

最適水運用計画システム

鈴木厚郎、井上 聡

(株) 荏原製作所 環境事業本部
東京都大田区羽田旭町 11-1

概 要

横須賀市水道局における水運用総合管理システムの基幹をなす最適水運用計画機能は、ポンプ所・配水池群の最適運用による日間配水量の変動吸収、ポンプ等各機器の稼働効率向上、調整用水源負荷及び浄水量の平滑化を目的として開発され、現在、実運用に入り、結果も概ね好評である。

当システムでは、全市、及び各系統別の日間、時間毎の配水量に関して、重回帰分析、カルマンフィルタ係数同定アルゴリズムを適用した短期水需要予測を高精度に行い、これをもとに動的計画法による最適な全市送水計画、機器運転スケジュール計算を行い、全市レベルの水運用計画作成支援と共に、ツリー状に構成された個々のポンプ所・配水池に至るまでのコンピュータによる送水制御運転を実現している。

キーワード

水需要予測、重回帰分析、カルマンフィルタ、動的計画法、送水計画、水運用

1. 緒 言

現在、高普及率を達成した上水道事業では、単なる維持管理の合理化を目的とした施設整備だけでなく、市民ニーズの多様化や高度情報化社会に対応した水道業務の効率化、高度化による施設の効率運用、及び災害時の迅速的確な対応など総合的な管理体制の確立と強化が求められている。横須賀市水道局においては、この問題に早くから取り組み⁽¹⁾、現在、一定の成果を得てきている。

上水道における水運用とは、水源から、配水池・配水幹線に至るまでの施設を対象として、いかに高品質の「水」を生産し、どのように安定かつ経済的に最終需要家へこれを供給していくかを考え、実施に移すことである。従来、これらについては、監視、操作、記録といった監視制御機能で対応してきたが、現今では、水道施設を「生産」にあたる取水・浄水プロセスから「流通」にあたる送配水プロセスまでの一連のシステムとして捉えて、水運用を総合的・合理的に計画し管理していくことが必要となってきている。従って、水道事業体にとっては、水需要の動向を予測し、限られた施設の中で配水計画に適合した運用計画を素早くかつ的確に知ることが極めて重要であり、また中長期の計画策定にも多大なメリットがあると思われる。よって以下では、横須賀市水道局水運用総合管理システムの中の中核となる部分、即ち送配水系統における最適水運用計画策定の手法と適用した結果について紹介する。

2. システム化の目的

本システムの目的は、水運用業務を効率化・高度化して対象施設を最適運用するため、

- ・配水池容量の有効利用による日間配水量の変動吸収と稼働効率向上を目指したポンプ運転計画
- ・基幹配水池、調整池群の最適運用による調整用水源負荷の平滑化、及び浄水量の一定化による取水・浄水施設の効率的運用
- ・送配水シミュレーションに基づく非常時の適確な運用支援

を行うことにある。ここで短期水需要予測と最適計画手法が重要となる理由としては以下がある。

- ・全市水運用の自動化は、給水に関わる各施設が連携だってシステム化されなければ達成しえない。
- ・自然流下系の予測に基づき下位配水池の配水量の利用スケジュールを定める。これによって、それらを積み上げた形での全配水システムのシステム化が初めて可能になる。
- ・そのための水需要量予測は、実制御に耐えうる程度までの精度向上が必要である。

3. 短期水需要予測

3.1 日間配水量の予測

短期配水量予測の手法として一般によく用いられる重回帰モデルを適用した。非数値要因として、曜日及び午前、午後の代表的天候、数値要因として、最高気温及び前日の配水量を考慮した。さらに前日の値や高次の項なども加え、最適な要因を選択した。

重回帰モデルでは、第 i 日の予測量 Y_i は考慮する要因の数を M 個とすると以下の式から求めることができる。

$$Y_i = X_i \cdot A, X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{Mi}), A_i = (a_1, a_2, \dots, a_M)^T \quad (\text{「}^T\text{」は転置行列の意)} \quad \text{〔式1〕}$$

ここで、 x_{ij} は i 日における要因 j の値であり、係数 a は過去 N 日間のデータを用いて決定された最適な偏回帰係数で、次のようになる。

$$A = \left(\sum_{i=1}^N X_i X_i^T \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^N X_i^T \cdot Y_i \quad \text{〔式2〕}$$

実行可能性の検証と実際に使用する際の偏回帰係数を求めるため、各配水池の1年分の日間配水量について要因分析、重回帰分析を行い、求めた係数と翌年のデータを用いて予測値を計算し、実績値と比較評価した。解析に使用したデータは'84、'85、'86年度の3年分であり、その結果の一部を表1に示す。全市配水量についてはいずれの年度においても2%以下であり、実際の運用に対し十分使用可能であると考えられるが、各配水池についてみると、段々と誤差が増えてゆく配水池等も見受けられ、後に示すカルマンフィルタの利用が必要となる。

3.2 時間配水量パターンの予測

送水計画においては、前項で予測された日間配水量を水需要のパターンに合わせて時間配分する必要がある。この配分に対しては、各時間に対する以下に示すような時間係数を使用した。

第 i 日 k 時の時間係数 r_{ik} は i 日の平均時間配水量と k 時の時間配水量との比であり、以下の式で定義される。

$$r_{ik} = \frac{q_{ik}}{\bar{q}_i}, \quad \bar{q}_i = \frac{Q_i}{24}$$

\bar{q}_i : 第 i 日の平均時間配水量
 Q_i : 第 i 日の日間配水量
 q_{ik} : 第 i 日 k 時の時間配水量

従って、日間配水量の予測値に時間係数を乗ずることにより各時間の配水量を求められる。時間係数の導出についても日間配水量と同様の手法を適用した。図1に1日の実績と予測の時間パターン比較の一例を示した。

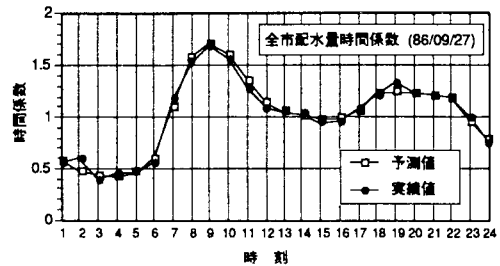
3.3 カルマンフィルタの適用

一般的な線形離散時間確率システムの基礎方程式に配水量予測多項式を当てはめ、カルマンフィルタを適用した。ここで、状態ベクトルを配水量多項式の係数、観測行列が観測される曜日、気温、天候などとすれば、観測ベクトルが配水量多項式の解、すなわち配水量となる。(*)

結果の一例として、重回帰モデルでは途中から誤差が大きくなった長沢低区配水量に対し、カルマンフィルタを適用した実績と予測の相関関係の比較を図2に示す。基本的にはどの配水池に於てもカルマンフィルタの利用による誤差縮小の効果が得られた。表2に示すように、特に重回帰モデルだけでは誤差の大きなものに対して効果的であり、実用可能であるとの確信を得た。

表1 日間配水量予測精度(1日当り平均誤差%)

配水量(系統)	'84年度の 実績データにより '85年度を予測	'85年度の 実績データにより '86年度を予測
全市	1.65	1.61
武山低区	3.16	2.46
追浜	5.25	5.26
長沢低区	3.64	4.59
長沢高区	4.12	3.91



〔式3〕 図1 時間配水パターンの比較 (全市配水量: '85解析 -> '86予測)

表2 重回帰モデルとカルマンフィルタの予測精度

配水量(系統)	'85年度の実績により'86年度を予測	
	重回帰モデルのみ	カルマンフィルタ利用
全市	1.61	1.51
長沢低区	4.59	3.13
森崎	8.46	6.62
鴨居	6.83	3.92
武山高区	11.11	3.88
秋谷	7.24	5.71

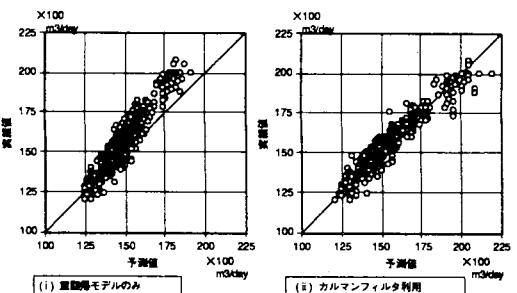


図2 カルマンフィルタを用いた効果 (長沢低区配水量: '85解析 -> '86予測)

4. 最適運転計画

4.1 問題の設定

本システムにおいては、全ての配水系統がツリー状に配置されるように系統分類を行っており、更に各系統をポンプ所と配水池からなるユニットに細分化して考える。すると、下記の2つのユニットの組み合わせにより全系統の最適化を進めることができる。^(*)

- ① 単一送水系：一つの配水系統、配水池およびポンプ所に集約して考えられるユニットで、その中の最適化のみを考える。
- ② 複合送水系：一つの単一送水系に加えもう一つの配水系統（単一送水系でもよい）が組み合わせられているユニットで、両系統を合わせた最適化を図る。（図3）

従って、以下では1日の時刻毎の予測配水量が与えられている場合において、定められた制約条件（例えば配水池の水位が所定の範囲にあること）を満足しつつ、

- 1) 送水ポンプの起動停止頻度を最小にする。
- 2) 送水ポンプの運転コストを最小にする。
- 3) 複合送水系の合成流量を最小にする。（複合送水系の場合）

ための1日の送水ポンプ運転スケジュール、即ち各ポンプの起動停止時刻を求める問題を考えることになる。

4.2 基礎方程式

本システムの問題を数式化すると、以下のようになる。

$$h(t) = h(t_0) + \frac{1}{A} \int_{t_0}^t (q_{PT}(t) - \hat{q}_{01}(t)) dt \quad \text{〔式4〕}$$

$$q_{PT}(t) = \sum_{i=1}^n q_{pi}(t) = \sum_{i=1}^n Q_{pi} \cdot X_i(t) \quad \text{〔式5〕}$$

$$\text{制約条件:} \quad H_{LL} < h(t) < H_{HH} \quad \text{〔式6〕}$$

$$\text{評価関数:} \quad \text{cost} = \text{cost1} + \text{cost2} + \text{cost3} \quad \text{〔式7〕}$$

となり、求めるポンプ運転計画は、

$$X_i(t) : i = 1 \sim n, t = t_0 \sim t_{\max} \quad \text{〔式8〕}$$

となる。ここで、主な記号は表3の通りである。

また、評価関数を規定する3つの要素を次のように考える。

- 1) ポンプの起動状態変更に関わるコスト
(変更回数が多いほど、高くなる)

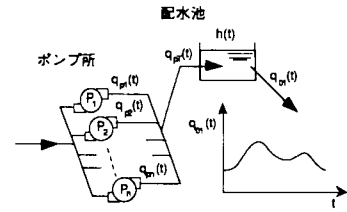
$$\text{cost1} = K_1 \sum_{i=1}^n N_i^2(t_{\max}) \quad \text{〔式9〕}$$

- 2) ポンプの運転に関わるコスト（運轉動力費が多いほど、高くなる）

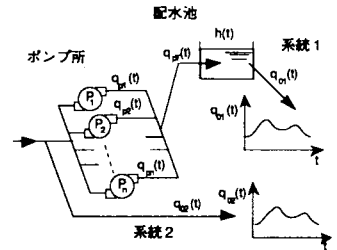
$$\text{cost2} = K_2 \int_{t_0}^{t_{\max}} \sum_{i=1}^n \frac{W_i}{W_{PA}} \cdot X_i(t) dt \quad \text{〔式10〕}$$

- 3) 複合送水系の平滑化に関わるコスト（送水系の合成流量の変動が大きいほど、高くなる）

$$\text{cost3} = K_3 \int_{t_0}^{t_{\max}} \left\{ \frac{(q_{PT}(t) + \hat{q}_{02}(t)) - (\hat{q}_{01AV} + \hat{q}_{02AV})}{Q_{PA}} \right\}^2 dt \quad \text{〔式11〕}$$



(i) 単一送水系



(ii) 複合送水系

図3 送水系の構成

表3 主な記号

$h(t)$: 時刻 t における配水池水位
H_{HH}	: 配水池上限水位
$H_{LL}(t)$: 時刻 t における配水池下限水位
$\hat{q}_{01}(t), \hat{q}_{02}(t)$: 時刻 t における1(2)系の予測配水量
$\hat{q}_{01AV}, \hat{q}_{02AV}$: 1(2)系の日平均予測配水量
$q_{pi}(t)$: 時刻 t におけるポンプの吐出量
$q_{PT}(t)$: 時刻 t における合計ポンプ吐出量
$X_i(t)$: 時刻 t におけるポンプ運轉状態 1にてON、0にてOFF
$N_i(t)$: 時刻 t_0 から t までのポンプ合計 起動変更回数
W_i	: ポンプの単位時間当たりの消費電力
W_{PA}	: 全ポンプ(n 台)運轉時の消費電力
Q_{pi}	: ポンプの吐出量
Q_{PA}	: 全ポンプ運轉時の吐出量
A	: 配水池断面積
K_1, K_2, K_3	: 評価関数の重み付け係数

4.3 動的計画法

本システムの最適化には動的計画法（DP法）を用いている。これは多段決定過程での最適化問題を、最適性の原理に基づいた漸化式により最適化してゆく手法である。多段決定過程とは、あるシステムの状態の変化が離散的に行なわれ、各時点におけるシステムの状態が1時点前の状態とその間の操作量によって一義的に決定されるシステムを言う。これを式で表せば、以下ようになる。

$$X_n = T_n(X_{n-1}, U_n) \quad ; X_n : n \text{ 段の状態}, T_n : n \text{ 段における変換、} \\ U_n : n-1 \text{ 段から } n \text{ 段までの操作量} \quad \text{〔式12〕}$$

ここでは、状態ベクトルを配水池水位と各ポンプの運転状態とし、操作量を各ポンプの起動状態変更（始動、停止）操作とすることにより、これを多段決定過程とみなしてDP法を適用した。また、配水池の全貯量の中で操作可能な容量をバッファとし、これを適当な貯量毎に分割し離散化することによって計算時間の短縮を図っている。

本システムの一つの要素となる複合送水系配水池の例として、長沢高区配水池を対象として計算した結果を図4に示す。これによれば、上位配水池への負荷を平滑化しつつ、バッファ貯量を有効に活かした起動変更の少ない運転をしていることが分かる。

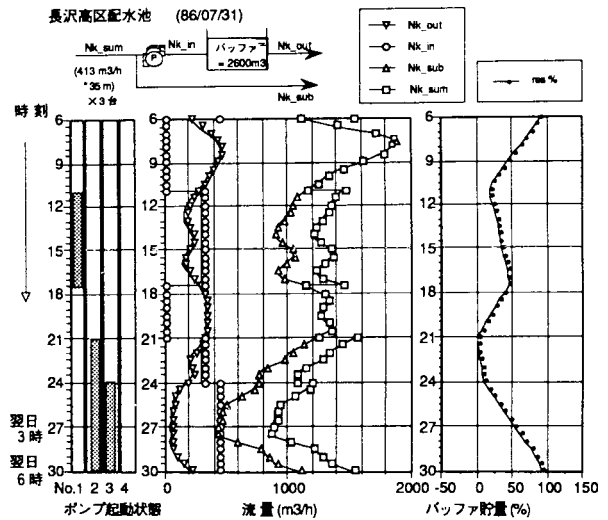


図4 長沢高区配水池における最適計算例

5. 実際に適用した結果

現在、当システムは横須賀市水道局逸見総合管理センターにて稼働中である。ここでは、全市、全ポンプ所の運用計画を演算するのに必要な時間は約10分であり、リアルタイムでの運用に十分耐えうるものである。また、運転計画についてもこちらが意図している操作、制御が行われていることを確認しており、結果は概ね好評である。予測と実績が大きく異なる時には相応の理由が考えられるが、その時点における新しいデータにより再演算が行われ、制御上の問題は一切起きていない。今後、データの蓄積が進むに従い、評価関数のコスト係数や時間係数の見直しなど、更なるブラッシングを行い、よりの確で使いやすいシステムになっていくと考えられる。

6. 終わりに

本報では横須賀市水道局における最適水運用計画システムについて、重回帰モデル、カルマンフィルタを用いた需要量予測、DP法による運用計画策定的手法、結果、有効性について紹介した。尚、現在は、水源事故や施設停電等の非常時の水運用計画機能や中長期的な配水量増大時に対する施設運用のケーススタディを行うためのシミュレーション機能の充実を図っている。更に、配水量予測の精度の一層の向上（特に、時間係数）を目的として、係数分析システムを稼働させ、万全を期している。

最後に、当システムにおいては貴重なデータ、ノウハウを提供していただいた横須賀市水道局関係各位、システムの画面表示、操作等外郭部の作成を担当された日本電気(株)に多大な協力を得た。ここに記して厚く感謝の意を表する次第である。

参考文献：

- *1 : K.Morita (1986), Advancing Measures for Stable Water Supply - A Case of Yokosuka Waterworks, 6th ASPAC論文集
- *2 : 片山徹 (1983), 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店
- *3 : 日本国特許庁 (1987), ポンプのスケジュール運転方法, 特許公報, 昭62-28319