

II-353 バルブ操作を考慮した都市配水システムにおけるオンライン水需要量予測

九州大学大学院 ○学生員 土井 敬介 九州大学大学院 学生員 小谷 辰士
九州大学工学部 正員 河村 明 九州大学工学部 正員 神野 健二
九州大学工学部 正員 上田 年比古

1. はじめに 大規模・複雑化する都市の上水道の配水システムにおいて、配水の最適運用を行って水資源の有効利用を図ることは、水不足に悩まされる多くの都市が抱える大きな課題の一つである。配水の最適運用を行うには、水圧分布の適正化を図って、漏水量の抑制と需要者への供給水圧の確保をしなければならないが、このためには配水管網内の各節点での需要量の精度よい予測が必要となる。ここでは、モデル配水管網として福岡市の21区画に分割された実際の配水管網系から第9区画を取りあげ、この配水管網内に設置された流量計、水圧計および電動調節弁から時々刻々得られるセンサ情報を利用して、電動調節弁による圧力制御を考慮しつつ非定常の節点需要量をカルマンフィルター理論を用いて予測し、本手法の実用性の検討を行った。

2. 計算手法 配水管網の基礎方程式は、各節点における連続式と、各管路における水頭損失式で、常に流量連続条件と水頭閉合条件、すなわち任意の節点*i*における連続式： $\sum Q_{ij}(k) = -q_i(k) \dots (1)$ 、と任意の2節点*i, j*間の管路についての水頭損失式としてHazen-Williamsの式： $H_i(k) - H_j(k) = r_{ij}^{-1/\alpha} |Q_{ij}(k)|^{1/\alpha - 1} Q_{ij}(k) + 8f_\gamma / (g \pi^2 D_{ij}^5) |Q_{ij}(k)| Q_{ij}(k) \dots (2)$ (但し右辺第2項はバルブを有する管路についてのみ必要)を満足しなければならない。ここに、*k*: 時点、 Q_{ij} : 節点*i*から*j*に流れる流量(m^3/hour)、 q_i : 節点*i*における需要量(m^3/hour)、 H_i, H_j : 節点*i, j*における水頭(m)、 α : 定数で0.54、 f_γ : バルブの損失係数、 g : 重力加速度(m/hour^2)、 r_{ij} は定数で、 $r_{ij} = 0.27853 C_{ij} D_{ij}^{2.63} \ell_{ij}^{-0.54} (m^{2.46}/\text{hour}) \dots (3)$ $C_{ij}, D_{ij}, \ell_{ij}$ はそれぞれ節点*i, j*間の管路の流速係数($m^{-0.37}/\text{hour}$)、管径(m)、管路長(m)。次に、式(2)において時点が*k*から(*k*+1)に変化したときの流量、水頭の遷移式を誘導するために、式(2)をTaylor展開し、線形化を行うと、 $H_i(k+1) - H_j(k+1) - f_{ij}(k) Q_{ij}(k+1) = H_i(k) - H_j(k) - f_{ij}(k) Q_{ij}(k) \dots (4)$ となる。ここに、 $f_{ij}(k) = (1/\alpha) r_{ij}^{-1/\alpha} |Q_{ij}(k)|^{1/\alpha - 1} + 16f_\gamma / (g \pi^2 D_{ij}^5) |Q_{ij}(k)| Q_{ij}(k) (hour/m^2) \dots (5)$ である。この線形化した水頭損失式を管網内のすべての管路に、また連続式をすべての節点に対してたて、これらをカルマンフィルターの観測方程式： $y(k) = H(k)x(k) + T(k) + w(k) \dots (6)$ (ここに、*y*: 観測ベクトル、*H*: 観測行列、*T*: 定数ベクトル、*w*: 観測雑音)に変形する。またカルマンフィルターの状態方程式： $x(k+1) = \Phi(k)x(k) + u(k) \dots (7)$ (ここに、*x*: 状態量ベクトル、 Φ : 遷移行列、*u*: システム雑音)により遷移するシステムパラメーターは、1時点先の流量や水頭の予測値と、センサ情報として実際に計測される流量、水頭とのズレ(イノベーション)をフィードバックして求められる。なおアルゴリズムの詳細については参考文献1)を参照されたい。

3. 適用例とその考察 2.で述べた手法を図-1に示す福岡市の実際の配水管網に適用することを考える²⁾。まず29個の節点需要量および節点1と節点19の外部流入量、さらに節点1の水頭を選んで次式のモデル(周期関数式と2次の自己回帰式との和)で表す。例えば節点*i*での需要量は、 $q_i(k) = M_i + a_{i1} \sin 2\pi F_{i1} k + b_{i1} \cos 2\pi F_{i1} k + a_{i2} \sin 2\pi F_{i2} k + b_{i2} \cos 2\pi F_{i2} k + \phi_{i1} q_i(k-1) + \phi_{i2} q_i(k-2) + v_i(k) \dots (8)$ ここに、 v_i : $N(0, \sigma_i^2)$ の正規性白色雑音。次に、式(8)において周波数成分 F_i 、平均値 M_i 、 F_i に対する振幅 a_i, b_i および自己回帰係数 ϕ_{i1}, ϕ_{i2} を与えて288時点分(ここでは、1時点を10分刻みとした)の需要量の真値を模擬発生させる。また、これらの値を用いて管網計算を行った結果を流量および水頭の真値とする。なお、水頭については福岡市で実際に行われている圧力制御を想定して、水圧計により観測される値がある一定の範囲内で変動するようにバルブによる制御を行った。図-2(a), (b)は、バルブ操作を行った6個のバルブのうちそれぞれ節点5~10間、節点22~23間のバルブ開度の変化を示している。次に、需要量の予測値は式(8)の F_i を既知として、 $M_i, a_i, b_i, \phi_{i1}, \phi_{i2}$ を同定すべきパラメーターすなわち式(6)、式(7)における状態量*x*とすることにより求められ、流量および水頭の予測値については、需要量の予測値を用いて式(1)、式(4)より求められる。以上のようにして需要量、流量および水頭の予測を行った結果の一部を図-3に示す。ここで、この図において小刻み

に変動する実線が真値を、○印のついた比較的なめらかな線が予測値を表す。また、節点11の水頭 H_{11} を表す図中の破線は、 H_{11} をこの範囲内(24~27(m))で制御することを示す。この図より、需要量 $q_{1,6}$ 、流量 $Q_{1,6}$ (節点1,6間の流量)、水頭 H_{11} のすべてが非常に精度よく予測されており、特に $Q_{1,6}$ 、 H_{11} については、バルブ開度の変化に伴う流量および水頭の変動に対して非常に正確に予測値が追従している。一般に、カルマンフィルターではパラメーターが一定値にほぼ収束し終った時点においては、バルブ開度の変化に伴って生じた新しいシステムに対応できず、ここではバルブ開度の変化と同時にカルマンフィルターを再起動させたために精度よい予測値を得ることができた。また、本手法をさまざまな現実的なモデルにも適用することができるように、ここでは需要量を式(8)に示す周期関数式と自己回帰式との和で表されるとした。そのため、式(8)右辺の非観測の需要量 $q(k-1)$ 、 $q(k-2)$ に予測値が入るために生ずるモデル上の予測誤差が考えられる。このような場合には、カルマンフィルター理論における観測雑音およびパラメーター初期値推定誤差の共分散を適切に設定し、モデル上の誤差により生じたイノベーションをフィードバックする割合を小さくすれば精度よい予測結果が得られることがわかった。

4. むすび 以上のように、大規模な都市の配水システムにおいて、複雑なバルブ操作による圧力制御が行われた場合でも本手法により水需要量の予測を精度よく行うことができると考える。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、福岡市水道局水管理センターおよび水道局計画課の方々に懇切な御助言を受けました。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 上田・神野・河村・土井; センサ情報を用いた配水管網の流量・水圧・需要量の予測、九大工学集報、第59巻、第5号、昭和61年10月。
- 2) 土井・河村・神野・上田; センサ情報を用いた大規模配水ネットワークの水需要量の予測手法について、第31回水理講演会論文集、pp.277-282、1987年2月。

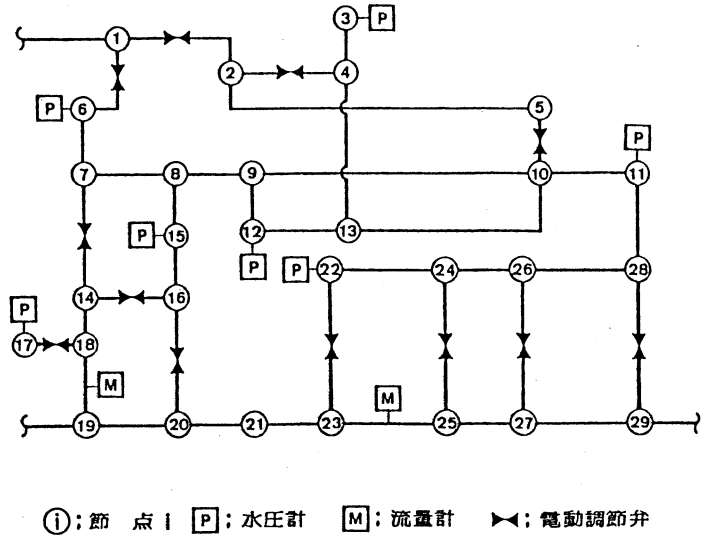


図-1 配水管網モデル

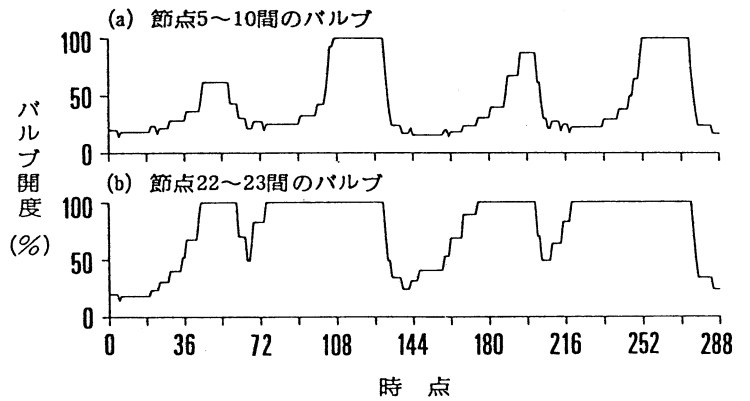


図-2 バルブ開度の変化

単位 ; Q, q (m^3 /hour) H (m)

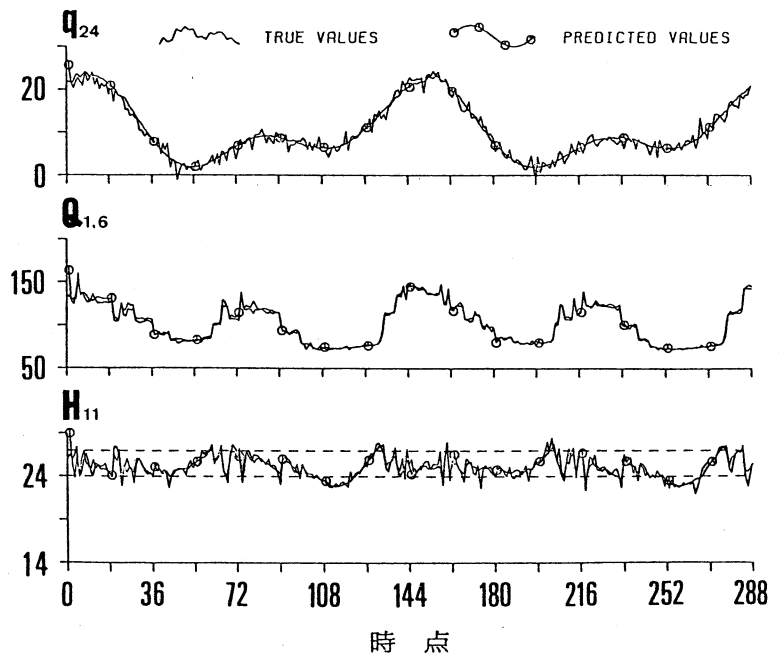


図-3 需要量、流量および水頭の真値と予測値