

福岡市配水管網系における 節点需要量のオンライン予測

河村 明^{*}, 神野 健二^{*}, 小谷 辰士^{**}

*九州大学工学部水工土木学科
福岡市東区箱崎6-10-1

**岡山市下水道局
岡山市升田614-11

概要

大規模で複雑な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うには、配水管網内の過大な水圧分布を抑制して漏水量の軽減するとともに、需要者への供給水圧を適正な値に保つ必要がある。このためには水圧の変動に大きく影響する配水管網系内の各節点での需要量を実時間で精度良く予測する必要がある。

著者らは、配水管網内に設置された流量計および水圧計から時々刻々送られてくるセンサ情報を利用して、すべての節点での非定常の水需要量をカルマンフィルター理論でオンライン予測し、同時にすべての管路流量および節点水頭も予測する手法を提案し、本手法をシミュレーションデータに適用して、本手法の有用性および種々の特性について検討を行った^{1)~3)}。本研究では、まず福岡市の第9区画配水管網系に設置されている流量計、水圧計および電動調整バルブの3週間分の時間データについてその特性解析を行った。次いで、各節点での需要量を表す関数式として周期関数式、自己回帰式およびそれらの混合式を想定し、上述のデータに上記手法を適用し、節点需要量、管路流量および節点水頭のオンライン予測を行い、その結果について検討を行った。

キーワード

配水管網系 オンライン予測 節点需要量 カルマンフィルター センサ情報 管路流量 節点水頭

1. 計算手法

配水管網の基礎式は、任意の節点*i*における連続式(1)と任意の2接点*i, j*間の管路について水頭損失式(2)(ここでは水道管網によく用いられるHazen-Williamsの式を用いる)である。

$$\sum_j Q_{ij}(k) = -q_i(k) \quad (1)$$

$$H_i(k) - H_j(k) = r_{ij}^{-1/\alpha} |Q_{ij}(k)|^{1/\alpha} + \{8 f_{vij} / (g \pi^2 d_{ij}^4)\} |Q_{ij}(k)| \quad (2)$$

(ただし、式(2)の右辺第2項はバルブを有する管路についてのみ必要)

ここに、 $| \cdot |$: 絶対値記号, α : 定数で0.54, k : 時点, Q_{ij} : 節点*i*から*j*に流れる流量(m^3/h), q_i : 節点*i*における水需要量(m^3/h), H_i, H_j : 節点*i, j*における全水頭(m), f_{vij} : 節点*i, j*間の管路のバルブ損失係数, g : 重力加速度(m/h^2), r_{ij} : 管路*i, j*固有の定数で、

$$r_{ij} = 0.27856 c_{ij} d_{ij}^{2.63} L_{ij}^{-0.54} (\text{m}^{2.46}/\text{h}) \quad (3)$$

c_{ij}, d_{ij}, L_{ij} : それぞれ節点*i, j*間の管路の流速係数($\text{m}^{0.37}/\text{h}$), 管径(m), 管路長(m)

次に、カルマンフィルター理論を用いて節点需要量を予測するため、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次の項までとると次式となる。

$$H_i(k+1) - H_j(k+1) - F_{ij}(k) Q_{ij}(k+1) = H_i(k) - H_j(k) - F_{ij}(k) Q_{ij}(k) \quad (4)$$

$$\text{ここに、} F_{ij}(k) = (1/\alpha) r_{ij}^{1-\alpha} |Q_{ij}(k)|^{\alpha-1} + \{16 f_{ij} / (g \pi^2 d_{ij}^4)\} |Q_{ij}(k)| \quad (5)$$

式(4)は、バルブ開度は一定とし、節点水需要量の変化に起因する水頭差の変化の遷移式である。したがって、管網計算の基礎式は、連続式(1)と水頭損失式(2)または(4)となる。カルマンフィルターの計算では式(1)と式(4)を主として用いる。

いま管網の節点数 n_1 、管路数 n_2 、外部からの流入出量数 N とすれば、管網計算における既知量(与える量)として、 n_1 個の節点需要量、 $(N-1)$ 個の外部流入出量および1個の基準節点水頭をとる。そしてこの管網計算における既知量が何らかの関数式で表されるとする。本研究では、例えば節点需要量 $q_i(k)$ として、次の周期関数式、自己回帰式およびそれらの混合の式を考える。

$$q_i(k) = M_i + \sum_{n=1}^{\ell_1} \{a_{in} \sin(2\pi f_{in} k) + b_{in} \cos(2\pi f_{in} k)\} + v_i(k) \quad (6)$$

$$q_i(k) = c_{i0} + \sum_{n=1}^{\ell_2} c_{in} q_i(k-n) + v_i(k) \quad (7)$$

$$q_i(k) = M_i + \sum_{n=1}^{\ell_1} \{a_{in} \sin(2\pi f_{in} k) + b_{in} \cos(2\pi f_{in} k)\} + \sum_{n=1}^{\ell_2} c_{in} q_i(k-n) + v_i(k) \quad (8)$$

ここに、 ℓ_1 : 周期関数式の次数、 M_i : 平均値、 a_{in}, b_{in} : 振幅、 f_{in} : 周波数成分、

ℓ_2 : 自己回帰式の次数、 c_{i0} : 定数、 c_{in} : 自己回帰係数、 v_i : $N(0, \sigma_i^2)$ の正規性白色雑音
 上式における $M_i, a_{in}, b_{in}, c_{i0}, c_{in}$ および $q_i(k-n+1)$ ($n=1 \sim \ell_2$)をカルマンフィルターの状態量として推定し、これらの推定された状態量を用いて節点需要量の予測を行う。カルマンフィルターでは、状態量の最適推定値は、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および水頭との誤差をフィードバックして逐次オンラインで求められる¹⁾⁻³⁾。なお、式(7)、式(8)を用いた場合はカルマンフィルターの状態方程式が非線形となるため、拡張カルマンフィルターを用いる³⁾。

2. 実データの解析

図-1に示す福岡市第9区画配水管網系を示す。本管網内には流量計5個、水圧計6個、電動調整バルブ16個が設置されている。本研究ではまず、それぞれの計器からの昭和63年7月24日から8月13日までの21日間の経時データ504個の実データより、流量、水圧などの変動特性について検討を行う。

図-2に、節点20, 21間の流量計(M-301)および節点15の水圧計(P-305)のデータの自己相関係数を示している。図-2(a)よりM-301では顕著な24時間周期がみられる。このことは他の流量計でも同様であった。一方、図-2(b)のP-305については自己相関係数の値は小さく周期性はみられない。このことは他の水圧計についても同様であった。これは福岡市の場合、電動調整バルブによる水圧の制御を行っており、水需要量の変動の影響以上にバルブによる制御の影響が強く作用しているためと考えられる。なお、バルブと流量計およびバルブと水圧計のデータの相

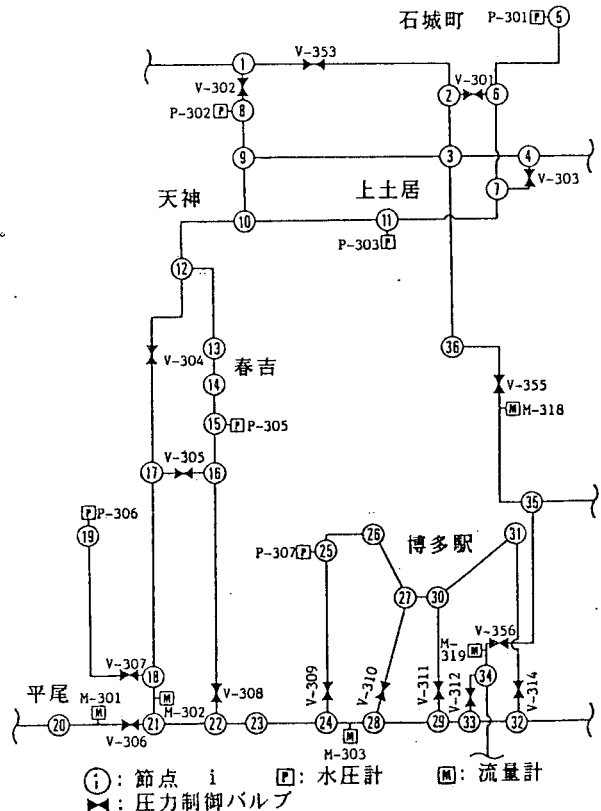


図-1 福岡市第9区画配水管網系

互相関を取ると周期性がみられた。次に、図-3には最大エントロピー法⁴⁾によるM-301の流量計データのスペクトル解析の結果を示している。この図より流量は24時間と12時間の周期が卓越しているといえる。この傾向は他の流量計のデータについても同様であった。しかし水圧計のデータに対してはとくに卓越しているとみなされる周期は見られなかった。

以上より、第9区画配水管網系内での流量および水圧の変動は、一般的に考えられている24時間と12時間の周期成分を持つ水需要の変動と、バルブ開度の変化が起因するものと考えられる。

3. 予測手法の適用結果と考察

1. で述べた手法を図-1に示した管網系の流量計、水圧計およびバルブ開度の実データに適用する。図-1の管網系は総節点数36、総管路数44、外部からの流入出力6である。

式(6)に対しては2.で得られた変動特性より、 $q_{11}=1/24$ 、 $f_{11}=1/24$ 、 $f_{12}=1/12$ (1/時間)とする。また推定すべき状態量 x の個数が多すぎないように、式(7)に対しては $q_{22}=2$ 、式(8)に対しては $q_{11}=1$ 、 $f_{11}=1/24$ 、 $q_{22}=2$ とする。以上の条件の下で、計算時間間隔1時間で、式(6)~式(8)の関数式の場合について、節点需要量、管路流量および節点水頭の1時間先を予測した。図-4、図-5にそれぞれ式(7)および式(8)を用いた場合の結果の一部を示す。これらの図より、観測量である Q_{20} 、 Q_{21} 、 H_{15} についてはいずれの関数式を用いた場合にも精度よく予測されている。しかし式(6)の周期関数式を用いた場合は、 H_{15} の予測値の変動傾向は図-4、図-5と異なり、精度もやや低くなった。また非観測流量 Q_{27} 、および非観測水頭 H_{10} についても、周期関数式による変動特性は図-4、図-5の自己回帰式および混合型の式の変動傾向とは異なっていた。特に、水頭の予測値に対しても周期性が見られ実データの傾向とはやや異なっていた。次に節点需要量 q_{12} 、 q_{29} についてみると、図-5の場合、日周期が見られるが、図-4の自己回帰式の場合、日周期がなく現実的でないと考えられる。

以上より、節点需要量の変動モデルとしては周期関数式と自己回帰式の混合の式が精度良い予測が可能であるといえる。ただし、この場合の計算時間は九大計算機センターのFACOM M-780/20で452秒要し、周期関数式の場合の248秒、自己回帰式の252秒に比べ長時間を必要とした。

4. むすび

本研究は、配水管網内に設置された流量計および水圧計から時々刻々得られるセンサ情報を利用して、カルマンフィルター理論により配水管網内の節点需要量と管路流量および節点水頭をオンラインで予測する手

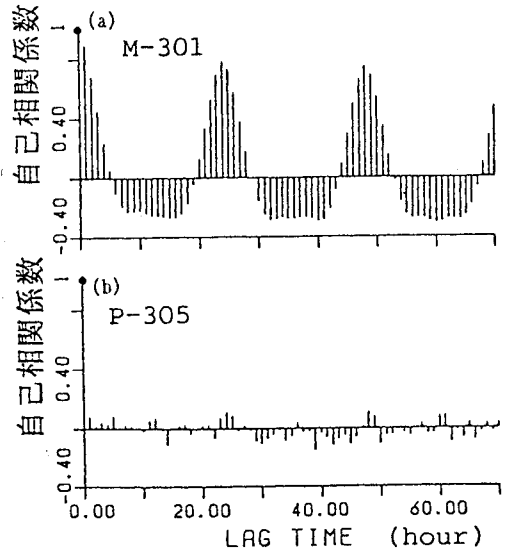


図-2 自己相関関数

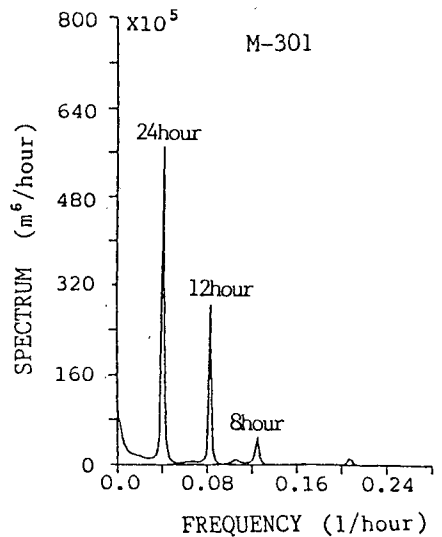


図-3 スペクトル図

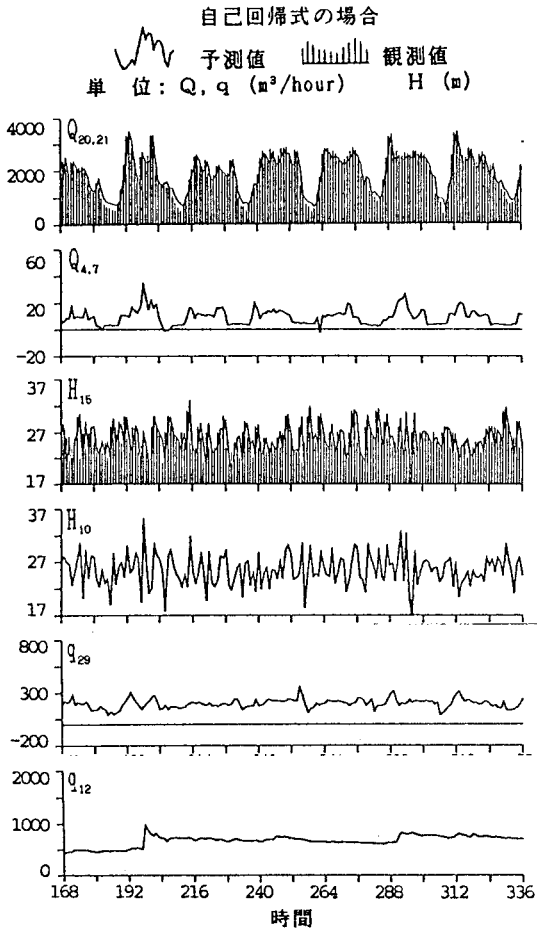


図-4 需要量、流量、水頭の予測値

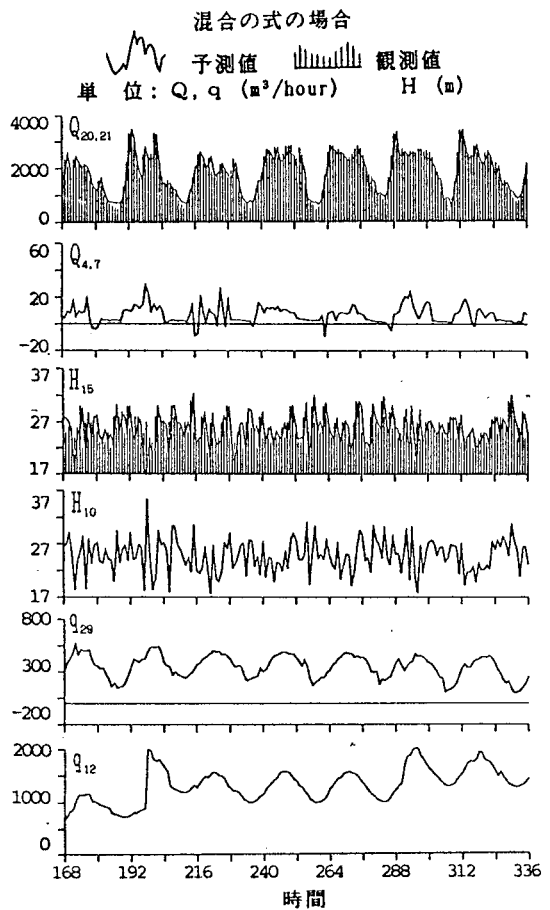


図-5 需要量、流量、水頭の予測値

法を福岡市第9区画配水管網系の実データに対して適用した。その結果、本手法により精度良い節点需要量、管路流量、節点水頭の予測が可能であることを示した。また節点需要量のモデルとして周期関数式と自己回帰式の混合型のモデルを用いた場合に適合度が高いことを示した。

おわりに、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ならびに水道局計画課の方々に貴重な資料を提供して頂き、またご懇切なご助言を賜りました。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) Kawamura, A., Jinno, K., Ueda, T., Doi, K. and Medina, R. R. (1988). On-Line Prediction Method for Water Demands in City Water Supply Network System. In: Water Resources and Hydrology, Proceedings of the 6th Conference of the Asian and Pacific Regional Division of the International Association for Hydraulic Research, pp. 277-284
- 2) 河村 明・神野健二・上田年比古・小谷辰士: 自己回帰モデルによる配水管網系の節点需要量のオンライン予測, 九州大学工学集報, 第62巻, 第2号, pp. 83-90, 1989年3月.
- 3) 河村 明・神野健二・上田年比古・土井敬介: 上水道配水管網系の節点需要量のオンライン予測に関する研究, 土木学会論文集, 第405号, pp. 245-254, 1989年5月.
- 4) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, pp. 219-227, 1977年