

# 上水道配水コントロールシステム

(株) 日立製作所 システム事業部  
大みか工場

○嶋内 繁行、田畑 彰  
四宮 文人

## 1. はじめに

我が国の上水道では、漏水量は全配水量の2割にも達するといわれている。この原因の一つとして、配水システムの圧力過剰が挙げられる。特に、需要の減少する夜間には圧力上昇が著しく、漏水量の増大、管路事故につながる。また、過剰圧力は、不要なポンプ動力を消費するため、省エネルギーの観点からも避けねばならない。このような背景から、最近、配水システムの圧力分布を適正に保つ制御への要求が高まっている。

また、配水システムの制御では、製造コストの安い水源からの重点配水、事故時の応援給水、湯水時の給水制限などの流量分布の適正化も併せて要求される。

圧力・流量分布の適正化を図るためには、管網計算と呼ばれる配水システムの圧力・流量分布の計算結果に基づき、バルブの最適操作量を求めることが必要である。しかし、配水システムの大規模性、管路・需要データの不確定性、圧力と流量の非線形的相互関係などの理由から、上記計算をリアルタイムで実行し、バルブの制御を行なう、本格的な配水コントロールシステムの実現は困難といわれてきた。

今回、大規模な配水システムを制御上必要十分な精度で縮約表現する手法と、不確定なパラメータを自動同定する手法を開発し、更に制御演算自体の高速化を行なう事により、上記問題点を解決したので、ここに報告する。

## 2. 管網のモデル

配水システムは、図1に示す如く、配水池・需要点などのノードと管路から構成され、ノードでの流量収支条件、および管路の圧力平衡条件から、ノード圧力と管路流量に関する連立方程式が導かれ、管網モデルが得られる。

$$\sum_{j \in A^-(i)} X_j - \sum_{j \in A^+(i)} X_j = Y_i \quad \dots (1)$$

$$P_s(j) - P_e(j) = R_j |X_j|^{\alpha-1} \cdot X_j \quad \dots (2)$$

ここに、 $X_j$  : 管路  $j$  の流量

$Y_i$  : ノード  $i$  の流入 ( 流出 ) 量

$P_i$  : ノード  $i$  の圧力

$R_j$  : 管路又はバルブの抵抗

$A^+(i), A^-(i)$  : ノード  $i$  を始点・  
終点とする管路の集合

$s(j), e(j)$  : 管路  $j$  の始点・終点

管網モデルを解く場合、通常、配水池水位、需要量、および管路・バルブの抵抗を設定し、管路流量および需要点圧力を求める。この計算を管網計算と呼ぶ。

管網計算は配水コントロールシステムには不可欠な機能であるが、

- 1) 配水システムは、ネットワークとしての規模が大きくなり、管網モデルの流量・圧力の変数の数は数百から数千のオーダーとなる。かつ、これらの変数間には、非線形の相互関係がある。
- 2) 管網モデルのパラメータである管路抵抗、および需要量が不確定要素が多く、かつ観測可能な圧力・流量情報が少ない。

などの理由から、短時間で精度の高い計算を実行し、バルブの制御を行なうことは困難とされてきた。

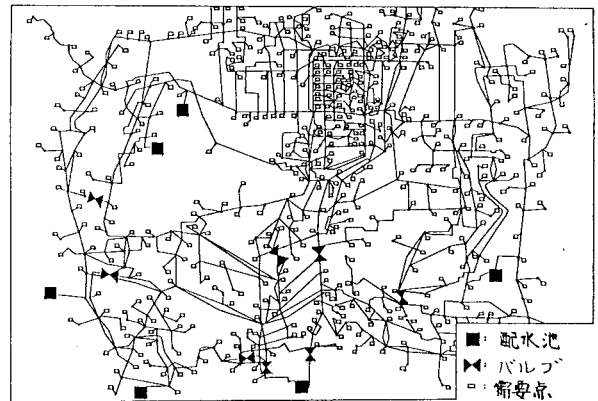


図1. 配水管網例

そこで、以下に述べる管網モデルの縮約、管網パラメータの自動同定、制御演算自体の高速化の手法を開発し、上記問題点を解決した。

### 3. 管網モデルの縮約

大規模な配水システムの制御でまず必要となるのは、不必要に詳細な計算でいたずらに計算時間を増大させることを避けるため、適切なサイズの制御用管網モデルを作成することである。このために、大規模な管網モデル（原管網と呼ぶ）を制御に必要な形に縮約変換する方法を開発した。この方法は、原管網の複数のノードの圧力を縮約管網の一つのノードで代表させ、また、原管網の複数の管路流量の和を縮約管網の一つの管路の流量で表わすものである。（図2）

このような縮約を行なうためには、ネットワークの接続構造だけでなく、同一領域に含まれるノード間の圧力の親近度（距離と呼ぶ）に着目する必要がある。そこで、領域の中心となるノード（核と呼ぶ）を、

- 1) 幹線管路上のノード
- 2) 配水池、監視・制御ノード

などの基準で設定し、それぞれの核を中心に近距離にあるノードをグルーピングし、縮約管網の一つのノードとする。

このようなグルーピングは、各核を根として最短木（根から各ノードへの最短パスから成る木）を張つていくことにより得られる。全てのノードがいずれかの木に含まれたら、グルーピングは終了し、縮約管網の構造が定まる。

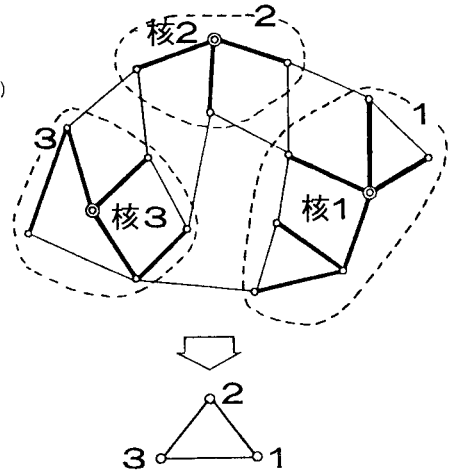


図2. 管網モデルの縮約法

図1の原管網を縮約した結果、ノード数を1/3以下に減らした場合でも、縮約管網による圧力・流量の計算結果と、原管網による計算結果との誤差は2%以内であり、実用上全く問題の無い誤差と言える。

### 4. 管網パラメータの同定

管網モデルのパラメータの一つである管路抵抗は、新しい管の場合には管路長、口径、材質などから、比較的正確に求めることが出来るが、古い管の場合は経年変化により正確な値を求めることは出来ない。また、前述の如く原管網の複数の管を一本に合成して縮約表現したモデルに関しては、あいまい度はさらに高くなる。

同様な不確定要素を持つパラメータとしては、需要量が挙げられる。そこで、これらのパラメータを、圧力・流量の観測情報を基に、自動的に同定する方法を開発した。

管網の同定指標として、

$$I = \sum_t \sum_i \varepsilon_i (X_i^t - \tilde{X}_i^t)^2 \quad \dots \dots (3)$$

ここに、 $X_i^t$  : 時刻  $t$ 、観測点  $i$  の圧力または流量の観測値

$\tilde{X}_i^t$  : 時刻  $t$ 、観測点  $i$  の圧力または流量の計算値

$\varepsilon_i$  : 重み係数

を導入すると、同定計算は(1)、(2)式を制約条件として、(3)式を最小

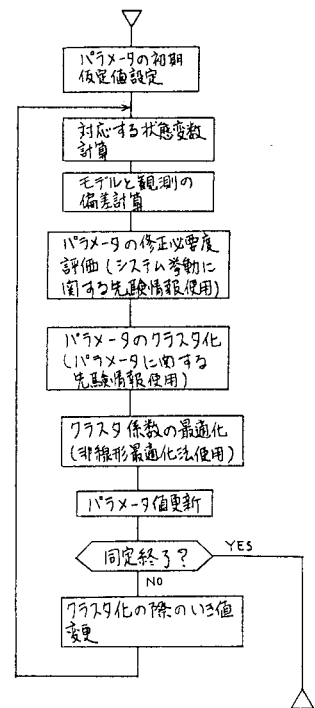


図3. 同定法の概略フロー

化する問題となる。しかし、パラメータ数の多さ、非線形性から、求解には膨大な計算を要する。

そこで、パラメータが圧力・流量計算値に与える影響に関する先験情報を利用して、パラメータを修正必要度に応じたクラスタに分類し、修正をクラスタ単位で行なうことにより、同定計算の効率化を図った。

先験情報としては、圧力に関しては以下のようなものを用いる。

- 1) ノード圧力計算値が観測値より大の場合、上流側抵抗を増加方向に、下流側抵抗を減少方向に修正する。付近の需要量は増加方向に修正する。
- 2) ノード圧力計算値が観測値より小の場合、上流側抵抗を減少方向に、下流側抵抗を増加方向に修正する。付近の需要量は減少方向に修正する。

また、パラメータの同定は図3に示す如く、ある初期値から初めて、観測値との偏差が許容範囲に収まるまで繰り返して行なう。

前述の縮約管網では、20個の観測情報から200以上の管路抵抗を求めることが必要であるが、本同定法を適用した結果、計算値と観測値の誤差は4～5%と、非常に良好な値を得ることが出来た。

## 5. 制御演算の高速化

管網モデルの縮約により、管網計算に要する計算時間は、 $1/3 \sim 1/5$ に短縮出来る。しかし、最適なバルブの操作量を求めるためには、この計算を数十回から数百回繰り返すことになり、この部分の高速化は不可欠である。

そこで、制御演算を、図4に示す如く、需要量などの外的状況が大きく変化したとき、新たなバルブ操作量を求め直す圧力・流量最適化計算と、時々刻々変化する圧力、流量の情報をフィードバックし、操作量の修正を行なうフィードバック制御計算により構成することにより、管網計算回数を削減し、更に最適化計算自体も高速化し、リアルタイム制御への適用を可能とした。

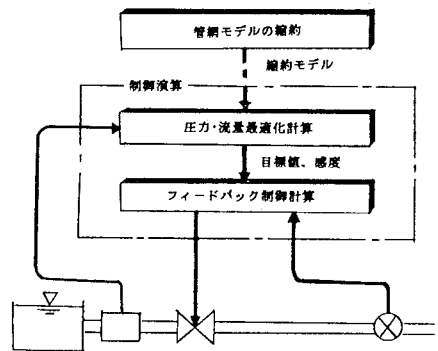


図4. 制御演算の構成

### 5.1 圧力・流量最適化計算

圧力・流量最適化計算とは、管網内の圧力・流量が適正值となるように、操作変数であるバルブ抵抗値を山登り計算により求めるものである。

この計算の高速化のために、管網計算問題を管網内水流のエネルギー最小原理を利用して、最小費用流問題に変換し、高速のネットワークフロー算法を適用した。ネットワークフローの算法としては、図5に示すように、初回の管網計算では基準となる流れが得られていなくても計算可能なPrimal-Dual法を用いる。山登り計算の過程での管網計算では、前段階の流れが必要な範囲で修正するだけで新たな解が得られるPrimal法を用いる。また、山登り計算の方法としては、直接探索法の中で最も効率の良いといわれているSimplex法を採用した。

このように、管網計算問題を最小費用流問題に変換し、ネットワークフロー算法を特徴に応じて使い分けることにより、圧力・流量最適化計算を、ミニコンでも5分以内で計算可能とした。

### 5.2 フィードバック制御計算

フィードバック制御計算とは、微小な需要変動時に、毎回最適化計算を実行することを避けるために、観測情

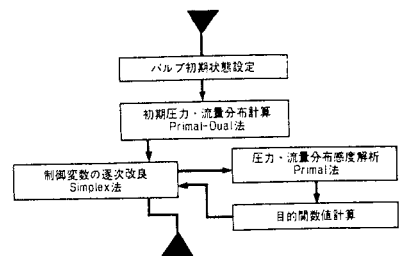


図5. 圧力・流量最適化計算

報をフィードバックして操作量に修正を加え、圧力・流量の適正值に近づけるものである。

このために、圧力・流量最適化計算実行時に、各バルブが圧力・流量に与える影響（感度）を求めておき、制御は、この感度を用いてPI（比例・積分）動作により行なう。

また、最適化計算の入力データである需要量は、推定誤差を含むものであるが、フィードバック制御計算の導入により、このような推定誤差の吸収も可能となつた。

## 6. 高松市水道局向け配水コントロールシステム

高松市水道局の配水システムは、図1に示す如く、6個所の浄水場・配水池と延長1,000kmの配水管により構成されている。標高差の大きな地形のため、水圧分布の不均衡が生じ易く、更に、全市を一括配水区域としているために、配水操作は極めて難しいものである。

そこで、複雑かつ多様化した水道施設を有機的に体系づけ管理運営を行ない、1)水圧の均等化、2)水源間の相互融通、3)省資源・省エネルギーを図るために、配水コントロールシステムの導入を行なつた。

本システムは、8ヶ所のバルブ、および20ヶ所の圧力観測点を子局とする情報伝送装置と制御用計算機により構成されており、昭和56年12月より本格稼動を開始した。

図6は、バルブ制御実施前と実施後の圧力の観測値である。本システムの導入により、夜間の高水圧をなくし、需要のピーク時に低水圧となる地域を適正圧とすることが出来ることが確認出来る。このように、圧力の適正化が図られた結果、1日の配水量は3.5%減少し、更に、高水圧に起因する漏水事故件数も約30%減少するなど、顕著な効果が得られている。

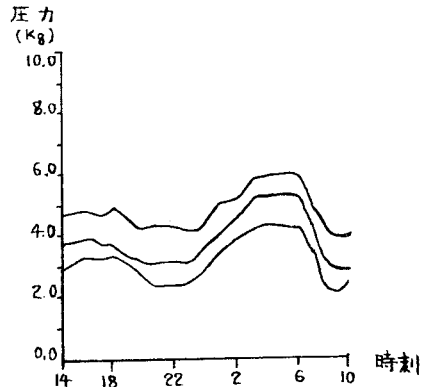
## 7. おわりに

上水道配水コントロールシステムの目指すところは、取水から配水に至る水道施設の運営を相互に関連づけ、システム化して、全体としての施設管理の最適化を図るものである。今回、この中核となる配水システムの制御に関し、一連の手法開発を行なつた。

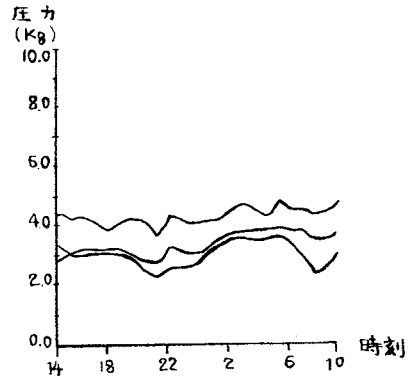
開発した手法は、高松市水道局向け配水コントロールシステムに適用され、漏水量の削減、漏水事故件数の低減に大きな効果を上げている。

### <参考文献>

- 1) 宮岡、船橋：大規模ネットワーク系の縮約とパラメータ同定、電気学会全国大会（昭58）
- 2) 宮岡、嶋内他：上水道配水制御方式「NEFLAN-C」の開発、日立評論、64、2、P135（昭57-2）
- 3) 高木、嶋内他：上水道配水コントロールシステム、日立評論、64、4、P53（昭57-6）



(a) システム導入前



(b) システム導入後

図6. 観測圧力のトレンド