

## 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

### Prediction Method for Water Demands in Large Scale Water Supply Network using Sensor Information

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、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流量、水圧および需要量の精度よい予測が必要となる。また、流量、水圧および需要量が時々刻々どのように変化するかを予測することは、配水池のコントロールを行うためにも必要である。

福岡市では昭和53年の大洪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個を取りつけ、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を作動させて、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、以上述べたような配水システムで配水管網内に設置された水圧計、流量計から時々刻々得られるセンサ情報を利用して、各節点での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も同時に予測する手法を提案している<sup>1)</sup>。本報では、まず福岡市の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、これに本手法を適用してその計算結果から予測精度の検討を行い、本手法の実用性の考察を行った。次に、本手法の特性、例えば予測精度に及ばずパラメータ初期値の誤差の影響、観測雑音共分散の見積りの影響さらに観測量の数の影響などについても検討を行った。

#### 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ない<sup>2)</sup>。

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

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

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 ( $\text{m}^3/\text{hour}$ ) で

$Q_{ij} = -Q_{ji}$ ,  $| |$  : 絶対値記号,  $q_i$  : 節点*i*における需要量 ( $\text{m}^3/\text{hour}$ ),  $\alpha$  : 定数で0.54,  $r_{ij}$  :

管路個有の定数 ( $\text{m}^{2.46}/\text{hour}$ ) で,

$$r_{ij}=r_{ji}\triangleq 0.27853C_{ij}D_{ij}^{2.63}l_{ij}^{-0.54} \quad (3)$$

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 ( $m^{0.37}/hour$ )、管径 (m)、管路長 (m)。

なお、雑音項として考えられる主要管路以外 (例えば、直径 100 mm 以下の管路) の流量や、あるいは管網内の漏水量はここでは無視して計算を行うものとする。

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、水圧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、次式ようになる。

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

ここに、

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

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。式(1)中の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ーをカルマンフィルター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圧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、この方程式の解は不定となり、このままでは管網の流れが一意に決まらないことになる。そこで、管路流量、水圧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表わし、これに含まれるパラメーターもカルマンフィルター理論の状態量として推定することにする。

ここで、カルマンフィルターは式(6)で表わ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、 $\Phi$  : 遷移行列、 $v$  : システム雑音、 $y$  : 観測量ベクトル、 $H$  : 観測行列、 $F$  : 定数行列、 $w$  : 観測雑音。

この場合、センサ情報として実際に計測される管路流量と節点水圧をカルマンフィルター理論の観測量  $y$  とすることにより、式(1)および式(4)の方程式は、式(7)のような観測方程式に変形することができる。また、推定すべき未知パラメーターを状態量  $x$  にとると、 $x$  の現時点での最適推定値は、1 時点先の流量や水圧の予測値と、センサ情報の流量および水圧との誤差、すなわちイノベーションをフィードバックして求められる。アルゴリズムの詳細については参考文献 1) を参考されたい。

### 3. 適用例

2. で述べた手法を図-1 に示すような配水管網モデルに適用することを考える。これは福岡市の 21 区画に分割された実際の配水管網系の第 9 区画を取り出したもので、管径、管路長および流量計、水圧計の配置は実際通りのデータを与えた。なお、管径および管路長の具体的な値については表-1 に示している。この場合、 $n_1 = 29$ 、 $n_2 = 37$ 、 $n_3 = 3$  である。そこで、各節点における 29 個の需要量と管網の流れが一意に決まるように管路流量、水圧および外部流入量のうちから  $n_3 = 3$  個を周期的確率

モデルで表わすことにする。なお、ここでは $n_3$ 個分の値として節点1と節点19の外部流入量、さらに節点1の水圧の3つを選んだ。例えば、節点 $i$  ( $i=1, 2, \dots, 29$ )の需要量の場合、

$$q_i(k) = M_i + a_{i1} \sin 2\pi f_{i1} k + b_{i1} \cos 2\pi f_{i1} k + a_{i2} \sin 2\pi f_{i2} k + b_{i2} \cos 2\pi f_{i2} k + u_i(k) \quad (8)$$

ここに、 $u_i: N(0, \sigma_i^2)$  の正規性白色雑音。

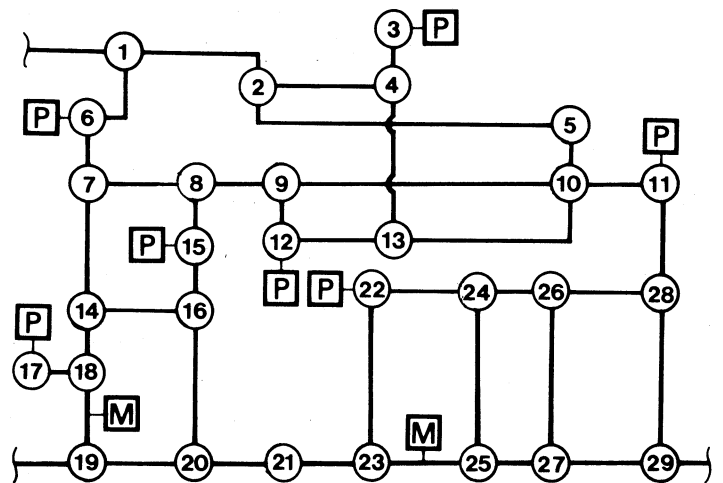
ここで式(8)の周波数成分 $f_i$ は、水需要量およびこれに伴う流量、水圧が1週間および24時間周期で変動する場合を想定したもの(既知)、また平均値 $M_i$ 、 $f_i$ に対する振幅 $a_i, b_i$ を同定すべきパラメーター、すなわち式(6)、式(7)における状態量 $x$ とした。また、節点3, 6, 11, 12, 15, 17, 22に水圧計、節点18~19と節点23~25間に流量計が設置され、センサ情報としてこれらの節点における水圧および節点間の流量が時々刻々計測されるものとする。

#### 4. 結果とその考察

(4・1) 需要量、流量および水圧の予測結果について

2. および3. で述べた手法を用いて需要量、流量および水圧の1時間先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)により各時間毎に模擬発生させた需要量等を用いて管網計算<sup>3)</sup>を行った336時間分のシュミ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わしている。

この図から、観測値である流量 $Q_{18,19}$  (節点18, 19間の流量)、水圧 $H_{12}$ の1時間先の予測結果をみると、小刻みに変動する真値を滑らかにしたようになっていて非常に精度よく予測さ



○; 節点  $i$     P; 水圧計    M; 流量計

図-1 配水管網モデル

れており、また非観測値の水圧 $H_{16}$ についても同様に精度よく予測されている。一方、需要量 $q_4, q_{14}$ と非観測流量 $Q_{10,11}$ については、真値の変動の傾向はとらえられているが予測値に若干のバイアスがみられる。

(4・2) パラメーターの初期値の影響について

図-3はカルマンフィルターにより予測

管路	φ直径(mm)-長さ(m)	管路	φ直径(mm)-長さ(m)	管路	φ直径(mm)-長さ(m)
1-2	φ 800- 850	9-12	φ 200- 200	21-23	φ 800- 550
1-6	φ 300- 400	10-11	φ 250-1000	22-23	φ 300-1200
2-4	φ 250- 400	10-13	φ 250- 100	22-24	φ 400- 300
2-5	φ 800- 600	11-28	φ 300- 600	23-25	φ 800- 400
3-4	φ 250- 400	12-13	φ 250- 500	24-25	φ 300-1000
4-13	φ 250- 800	14-16	φ 250- 100	24-26	φ 350- 200
5-10	φ 250- 100	14-18	φ 700- 850	25-27	φ 800- 550
6-7	φ 200- 800	15-16	φ 300- 100	26-27	φ 400- 600
7-8	φ 600- 750	16-20	φ 300-1100	26-28	φ 250- 500
7-14	φ 600-1100	17-18	φ 200- 600	27-29	φ 600- 350
8-9	φ 400- 300	18-19	φ 700- 150	28-29	φ 250- 800
8-15	φ 800- 200	19-20	φ 900- 200		
9-10	φ 400- 350	20-21	φ 900- 100		

表-1 配水管網モデルの管径と管路長

を行う際のパラメーターの初期値誤差が予測精度に及ぼす影響を示している。例えば図-3 (a) では、すべての需要量に対して各々予測誤差を図中に示す式により求めた後、1個の需要量当たりの平均予測誤差を計算し、それを横軸の値に対してプロットしたものである。図-3 (b), 図-3 (c) についても同様の計算を行っている。

この図からパラメーター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、パラメーターの初期値誤差が0%近くでは観測値、非観測値を問わず需要量、水圧、流量すべてについて予測誤差が小さい。一方、初期値誤差が大きくなると、特に需要量と非観測の流量の予測精度が低下している。水圧については、初期値誤差が大きくなると精度が著しく低下しているように見えるが、これは縦軸のスケールが水圧の真値に比べて小さいためで、実際は非常に精度よく予測されている。なお、予測精度を百分率で表わすことを考えると、予測精度 = (予測誤差/真値) × 100 (%) により求められる。従って、需要量、水圧および流量の真値の平均オーダーはそれぞれ 約  $15 (m^3 / hour)$ ,  $30 (m)$ ,  $150 (m^3 / hour)$  であるので、例えば図-3のパラ

メーターの初期値誤差10%におけるそれぞれの予測精度は25%, 2%, 8%程度である。

#### (4・3) 観測雑音の分散の影響について

図-4は、パラメーターの初期値誤差が0%, 20%, 50%の各々に対しカルマンフィルターの観測雑音の分散Wの見積りの誤差が予測精度に及ぼす影響を示している。なお、縦軸の予測誤差も図-3と同様に求め、横軸のWの値に対してそれぞれプロットしたものである。また、図-2の結果はパラメーターの初期値誤差が20%, Wの対角成分に100を与えた場合の予測値をプロットしたものである。

まず図-4 (a) において、観測流量の予測精度に対する観測雑音の分散Wの影響をみると、まずパラメーターの初期値誤差が0%のときはWの対角成分を大きく見積もった方がわずかながら予測精度が向上することがわかる。一方、初期値誤差が20%のときはWの対角成分を100から1000程度に、初期値誤差50%のときはWの対角成分を10から100程度にしたときが最も精度が

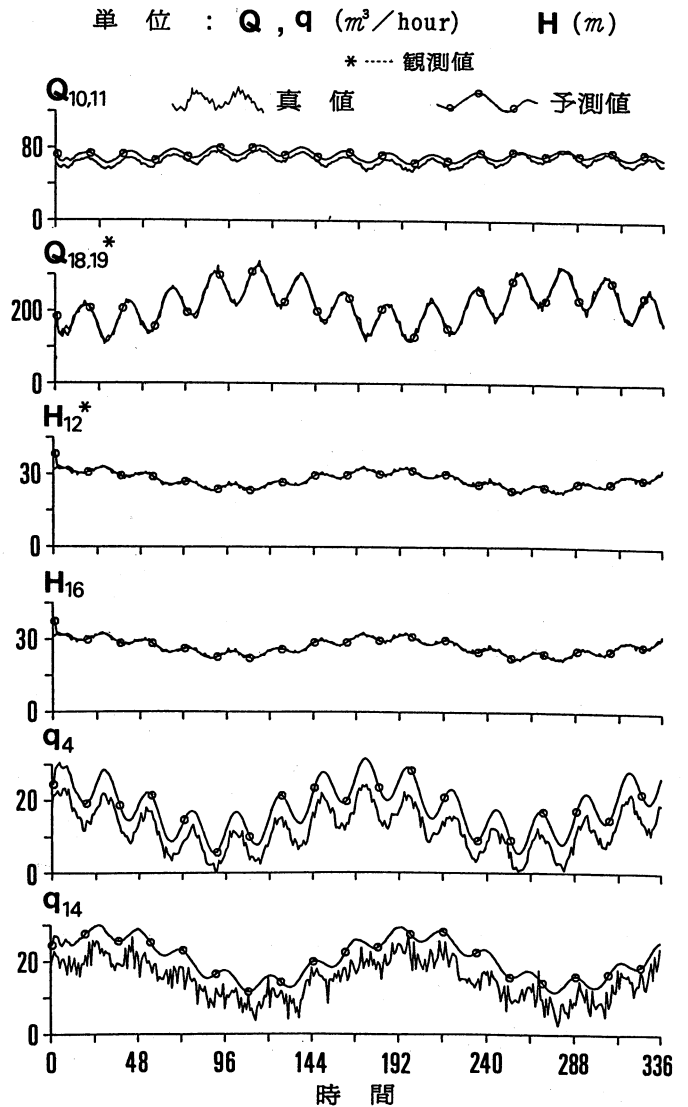


図-2 需要量、流量、水圧の真値と予測値

よくなっている。図-4 (b) の非観測流量についても、観測流量のときとほぼ同様の傾向がみられる一方、Wの対角成分が1程度のときにパラメータの初期値誤差の違いに関わらず、予測誤差が特に大きくなっている。一般に、Wの設定値が、カルマンフィルタ理論の中で計算されるWの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、入力される観測値が雑音に大きく乱された値とみなすことになるので、パラメータは初期値から修正されにくいことになる。

#### (4・4) 観測量の数および配置の影響について

図-5にはセンサ情報として観測される量を増した場合の需要量 $q_{14}$ の予測結果を示している。需要量予測の精度を向上させるため新たに流量計等を設置する場合、その配置の問題が考えられ、ここでは前出の計算例で需要量、流量等の予測誤差の大きかった付近に新たに流量計を設置し、その効果を検討してみよう。図-5 (a) は、図-1における流量計、水圧計に新たに節

点1~2間と節点20~21間に流量計を2個追加した場合を、図-5 (b) は、さらに節点2~5間と節点27~29間に流量計を2個、図-1において計4個追加した場合の予測結果である。

この図から観測量を増した場合の予測結果をみると、まず図-2中に示した需要量 $q_{14}$ の結果と比較して、図-5 (a) の流量計を2個追加した場合の方が明らかに予測精度が向上していることがわかる。さらに、図-5 (b) の流量計を4個追加した場合は、図-5 (a) に比べわずかながら精度が向上している。ここには示していないが、その他の需要量についても予測精度が改善されたことを確認した。また、流量計の代わりに水圧計を追加した場合についても検討してみたが、流量計を追加した場合に比べて需要量の予測精度の向上はわずかししか認められなかった。これは、流量の方が需要量と連続式においてダイレクトに結びついているためであると考えられ、従って需要量の予測精度を向上させるためには、水圧計よ

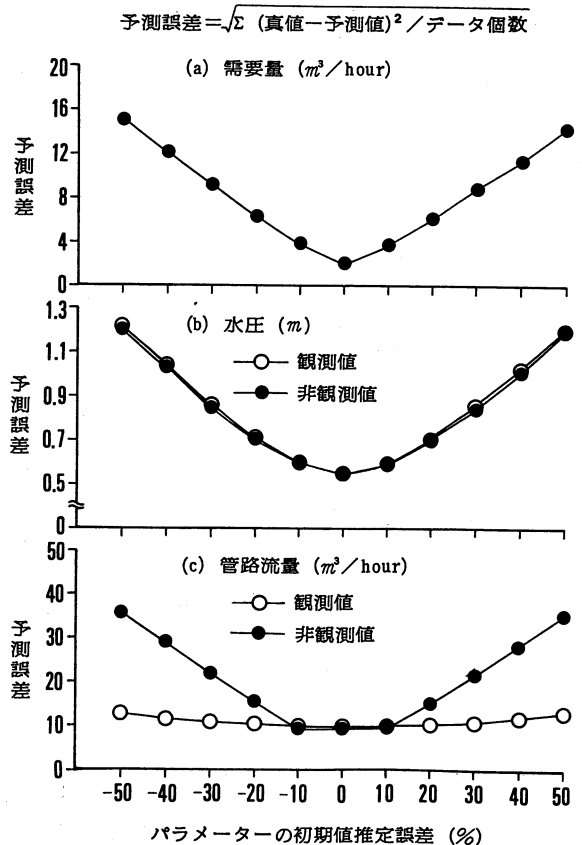


図-3 パラメータの初期値の影響

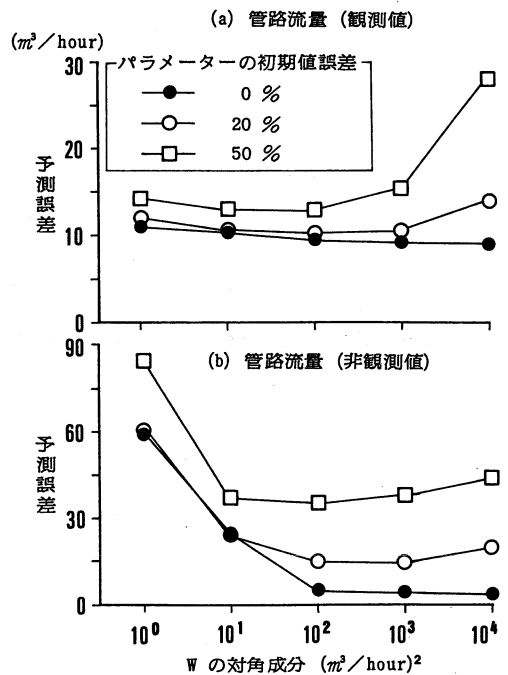


図-4 Wの設定値の影響

りも流量計を設置する方がより効果的であると言える。

## 5. むすび

本報は、管網内のいくつかのセンサ情報を用いて、配水管網の各節点における需要量、水圧および各管路における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について述べ、次いで本手法を福岡市の実際の配水管網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については非常に精度よく行うことがで

き、また非観測値についても、パラメーターの初期値推定誤差や観測雑音の分散等が適切に与えられれば、かなり精度よく予測されることがわかった。

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れば、その一部分を取り出すことによって、水需要量、管路流量および節点水圧の予測をオンラインで簡単かつ精度よく行うことができると考える。

終わりに、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。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) 上田年比古・神野健二・河村 明・土井敬介：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) 綾日出男：「配水施設のシュミレーション(I)」，水道協会雑誌，第559号，pp.29-42，昭和56年4月。
- 3) 高桑哲男：「配水管網流量計算法に関する研究(Ⅲ)」，水道協会雑誌，第432号，pp.46-60，昭和44年12月。

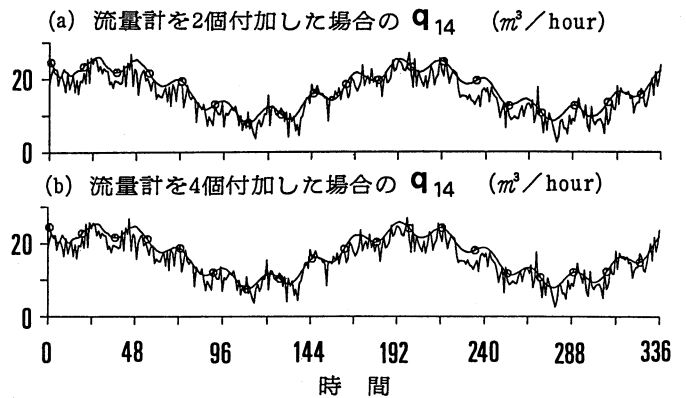


図-5 流量計を付加した場合の予測値