

## センサ情報を用いた配水ネットワークのオンライン需要量予測について

九州大学工学部 ○学生員 小谷 辰士 九州大学大学院 学生員 土井 敬介  
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 水需要の増大に伴い、大規模・複雑化する都市の上水道の配水システムが抱える課題の一つとして圧力制御の問題がある。圧力制御による水圧分布の適正化は、漏水量の抑制と需要者への供給水圧の確保を図る上で不可欠であり、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。本報では福岡市の21区画に分割された実際の配水管網系のうちから第9区画をモデル計算区画として取りあげ、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非定常の需要量をカルマンフィルター理論を用いて予測し、これより未知の管路流量と水圧の予測も同時に行った。さらに配水管網内の電動調節弁の開度の変化が予測精度に及ぼす影響について考察を行い、本手法の実用性の検討を行おうとするものである。

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： $H_i(k) - H_j(k) = r_{ij}^{-3/\alpha} |Q_{ij}(k)|^{\alpha-1} Q_{ij}(k) + 8fv / (g \pi^2 D_{ij}^5) |Q_{ij}(k)| Q_{ij}(k) \dots (2)$  (但し、右辺第2項は管路途中に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( $m^3/\text{hour}$ )、 $q_i$ : 節点*i*における需要量( $m^3/\text{hour}$ )、 $H_i, H_j$ : 節点*i, j*における水頭( $m$ )、 $\alpha$ : 定数で0.54、*fv*: バルブの損失係数、*g*: 重力加速度( $m/\text{hour}^2$ )、 $r_{ij}$ は管路固有の定数で、 $r_{ij} = 0.27853 C_{ij} D_{ij}^{2.63} \ell_{ij}^{-0.54} (m^{2.46}/\text{hour}) \dots (3)$   $C_{ij}, D_{ij}, \ell_{ij}$ 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、2次項以降を小さいとして切り捨てて線形化を行うと、 $H_i(k+1) - H_j(k+1) - f_{ij}(k) Q_{ij}(k+1) = H_i(k) - H_j(k) - f_{ij}(k) Q_{ij}(k) \dots (4)$ となる。ここに、 $f_{ij}(k) = (1/\alpha) r_{ij}^{-3/\alpha} |Q_{ij}(k)|^{\alpha-1} + 16fv / (g \pi^2 D_{ij}^5) |Q_{ij}(k)|$  ( $\text{hour}/m^2$ )  $\dots (5)$ 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*: 定数行列、*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、 $\Phi$ : 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。

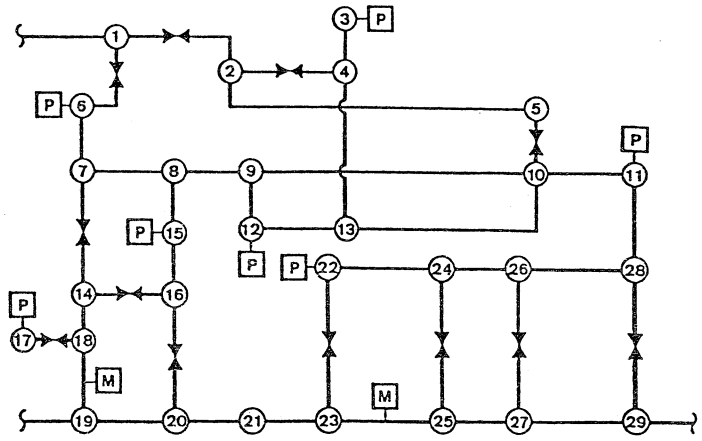
3. 適用例とその考察 2.で述べた手法を図-1に示す福岡市の実際の配水管網に適用することを考える。まず節点29個の需要量および節点1と節点19の外部流入量、さらに節点1の水頭を選んで周期的確率モデルで表す。例えば節点*i*での需要量については、 $q_i(k) = M_i + a_{i1} \sin 2\pi F_{i1}k + b_{i1} \cos 2\pi F_{i1}k + a_{i2} \sin 2\pi F_{i2}k + b_{i2} \cos 2\pi F_{i2}k + u_i(k) \dots (8)$ ここに、 $u_i: N(0, \sigma_i^2)$ の正規性白色雑音。式(8)の周波数成分 $F_i$ は既知として、平均値 $M_i$ と $F_i$ に対する振幅 $a_i, b_i$ を同定すべきパラメータすなわち式(6)、式(7)における状態量*x*とした。また、弁の開度は、図-1中の弁を(i) 100, 200, 300時点で開度を変化させる弁 (ii) 150時点で開度を変化させる弁の2種類に大別し、既知とした。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-2に示す。ここで、図-2において実線で示される真値は、式(8)により各時点毎に模擬発生させた需要量等を用いて管網計算を行った336時間分のシミュレーションデータであり、○印のついた滑らかな線が予測値を表している。この図より流量 $Q_{7,14}$ (節点7, 14間の流量)、水頭 $H_6$ については精度よく予測されている。また流量 $Q_{1,6}$ 、需要量 $q_{1,6}$ についても真値の変動の傾向を大むねよく表わしている。さらに $Q_{1,6}$ につい

ては、150時点での12個のバルブのうち6個を変化させたのに伴い、流量が増えている様子がわかる。次に図-3は $q_{16}$ を表す周期関数の振幅の一つの同定過程を示しており、図中の破線はそのパラメータの真値を示している。図-3(a)は、図-2に示した予測を行った際の同定過程で、図-3(b)は弁開度の変化と同時に、これまで同定されたパラメータを初期値としてその時点から新たにカルマンフィルターを起動させた場合の同定過程を示している。ここで、例えば現時点の1時点先で弁開度が増える場合を想定してみよう。式(6)中の観測量 $y$ の1時点先の最適推定値は、現時点までに得られた情報で求めた式(7)中の状態量 $x$ により求められる。一方1時点先になって実際に得られる観測量 $y$ は弁開度が増えているため、現時点までの情報(すなわち弁開度が増えていないという情報)で求められた予測値との間にイノベーションを生じることになる。このイノベーションの影響を受けて、図-3(a)に示したように一度真値に収束したパラメータが弁開度の変化とともに真値からはずれていくことになる。一方、図-3(b)では弁開度の変化後、パラメータは僅かに振動するものの、すぐに真値に再収束している。一般に、カルマンフィルターではパラメータや共分散行列の値が一定値にほぼ収束し終った時点においては、弁開度の変化に伴って生じた新しいシステム変化に対応できないが、弁開度の変化と同時にカルマンフィルターを再起動することにより、パラメータは直ちに真値に収束したと考えられる。

4. むすび 以上のように、管路のいくつかのセンサ情報を利用して、電動調節弁の開度が増える場合も含めて配水ネットワークの各節点における水需要量、流量および水頭のオンライン予測を精度よく行うことが可能であると考えられる。

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。



①: 節点 i P: 水圧計 M: 流量計 ◀▶: 電動調節弁

図-1 配水管網モデル

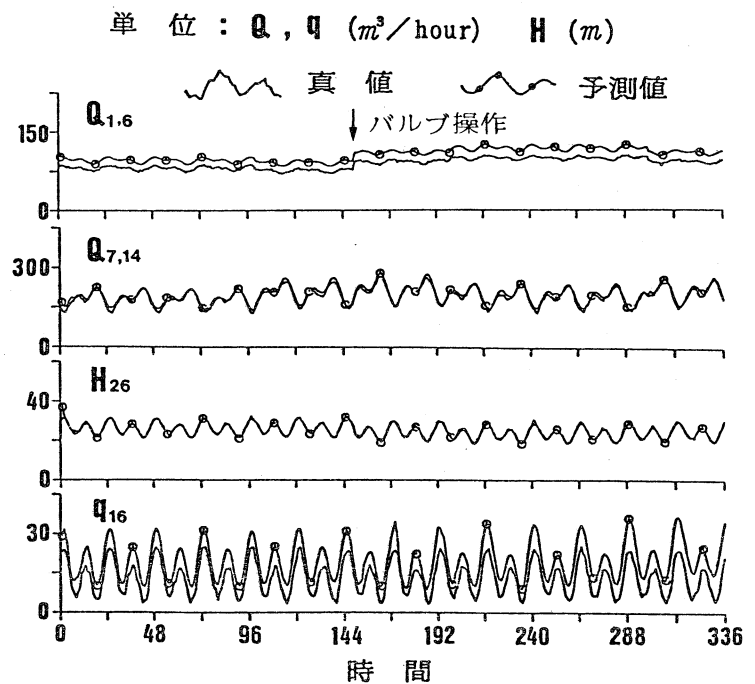


図-2 需要量、流量および水頭の真値と予測値

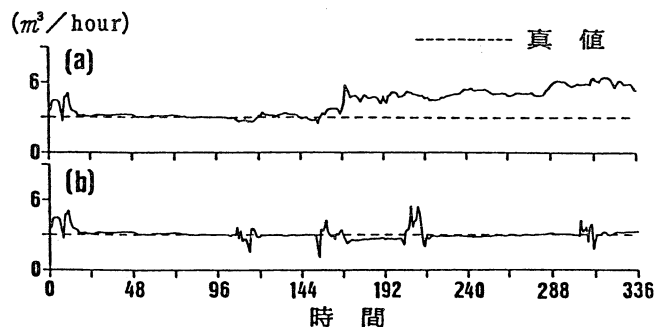


図-3 パラメータ ( $q_{16}$ を示す周期関数の振幅の一つ) の同定過程