーク定常流解析手法の性能評価, 昭55電学全大会, No. 1288
- 3) 高桑: 配水ネットワークの解析法とその応用, 電気学会雑誌, 96, 527～534 (昭51-6)
- 4) 畠山, 外: 上水道ネットワークにおける流量・圧力配分の最適化, 電学論文誌C分冊, 53-C38 (昭53-9)
- 5) 上田, 外: 上水道システム運用技法, 日立評論, 59, 631～636 (昭52-8)
- 6) 塩谷, 外: 上下水道におけるポンプの準最適運転方法, 電気学会システム制御研究会 (昭52-5)
- 7) 和歌森, 外: カルマン・フィルタによるダム貯留量制御, 昭54電学全大会, No. 1199
- 8) 和歌森, 外: 河川制御シミュレータRCSS, 昭53電学全大会, No. 1171
- 9) 増位, 外: 下水道系統における混合希釈制御アルゴリズムの開発, 第17回下水道研究発表会 (昭55-4)
- 10) 加藤, 外: 流入下水水量変動パターンの解析, 第12回下水道研究発表会 (昭50-5)