

センサ情報を用いた配水管網の流量・水圧・需要量の予測

上田 年比古*・神野 健二*
河村 明*・土井 敬介****Prediction of Pipe Discharges, Hydraulic Pressures and Water Demands
in Water Supply Network using Sensor Information**Toshihiko UEDA, Kenji JINNO, Akira KAWAMURA
and Keisuke DOI

(Technology Reports of the Kyushu University Vol. 59, No. 5, October 1986)

The method for on-line predictions of pipe discharges, hydraulic pressures and water demands is proposed for the optimal control of urban water supply network. This method is based on the Kalman filtering theory, which uses continuous sensor information on some of the pipe discharges and hydraulic pressures in the network.

The equation of continuity and the linearized equation of head loss of the water supply network are used, and then the prediction algorithm is developed. To show its effectiveness and usefulness, this method is applied to a simple water supply network. The basic characteristics of the method are investigated in detail.

1. はじめに

近年、多くの都市では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た。配水の最適運用を行うには、水圧分布の適正化を図り漏水量を抑制すると共に需要者への供給水圧を確保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流量、水圧および需要量の精度よい予測が必要となる。このため福岡市では昭和53年の大濁水をきっかけとして配水調整事業に取り組み、現在は市内の主要な配水管に水圧計99個、流量計47個、電動調節弁123個を取り付け、本局に設置する監視装置で水圧計、流量計から時々刻々得られる情報より給水の状況を把握し、遠隔操作による電動調節弁の作動により、各浄水場相互の流量調節を行っている。

著者らはこれまでに、福岡市の各浄水場における日配水量の変動特性および予測について検討を行っている

る¹⁾が、本報ではさらに、これらのセンサ情報を利用して各節点での非定常の需要量を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も同時に予測してゆく手法を提案しその計算手法について説明している。次に、簡単な配水管網モデルにおいて、予め需要量、管路流量、水圧を模擬発生させたシミュレーションデータに本手法を適用して、その結果より本手法の妥当性、有効性を検討し、さらに本手法の特性、例えば予測精度に及ぼす初期値パラメーターの誤差の影響や観測雑音共分散の見積りの影響などについても検討を行っている。

2. 計算手法

2.1. 概要

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 において連続式 (1) と、任意の2節点 i, j 間の管路について水頭損失式 (2) (ここでは水道管網の計算で最もよく用いられている Hazen-Williams の式を用いる) を満足しなければなら

昭和61年6月16日 受理

* 水工土木学教室

** 水工土木学専攻修士課程

らない²⁾。

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

$$H_i(k) - H_j(k) = r_{ij}^{-1/\alpha} |Q_{ij}(k)|^{1/\alpha-1} Q_{ij}(k) \quad (2)$$

ここに、 H_i, H_j : 節点 i, j における水頭 (m), k : 時点, Q_{ij} : 節点 i から j に流れる流量 (m^3/hour) で $Q_{ij} = -Q_{ji}$, $|\cdot|$: 絶対値記号, q_i : 節点 i における需要量 (m^3/hour), α : 定数で 0.54, r_{ij} : 管路固有の定数で $r_{ij} = r_{ji}$ であり,

$$r_{ij} \triangleq 0.27853 C_{ij} D_{ij}^{2.63} l_{ij}^{0.54} (\text{m}^{2.46}/\text{hour}) \quad (3)$$

ここに、 \triangleq : 定義, C_{ij}, D_{ij}, l_{ij} : それぞれ節点 i, j 間の管路の流速係数 ($\text{m}^{0.37}/\text{hour}$), 管径 (m), 管路長 (m)。

さて、カルマンフィルター理論を用いて需要量を予測する場合を考えると、本理論が線形推定理論であるため、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) の線形化を行う。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。

$$\begin{aligned} H_i(k) - H_j(k) - f_{ij}(k-1) Q_{ij}(k) \\ = H_i(k-1) - H_j(k-1) - f_{ij}(k-1) Q_{ij}(k-1) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、

$$f_{ij}(k) \triangleq (1/\alpha) r_{ij}^{-1/\alpha} |Q_{ij}(k)|^{1/\alpha-1} (\text{hour}/\text{m}^2) \quad (5)$$

この線形化した水頭損失式 (4) を管網内のすべての管路に、また連続式 (1) をすべての節点に対してたてる。

各節点における需要量については、これが何らかの関数モデル (例えば、周期関数モデルや自己回帰モデ

ルなど) で表されるとし、それに含まれるパラメータをカルマンフィルター理論の状態量として推定し、この推定されたパラメータを用いて需要量の予測を行う。

ここで、カルマンフィルターは式 (6) で表される状態方程式により遷移するシステム状態量 x を推定するのに適用される理論で、 x は式 (7) の観測方程式を通してのみ観測される。

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + v(k) \quad (6)$$

$$y(k) = H(k)x(k) + F(k) + w(k) \quad (7)$$

ここに、 k : 時点, x : 状態量ベクトル, Φ : 遷移行列, v : 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。この場合、推定すべき未知パラメータを状態量 x にとると、 x の現時点での最適推定値は、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、すなわちイノベーションをフィードバックしてカルマンフィルター理論^{1),3)~5)}により求められる。

2.2. アルゴリズムの検討

理解を容易にするために、ここでは図-1 のような簡単な配水管網を例にとり計算手法について具体的に述べよう。この場合、管網の総節点数 $n_1=4$, 総管路数 $n_2=5$, 外部流入量数 $n_3=2(Q_{01}$ と $Q_{02})$ である。さて、この管網の 4 つの節点において連続式 (1) 式を、また 5 つの管路について線形化された水頭損失式 (4) 式をたてる。そしてこれらの 9 つの式をマトリックス表示すると次式のように表される。

$$\left[\begin{array}{cccccc|cccc} -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & & & \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & & & \\ \hline 0 & 0 & -f_{12}(k-1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -f_{13}(k-1) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -f_{14}(k-1) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -f_{23}(k-1) & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -f_{34}(k-1) & 0 & 0 & 1 & -1 \end{array} \right]$$

$$\begin{bmatrix} Q_{01}(k) \\ Q_{02}(k) \\ Q_{12}(k) \\ Q_{13}(k) \\ Q_{14}(k) \\ Q_{23}(k) \\ Q_{34}(k) \\ H_1(k) \\ H_2(k) \\ H_3(k) \\ H_4(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(k) \\ q_2(k) \\ q_3(k) \\ q_4(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & -f_{12}(k-1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -f_{13}(k-1) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -f_{14}(k-1) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -f_{23}(k-1) & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -f_{34}(k-1) & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{01}(k-1) \\ Q_{02}(k-1) \\ Q_{12}(k-1) \\ Q_{13}(k-1) \\ Q_{14}(k-1) \\ Q_{23}(k-1) \\ Q_{34}(k-1) \\ H_1(k-1) \\ H_2(k-1) \\ H_3(k-1) \\ H_4(k-1) \end{bmatrix} \tag{8}$$

ここで、式 (8) の右辺は既知として、左辺のベクトル項、すなわち k 時点における節点水頭 $n_1 (= 4$ 個)、管路流量 $n_2 (= 5$ 個) および外部流入量 $n_3 (= 2$ 個) を求める場合、未知数は $(n_1 + n_2 + n_3) = 11$ 個となる。一方、

方程式は式 (1) と式 (4) でその総数は、 $(n_1 + n_2) = 9$ 個であるので、未知数の数が方程式の数に比べて $n_3 = 2$ 個だけ多く、この方程式の解は不定であり、管網の流れは一意には決まらないことになる。そこで管網の流れが一意に定まるように、管路流量、水頭および外部流入量のうち n_3 個を需要量と同様、関数モデルを用いて推定することとし、この n_3 個の量に関する項を右辺に移項して需要量と同様に取り扱う。すなわち、モデルに含まれる n_3 個のパラメーターもカルマンフィルターで同定することとする。この場合、 n_3 個より多くの量を関数モデルを用いて需要量と同様の取り扱いをすると、今度は方程式の数の方が未知数の数より多くなってしまい、方程式としては不能の形となり取り扱いが複雑になるので、ちょうど n_3 個の量を関数モデルで表現するのがよいと考える。なお、この n_3 個の量は、式 (8) の左辺の行列のうち n_3 個の量に関する項を省いた行列が正則行列になるように選ぶ必要がある。そこで、例えば式 (8) の左辺のうち $Q_{01}(k)$ および $H_1(k)$ の 2 つの量に関する項を需要量と同様に扱い、右辺第 1 項に組み、右辺第 2 項の行列とベク

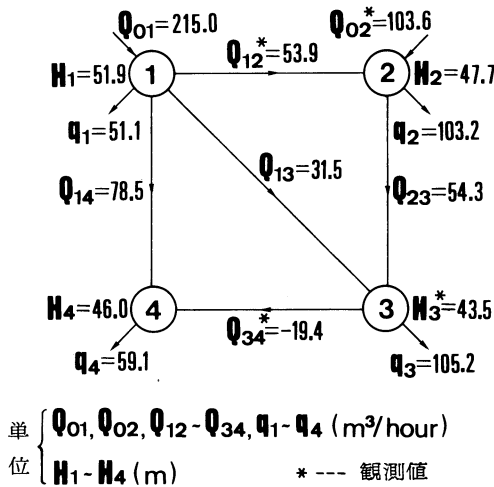


図-1 管網図。

トルをそれぞれ $B(k-1)$, $Z_1(k-1)$ とおくと式 (9) となる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & \vdots & & \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & & & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & & & \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & & & \\ \hline 0 & -f_{12}(k-1) & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -f_{13}(k-1) & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -f_{14}(k-1) & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -f_{23}(k-1) & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -f_{34}(k-1) & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{02}(k) \\ Q_{12}(k) \\ Q_{13}(k) \\ Q_{14}(k) \\ Q_{23}(k) \\ Q_{34}(k) \\ \vdots \\ H_2(k) \\ H_3(k) \\ H_4(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & \vdots & 0 & 0 \\ \hline & & & & 0 & -1 \\ & & & & 0 & -1 \\ & & & & 0 & -1 \\ & 0 & & & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(k) \\ q_2(k) \\ q_3(k) \\ q_4(k) \\ Q_{01}(k) \\ H_1(k) \end{bmatrix} + B(k-1)Z_1(k-1) \quad (9)$$

ここで、式 (9) の左辺および右辺第 1 項の行列およびベクトルをそれぞれ $A(k-1)$, $Z_2(k)$, C , $Z_3(k)$ とおくと、次式となる。

$$A(k-1)Z_2(k) = CZ_3(k) + B(k-1)Z_1(k-1) \quad (10)$$

式 (10) の両辺に正則行列 A の逆行列 A^{-1} を掛けると、未知ベクトル $Z_2(k)$ は次式で求められる。

$$Z_2(k) = A^{-1}(k-1)[CZ_3(k) + B(k-1)Z_1(k-1)] \quad (11)$$

さて、上記 $Z_2(k)$ のうち例えば、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する、式 (7) のカルマンフィルターにおける観測ベクトル $y(k)$ は、以下のように定式化される。

$$\begin{bmatrix} Q_{02}(k) \\ Q_{12}(k) \\ Q_{34}(k) \\ H_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Z_2(k) \quad (12)$$

ここで、式 (12) の左辺のベクトルおよび右辺の行列をそれぞれ $y(k)$, D とおいて、式 (12) に式 (11) を

代入すると、

$$y(k) = DA^{-1}(k-1) \times [CZ_3(k) + B(k-1)Z_1(k-1)] \quad (13)$$

次に、需要量 $q_1 \sim q_4$ および $n_3 = 2$ 個分の流量、水頭として取られた Q_{01} , H_2 を要素とするベクトル、すなわち式 (13) の $Z_3(k)$ を関数モデルで表す。ここでは、 $Z_3(k)$ の i 番目の要素を例えば次式のように周期的確率モデルで表現する。これは水需要およびこれにともなう流量、水頭がおおむね 1 週間周期、24 時間周期、12 時間周期で変動すること¹⁾を考慮したものである。

$$\{Z_3(k)\}_i = M_i + \sum_j^{p_i} (a_{ij} \sin 2\pi f_{ij}k + b_{ij} \cos 2\pi f_{ij}k) + u_i(k) \quad (14)$$

ここに、 $\{Z_3(k)\}_i$ ：需要量もしくは n_3 個分の流量または水頭、 k ：時点、 f_{ij} ：周波数成分、 p_i ：周波数成分の個数、 M_i ：平均値、 a_{ij} , b_{ij} ： f_{ij} に対する振幅、 u_i ：確率変動項で $N(0, \sigma_i^2)$ の正規性白色雑音。

ここで、簡単のため式 (14) のベクトル $Z_3(k)$ が 1 週間および 24 時間周期で変動する場合を想定して、 $p_i = 2$ (この例では $i=1 \sim 6$) としよう。具体的にマトリッ

クス表示すると、次式となる。

$$Z_3(k) = E(k)x(k) + u(k) \quad (15)$$

ここに、

$$E(k) = \begin{bmatrix} 1 & \sin 2\pi f_{11}k & \cdots & \cos 2\pi f_{12}k & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 & 0 & \vdots & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ & & & \cdots & \cos 2\pi f_{52}k & 0 & \cdots & & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & \cos 2\pi f_{62}k \end{bmatrix} \quad (6 \times 30 \text{ 行列}) \quad (16)$$

$$x(k) = [M_1 \ a_{11} \ b_{11} \ a_{12} \ b_{12} \ M_2 \ \cdots \ M_6 \ a_{61} \ b_{61} \ a_{62} \ b_{62}]^T \quad (30 \text{ 次元ベクトル}) \quad (17)$$

$$u(k) = [u_1(k) \ u_2(k) \ \cdots \ u_6(k)]^T \quad (18)$$

^T: 転置記号

さらに、式 (15) を式 (13) の Z_3 に代入すると、

$$y(k) = DA^{-1}(k-1)CE(k)x(k) + DA^{-1}(k-1)B(k-1)Z_1(k-1) + DA^{-1}(k-1)Cu(k) \quad (19)$$

となるので、この式を式 (7) の観測方程式と比較すると、

$$H(k) = DA^{-1}(k-1)CE(k) \quad (20)$$

$$F(k) = DA^{-1}(k-1)B(k-1)Z_1(k-1) \quad (21)$$

$$w(k) = DA^{-1}(k-1)Cu(k) \quad (22)$$

に対応することがわかる。以上により、式 (14) の周波数成分 f_{ij} は既知とし、 M_i および a_i, b_i を未知パラメーターとしてこれらを式 (17) のようなカルマンフィルターの状態量として置くことにより、観測方程式 (7) が構成される。また、上記パラメーター同定の問題の場合にはカルマンフィルターの状態方程式 (6) の行列 $\Phi = I$ (単位行列) となる⁹⁾。

以上より、初期管路流量、初期水頭そして式 (6) の x の初期値 $\hat{x}(0|0)$ および推定誤差共分散行列 $P(0|0)$ 、システム雑音の共分散行列 V および式 (7) の観測雑音の共分散行列 W を適当に与えれば、カルマンフィルターの理論により、式 (20)、(21) を用いて各時点毎に x の最適推定値が求められる。式 (15) の期待値をとれば需要量および n_3 個分の管路流量および水頭が予測でき、また上記以外の管路流量および水頭の予測は、式 (11) を用いて逐次予測されることになる。

3. 適用例

2.2. で示した図-1の管網モデルに本手法を適用し

てみよう。ここでは管網の各節点の需要量および水頭、各管路の流量の真値を 336 時点模擬発生させたシミュレーションデータに対して、本手法がこの真値の需要量、水頭、流量をどの程度予測できるかどうかを検討してみる。真値として、まず式 (14) を用いて需要量 $q_1 \sim q_4$ 、流量 Q_{01} 、水頭 H_1 を 336 時点模擬発生させる。この場合、 $p_i=2$ とし、各パラメーターの値および雑音 u の値は表-1 のように与えた。また、式 (3) の管路定数 r_{ij} は $[r_{12} \ r_{13} \ r_{14} \ r_{23} \ r_{34}] = [25 \ 10 \ 30 \ 25 \ 12] (\text{m}^2 \cdot \text{46} / \text{hour})$ を与えた。次いで、各時点毎に上記の $q_1 \sim q_4, Q_{01}, H_1$ を用いて Hardy-Cross 法⁷⁾ により流量連続条件と水頭閉合条件を満足するように、外部流入量 Q_{02} 、管路流量 $Q_{12}, Q_{13}, Q_{14}, Q_{23}, Q_{34}$ 、水頭 H_2, H_3, H_4 を計算しこれらの値を真値とした。これらの真値を図-2の実線として示している。また、151 時点における管網系の真の状態を図-1中に数値として示している。

次に、カルマンフィルターにおける式 (6) のシステム雑音の共分散行列 $V=0$ とし、式 (7) の観測雑音の共分散行列 $W (4 \times 4 \text{ 行列})$ は、対角成分に 10、非対角成分に 0 を与え、また式 (17) の x の初期値 $\hat{x}(0|0)$ と

表-1 模擬発生に用いたパラメーターの値。

| Z_3 | M_i (m^3/hour) | $f_{i1}=1/168$ (1/hour) | | $f_{i2}=1/24$ (1/hour) | | N ($0, \sigma_i^2$) |
|----------|---------------------------------------|--|--|--|--|--|
| | | a_{i1} (m^3/hour) | b_{i1} (m^3/hour) | a_{i2} (m^3/hour) | b_{i2} (m^3/hour) | σ_i (m^3/hour) |
| q_1 | 50 | 5 | 2 | 3 | 1 | 0.8 |
| q_2 | 100 | 8 | 3 | 5 | 2 | 1.5 |
| q_3 | 100 | 4 | 8 | 2 | 9 | 2.0 |
| q_4 | 50 | 2 | 8 | 5 | 1 | 1.0 |
| Q_{01} | 200 | 10 | 16 | 5 | 1 | 3.0 |
| H_1 | 50 (m) | 2 (m) | 3 (m) | 1 (m) | 1 (m) | 0.5 (m) |

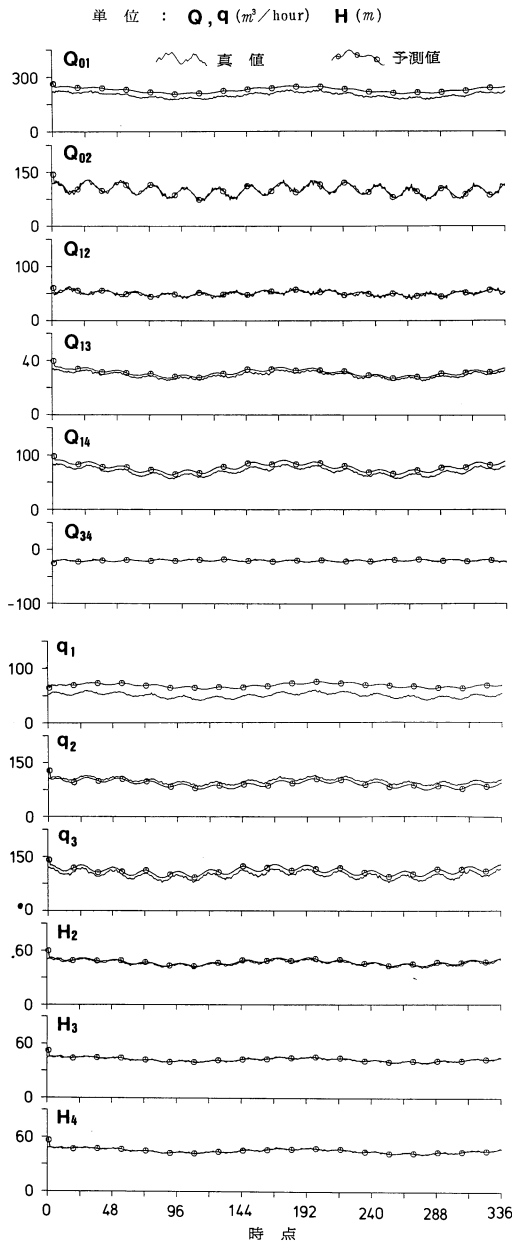


図-2 需要量, 流量, 水頭の真値と予測値.

しては表-1の真値より20%大きめの値を与え, その推定誤差共分散行列 $P(0|0)$ は, 対角成分に100, 非対角成分に10を与えた. なお, 式(20), (21)の $H(k)$, $F(k)$ の初期値は $\hat{x}(0|0)$ を用いて Hardy-Cross 法により計算した値を用いて計算した.

以上のようにカルマンフィルターの定数を設定して, 2. で述べた計算手法により需要量, 管路流量, 外

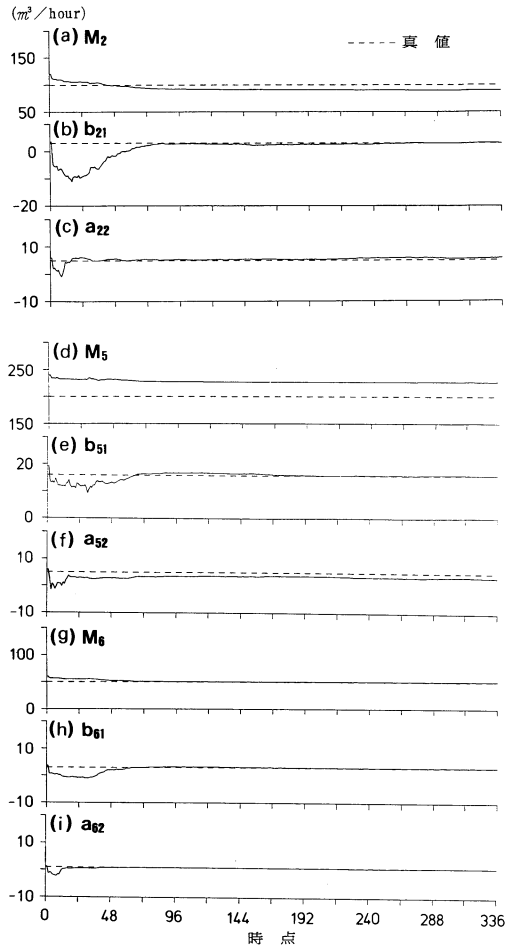


図-3 パラメーターの同定過程.

部からの流入量, 水頭の1時点先の予測値の一部を図-2に, また本手法による30個のパラメーターのうち一部の逐次同定過程を図-3に示している. なお, 図-2において○印のついた滑らかな線が予測値である. 図-4には, 上記のように設定したカルマンフィルター定数のうち $\hat{x}(0|0)$ の推定誤差に対する予測誤差の変化を示し, 図-5には $\hat{x}(0|0)$ の推定誤差が0%, +20%, +100%の各々に対し, W の対角成分のみを図の横軸のように変化させた場合の予測誤差の変化を示している. なお, 図-5の縦軸の予測誤差は, 図-4と同様に $\{\sum(\text{真値}-\text{予測値})^2/\text{データ個数}\}^{1/2}$ (m^3/hour)を用いている.

ところで, 本手法は線形化された水頭損失式(2)を用いているため, この線形化の際の Taylor 展開の2次以上のオーダーの切り捨てによる誤差の影響が考え

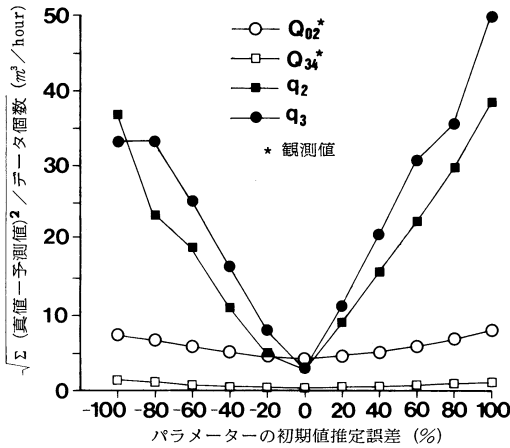


図-4 パラメータの初期値推定誤差の影響。

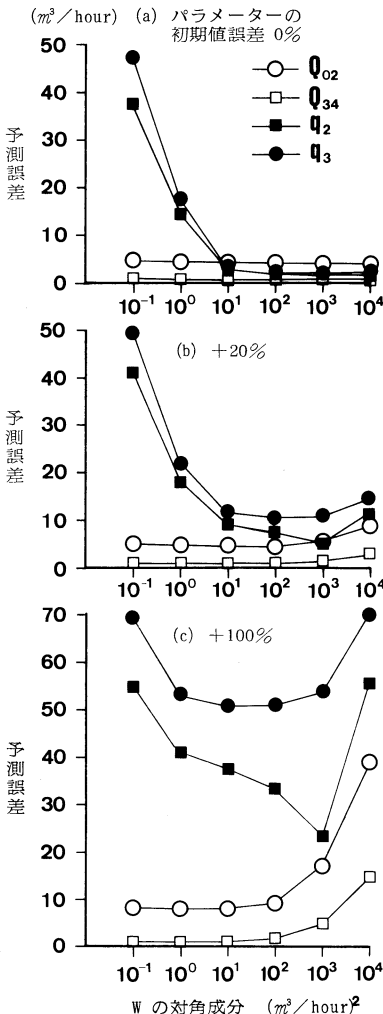


図-5 Wの設定値の影響。

られる。この誤差は、式 (11) の右辺に真値を代入して計算される $Z_2(k)$ の値と模擬発生した真値との差として評価されるが、検討の結果誤差は1%程度以内であった。よって、線形化による誤差は無視できるとして以後の考察を行った。

4. 考 察

図-2より、観測値である Q_{02} , Q_{12} , Q_{34} , H_3 の1時点先の予測結果を見ると、凹凸のある実測値(真値)を滑らかにしたようになって非常に精度よく予測されている。また、非観測値の水頭 H_2 , H_4 についても精度よく予測されている。次に、需要量および非観測の流量について見ると、予測値には若干のバイアスが見られるが、おおむね精度よく予測されている。

次に、図-3より各パラメータとも100時点程度でほぼ収束している。このうち需要量 q_2 、流量 Q_{02} の平均値 M_2 , M_5 のように、需要量、流量の平均値は真値から僅かにバイアスを生じて収束する傾向にあり、このため図-2の Q_{01} , $q_2 \sim q_4$ のように、この平均値のバイアスの分だけ予測値がずれているものと考えられる。しかし、その他の水頭に対する平均値や需要量、流量、水頭の周波数成分の振幅パラメータは、図-3(b), (c), (e), (f), (g), (h), (i) のように精度よく同定されている。ここで、図-3の100時点以前でパラメータが変動している場合でも、また M_2 , M_5 のように真値から少しはずれて収束している場合でも、予測値は図-2のように、観測値に対しては特に精度よく求まっていることは興味あることである。これは、各々のパラメータの同定値にバイアスが生じても式 (13) の振幅の組合せによって適応する傾向があるのではないかと考えられる。

次に、図-4よりパラメータの初期値誤差が大きくなると予測精度が低下する様子がわかる。すなわち、パラメータの初期値誤差が0%近くでは観測値、非観測値ともに予測誤差は小さい。パラメータの初期値誤差が大きくなると、これに比例して予測誤差が大きくなる。特に非観測値に対する予測精度の低下が著しい。一方、観測値に対する予測精度は、初期値誤差には影響されず余り低下しないようである。これは、カルマンフィルタが観測量の予測誤差しかフィードバックできず、観測量のみに適合させようとするからである。

次に、図-5の結果をもとに観測雑音の共分散行列 W が予測精度に及ぼす影響を見てみよう。まず観測値

Q_{02} , Q_{34} については、パラメーターの初期値 $\hat{x}(0|0)$ の誤差が小さい場合は図-5(a), (b)より W の影響は小さい。図-5(b)の20%の誤差では僅かながら W の値が10~100のとき予測誤差が小さくなる傾向がある。一方図-5(c)より $\hat{x}(0|0)$ の誤差が大きい場合、式(22)を用いて得られる真の W (対角成分がおおよそ1~10程度)よりも W を大きく設定すると予測誤差が大きくなり、 W が1程度で最小となっている。

次に非観測値 q_2 , q_3 をみると、 W の影響を強く受けていることがわかる。 W を真の値よりも小さく設定すると、特に $\hat{x}(0|0)$ の誤差が小さい場合に予測誤差は急激に大きくなっている。

以上の考察により、初期値の誤差が小さいときは W が真の値よりも大きい方が、大きいときは W が小さい方が予測誤差は大きくなる傾向にある。一般に、 W の設定が真の値よりも小さすぎると、入力される観測値の信頼度を高く見積りすぎることになるので、入力される観測値が雑音による異常値であっても正確に追従させようとして、パラメーターの同定値が小刻みに変動し不安定となる。逆に、 W の設定が大きすぎると、入力される観測値は雑音に大きく乱された値と見なすことになるので、パラメーターは初期値から修正されにくいことになる。他にも種々の W について計算したところ、真の W の値に対して W を小さく設定するよりも、ある程度大きく設定していた方が同定結果は安定し予測精度もよいようである。

次に、ここには示していないが観測量の増加に対する影響として、観測量については前述のように精度よく予測され、また非観測値に対しても予測精度が向上することを確認している。

5. む す び

本報は、管路網内のいくつかのセンサ情報を用いて、配水管網の各節点および各管路における水需要量、水頭および流量をカルマンフィルター理論によりオンラインで予測する手法を提案し、次いで本手法を簡単な

配水管網モデルに適用して、その妥当性、有効性および特性について検討を行った。その結果、観測値に対する予測は、本手法が必要量、流量、水頭の予測をオンラインで精度よく行え、その妥当性、有効性が示された。また、パラメーターの初期値の誤差や観測雑音の共分散行列の見積り等が、予測精度に及ぼす影響についても明らかにされた。

大規模で複雑な実際の配水ネットワークにおいて本手法を適用する場合は、その一部分をとりだすことによって、水需要量、管路流量および節点水頭の予測をオンラインで簡単かつ精度よく予測を行うことができると考える。

終りに、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所長をはじめ計画課の皆様および関係各位の方々には、御懇切な御助言を賜りました。また本研究は、昭和61年度文部省科学研究費、奨励研究(A)(研究代表者 河村明)の補助を受けました。ここに記して深謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 神野健二・河村 明・上田年比古：福岡市の浄水場における日配水量の変動特性と予測について、九大工学集報，第59巻，第4号，昭和61年8月。
- 2) 綾日出男：「配水施設のシミュレーション(I)」，水道協会雑誌，第559号，pp.29~42，昭和56年4月。
- 3) 日野幹雄：Kalmanの予測推定理論の平易な誘導について，東工大土木工学科研究報告，No.15，pp.91-99，1973年12月。
- 4) 上田年比古，河村 明，神野健二：適応的カルマンフィルターによる異常値検出について，土木学会論文集，第345号/II-1，pp.111-121，1984年5月。
- 5) 河村 明，神野健二，上田年比古：江川ダム上流域における流出特性の検討，九大工学集報，第58巻，第5号，pp.699-704，昭和60年10月。
- 6) 日野幹雄：水文流出系予測へのカルマン・フィルター理論の適用，土木学会論文報告集，第221号，pp.39-47，1974年1月。
- 7) 椿東一郎：水理学I，森北出版，pp.127-129，1973年。