

II-460 センサ情報を用いた配水管網の水需要量予測について

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 近年、都市の上水道の配水システムが大規模・複雑化するに伴い、配水の最適運用を行うことが困難となってきている。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、まず配水管網内の主要管路の流量および水圧が時々刻々センサ情報として計測されるとして、これらを利用して非定常の需要量をカルマンフィルタ理論を用いて予測し、これより未知の管路流量と水圧を予測してゆく手法を提案する。次に、予め需要量、管路流量、水圧を模擬発生させた配水管網に本手法を適用して、計算結果の検討により本手法の妥当性、有効性の考察を行った。

2. 計算手法 配水管網の基礎方程式として、各節点における連続式と、各管路における水頭損失式とがあり、常に流量連続条件と水頭閉合条件が満足されなければならない。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： $H_i(k) - H_j(k) = r_{ij}^{-1/\alpha} \cdot |Q_{ij}(k)|^{1/\alpha-1} \cdot Q_{ij}(k) \dots (2)$ を満足しなければならない¹⁾。ここで、*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、 r_{ij} は管路固有の定数で、 $r_{ij} = 0.27853 C_{ij} D_{ij} \ell_{ij} (m^2 \cdot 96 hour^{-1}) \dots (3)$ 、 C_{ij} 、 D_{ij} 、 ℓ_{ij} はそれぞれ節点*i, j*間の管路の流速係数($m^{0.37} hour^{-1}$)、管径(m)、管路長(m)。さて、カルマンフィルタ理論は線形推定理論であるため、本理論を適用するにあたっては基礎方程式のうち*Q*について非線形である水頭損失式(2)を線形化する。すなわち式(2)をTaylor展開し1次の項までとると、 $H_i(k+1) - H_j(k+1) - f_{ij}(k) \cdot Q_{ij}(k+1) = H_i(k) - H_j(k) - f_{ij}(k) \cdot Q_{ij}(k) \dots (4)$ となる。ここで、 $f_{ij}(k) = (1/\alpha) r_{ij}^{-1/\alpha} \cdot |Q_{ij}(k)|^{1/\alpha-1}$ 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る。各節点における需要量は、何らかの関数式(例えば、周期関数や自己回帰式など)で与え、それに含まれるパラメータをカルマンフィルタ理論の状態量として推定する。ここで、管網内の総節点数を n_1 個、総管路数を n_2 個、外部流入量数を n_3 個とすると、未知数は各管路流量と各節点の水頭および外部流入量の計($n_1 + n_2 + n_3$)個となる。一方、方程式は式(1)と式(4)でその数は、($n_1 + n_2$)個であるので、未知数の数が方程式の数に比べて n_3 個だけ多くなる。そこで、管路流量、水頭および外部流入量のうち n_3 個を管網の流れが一意に決まるように、需要量と同様関数式として与え、それに含まれるパラメータもカルマンフィルタで同定することにより n_3 個の未知数を推定する。パラメータの同定方法は、状態方程式： $x(k+1) = \Phi(k) \cdot x(k) + u(k) \dots (5)$ と観測方程式： $y(k) = H(k) \cdot x(k) + F(k) + w(k) \dots (6)$ 、(ここで、 x : 状態量ベクトル、 Φ : 遷移行列、 u : システム雑音、 y : 観測ベクトル、 H : 観測行列、 F : 定数行列、 w : 観測雑音)より求められる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および水頭とのズレ(イノベーションと呼ばれる)をフィードバックしてカルマンフィルタ理論によりパラメータを修正する。

3. 適用例とその考察 2.で述べた手法を図-1のような配水管網モデルに適用することを考える。この場合、 $n_1 = 4, n_2 = 5, n_3 = 2$ であり、まず需要量 $q_1 \sim q_4$ および $n_3 = 2$ 個分の流量、水

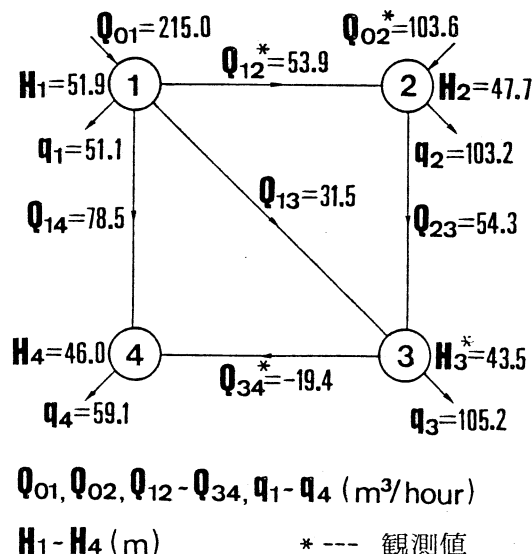


図-1 管網図

頭として Q_{01}, H_1 を周期関数と確率変動項との和として表わし、336時点模擬発生させた。例えば、 $q_i(k) = M_i + a_{i1} \sin 2\pi f_{i1}k + b_{i1} \cos 2\pi f_{i1}k + a_{i2} \sin 2\pi f_{i2}k + b_{i2} \cos 2\pi f_{i2}k + u_i(k) \dots (7)$ ここに、 $u_i : N(0, \sigma_i^2)$ の正規乱数。次に、各時点毎にHardy-Cross法により流量連続条件と水頭閉合条件を満足するように各管路流量および水頭を計算し、このようにして得られた各値を流量、水頭の真値とする。これらの値の一部を図-2の実線として、また151時点目の値を図-1中に数値として示している。ここで、式(7)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とする。この例題の場合、流入量 Q_{02} 、流量 Q_{12}, Q_{34} 、水頭 H_3 がセンサ情報として時々刻々計測されるものとし、 $q_1 \sim q_4, Q_{01}, H_1$ に対する平均値と振幅とからなるパラメータを式(5), (6)の状態量 x (30次元のベクトル)とし、式(6)の $y = [Q_{02}, Q_{12}, Q_{34}, H_3]^T$ である。以上のようにして、需要量、流入量、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。図-2において Q_{12}, H_2 については非常に精度よく予測されており、 q_2 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。この図以外の需要量、管路流量等も、この図と同様の精度となっていた。また、図-3はカルマンフィルターにより予測を行う際のパラメータの初期値の誤差の影響を示している。図-3において、パラメータの初期値の誤差に比例して需要量および流量の予測精度が劣化し、さらにパラメータの初期値が真値に近い場合は、観測値、非観測値を問わず精度よく予測されるが、初期値が真値と大きく異なると、特に非観測値に対する予測精度が劣化することがわかる。次に、カルマンフィルターの計算に用いるセンサ情報の観測雑音の分散 W の見積りの誤差が予測精度に及ぼす影響について検討した結果、パラメータの初期値が真値に近い場合は、 W を小さめに見積った方が予測精度が向上し、また非観測値に対する予測精度が W の見積りにより大きく影響されることがわかった。

4. むすび 以上のように、管路のいくつかのセンサ情報を用い、カルマンフィルター理論を適用した本手法により、配水管網の各節点における水需要量予測および流量、水頭の予測をオンラインで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) 綾 日出教：「配水施設のシミュレーション(I)」、水道協会雑誌、第559号、昭和56年4月

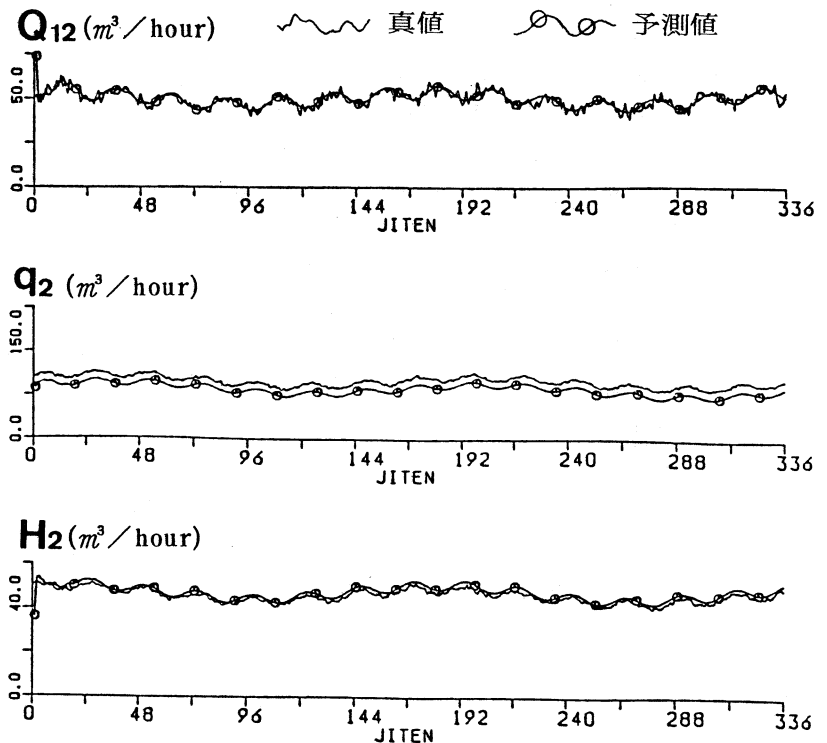


図-2 流量、需要量および水頭の真値と予測値

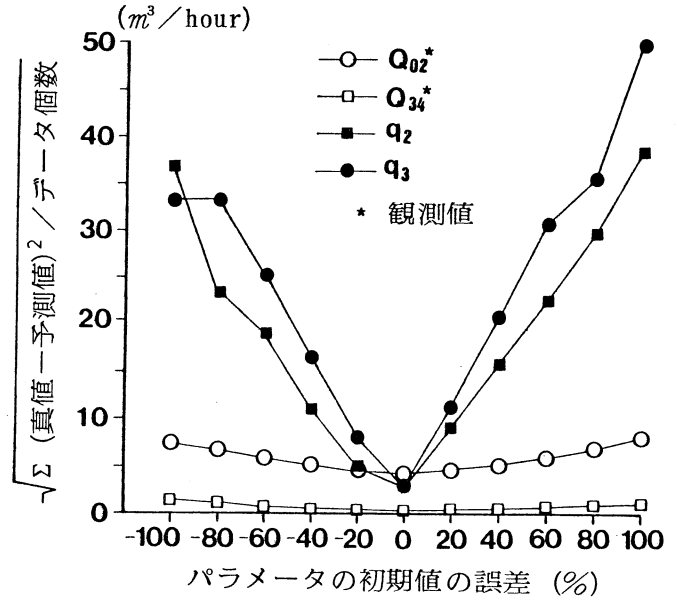


図-3 パラメータの初期値の影響