

(64) 都市配水システムにおけるオンライン水需要量予測の手法について

九州大学大学院	○ 土 井 敬 介
九州大学工学部	河 村 明
九州大学工学部	神 野 健 二
九州大学工学部	上 田 年比古
九州大学大学院	小 谷 辰 士

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た。配水の最適運用を行うには、配水管網内の水圧分布を適正化して、漏水量の抑制と管路事故の防止および需要者への供給水圧の確保を図り、限りある水資源と配水施設能力を最大限活用することが必要である。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、現在は市内配水管網の各要所に、電動調整弁123カ所、水圧計99カ所、流量計47カ所を設置している。そして、本局の中央監視装置で水圧計、流量計から時々刻々得られる情報に基づいて給水の状況を把握し、遠隔操作による電動調整弁の作動により余剰水圧の抑制や各浄水場相互の流量調節を行っている¹⁾。

一般に、水圧分布の適正化を図るには、管網内の圧力分布を正確に把握してバルブの最適制御を行わなければならないが、このためには時々刻々変動するすべての節点需要量、節点水圧およびすべての管路流量をリアルタイムで精度よく予測することが必要不可欠となる。しかし従来、配水池からの総配水量を季節、曜日、気温、天候などを考慮しつつ長期的あるいは短期的に予測するといった、いわゆる総量としての需要量予測に関する研究は数多く見られるが、上記目的のための需要量予測については、電気工学の分野で若干見られる程度である²⁾。

以上のような課題に対し著者らはこれまでに、配水管網内に設置された水圧計、流量計および電動調整弁から時々刻々得られ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理論でオンライン予測し、同時にすべての未知管路流量および節点水圧も予測する手法を提案している³⁾。本報では、系統別配水エリア等を考慮して20のブロックに計画区分された福岡市の第9区画配水管網系において、予め需要量、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および有効性の検討を行った。また、本手法の実用性の検討のため、電動調整弁により圧力制御を行った場合の需要量予測結果および流量計、水圧計の数が需要量予測の精度に及ぼす影響についても検討を行っている。

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とであり、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*間の管路についての水頭損失式(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⁴⁾。

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

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

ここに、*k*: 時点、*Q_{ij}*: 節点*i*から*j*に流れる流量(m³/hour)で*Q_{ij}* = -*Q_{ji}*、*| |*: 絶対値記号、*q_i*: 節点*i*における需要量(m³/hour)、*H_i*, *H_j*: 節点*i, j*における水頭(m)、*α*: 定数で0.54、*r_{ij}*は定数で*r_{ij}* = *r_{ji}*であり、

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

ここに、*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)、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200mm以下の管)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)になったときの流量、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ると、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、

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

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。

式(1)中の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で表されるとする。ここでは、水需要およびこれに伴う流量、水頭がおおむね24時間周期、12時間周期で変動すること⁵⁾を考慮して、水需要量を周期的確率モデルで表す。例えば節点iでの需要量は、

$$q_i(k) = M_i + a_{i1} \sin 2\pi F_{i1}k + b_{i1} \cos 2\pi F_{i1}k + a_{i2} \sin 2\pi F_{i2}k + b_{i2} \cos 2\pi F_{i2}k + v_i(k) \quad (6)$$

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

ここで、カルマンフィルターは式(7)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(8)の観測方程式を通してのみ観測される。

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + u(k) \quad (7)$$

$$y(k) = H(k)x(k) + T(k) + w(k) \quad (8)$$

ここに、k:時点、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、T:定数ベクトル、w:観測雑音。

カルマンフィルターの適用にあたっては、まず流量計、水圧計から時々刻々得られる流量および水頭を式(8)の観測量yとする。次に、式(6)中の周波数成分 F_{i1} 、 F_{i2} を既知として、平均値 M_i と振幅 a_i, b_i (式(6)のパラメーター)を式(7)の状態量x(合計5個)とする。このように、状態方程式(7)と観測方程式(8)よりカルマンフィルター理論を用いて状態量(パラメーター)を推定することができ、このパラメーターを用いて式(6)より需要量の予測を行う。次に、この需要量の予測値を用いて、流量、水頭の予測値は、式(1)、

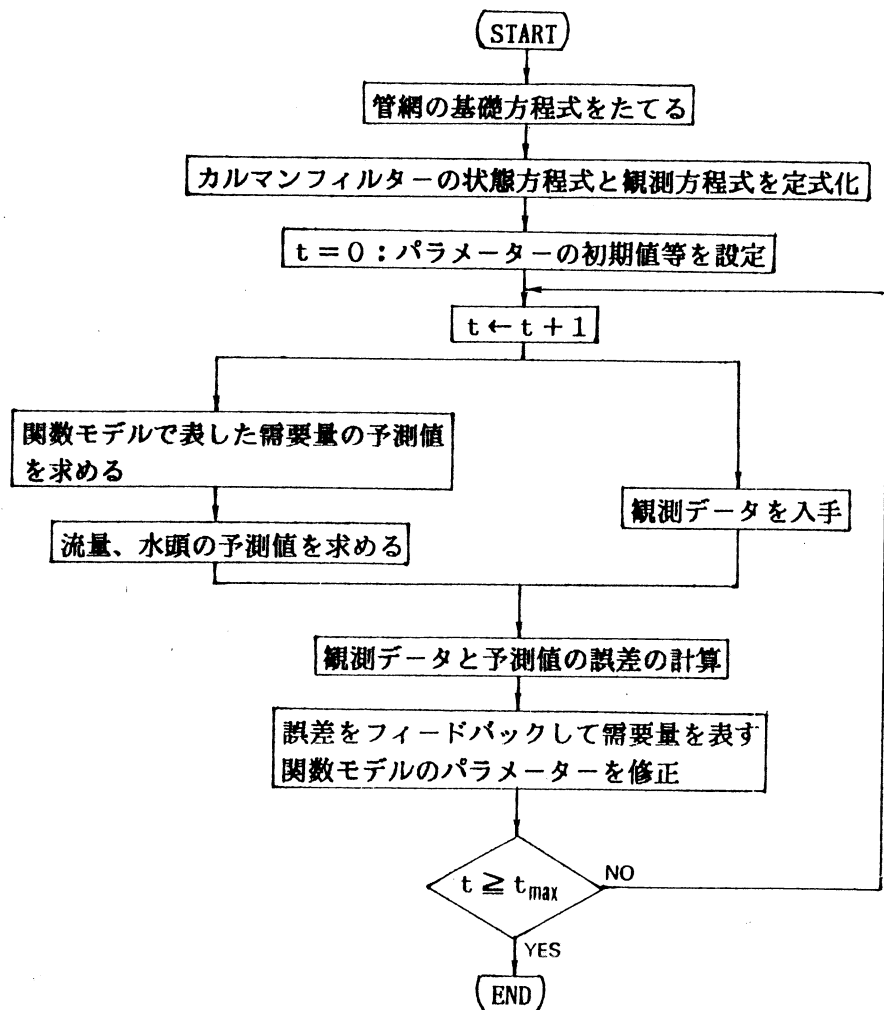
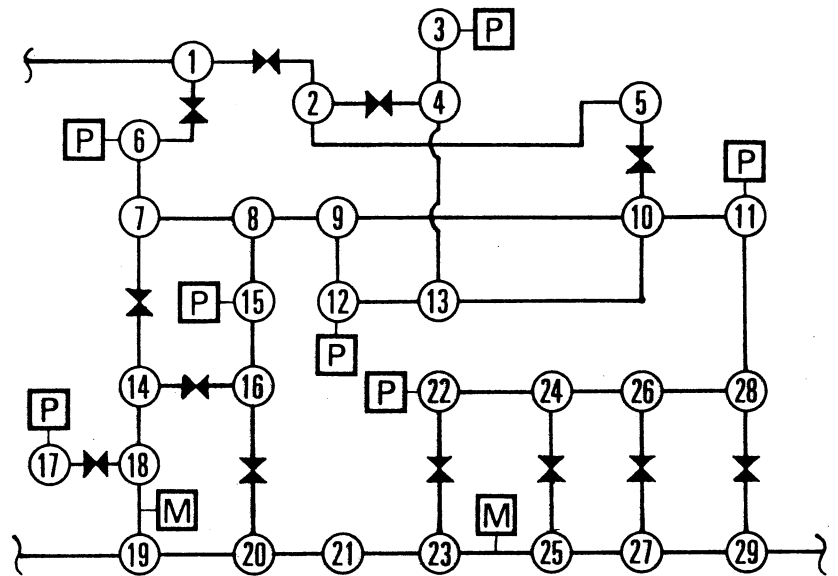


図-1 予測手法のフローチャート

式(4)を連立させて解くことにより求められる。また、カルマンフィルターの計算過程において、状態量 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、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修正される。予測手法のフローチャートを図-1に示している。また、アルゴリズムの詳細については参考文献3)を参照されたい。

3. 適用例

2. で述べた手法を図-2に示す配水管網モデルに適用してみよう。これは、福岡市の配水管網系の第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であり、その管径および管路長を表-1に示している。今、この管網についてカルマンフィルターの適用結果を検討するため、需要量、流量および水頭の真値を模擬発生により設定しておく。すなわち、まず式(6)で F_i 、 M_i および a_i, b_i を与えて288時点分(1時点を10分刻みとした)の需要量を算定し、次にこれらの値を用いて管網計算を行い、流量と水頭を求め、これらを需要量、流量、水頭の真値とする。この際、図-2の12個の電動調整弁は、図-3(a)、(b)に示すように2種類の開度変化をする弁に大別し、管網計算を行った。また、弁の開閉操作は人為的に行われるため、流量等の予測に際して1時点先の弁開度は予めわかっているものとする。以上のように模擬発生させた真値に対してカルマンフィルターによる本予測手法を適用する。計算にあたっては、節点3, 6, 11, 12, 15, 17, 22の水圧計による水頭、および節点18-19間と節点23-25間の流量計による流量を観測方程式(8)の観測値とし、図-2の節点1-29の需要量と水頭、お



①; 節点 i [P]; 水圧計 [M]; 流量計 ◀▶; 電動調整弁

図-2 配水管網モデル

表-1 配水管網モデルの管径と管路長

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		

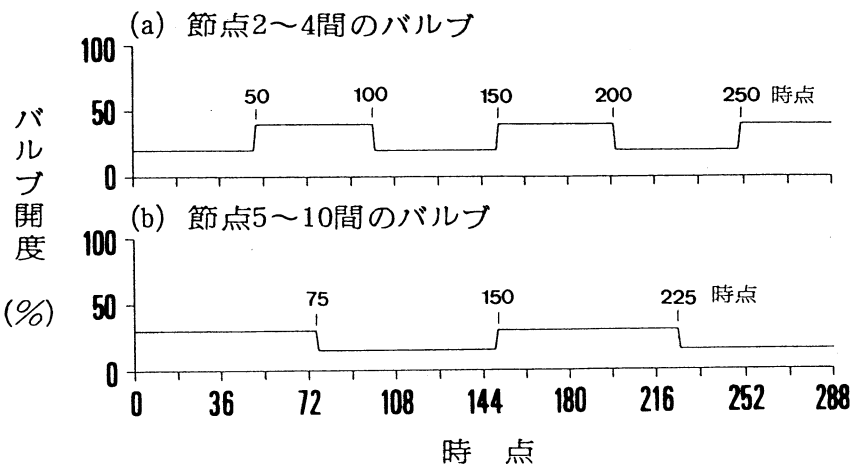


図-3 バルブ開度の変化

よび各管路の流量の予測値を求め、これらを前述の模擬発生による真値と比較することにする。

4. 結果とその考察

(4-1) 需要量、流量および水頭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、水頭の1時点先の予測を行った結果の一部を図-4に示している。この図において、小刻みに変動する実線が真値を、○印のついた比較的滑らかな線が予測値を表している。この図より、観測値である流量 $Q_{18,19}$ (節点18~19間の流量)と水頭 H_{11} 、および非観測値である H_{26} については非常に精度よく予測されている。また、需要量 q_{13} 、 q_{28} 、非観測の流量 $Q_{1,6}$ についても若干の予測誤差が見られるものの真値の変動の傾向をおおむねよく表している。なおここでは省略しているが、その他の需要量、流量、水頭についてもこの図と同様の予測結果が得られた。

(4-2) 圧力制御を考慮した場合の予測結果について

ここでは、福岡市で実際に行われている圧力制御を想定して、水圧計により観測される値の変動がある一定の範囲内でおさまるように、バルブ操作を行い、真値を模擬発生させた。なお、図-5(a)、(b)には、バルブ操作を行った6個のバルブのうちそれぞれ節点2~4間、節点5~10間のバルブ開度の変化を例示している。本手法の適用にあたっては、このバルブ操作をさせながら予測値の算定を行った。この結果の一部を模擬発生による真値と共に図-6に示している。なお、水頭 H_{11} を表す図中の2本の破線は、模擬発生時に与えた水頭の許容変動幅(24~27(m))である。この図より、バルブ開度が頻繁に変動しているにもかかわらず図-4同様、観測値である水頭 H_{11} は非常に精度よく予測されていて、またその変動幅は許容変動幅以内におさまっていることがわかる。また、需要量 q_{28} および非観測値の流量 $Q_{1,6}$ は若干の予測誤差があるものの、おおむね精度よく予測されている。特に、 $Q_{1,6}$ についてはバルブ開度の変化に伴う流量の小刻みな変動に対して非常に正確に予測値が追随している。これらのことから、バルブの操作による圧力制御が行われた場合でも、本手法により需要量、流量および水頭の精度よい予測値が得られる

単位 ; Q, q (m^3 /hour) H (m)

(*) --- 観測値

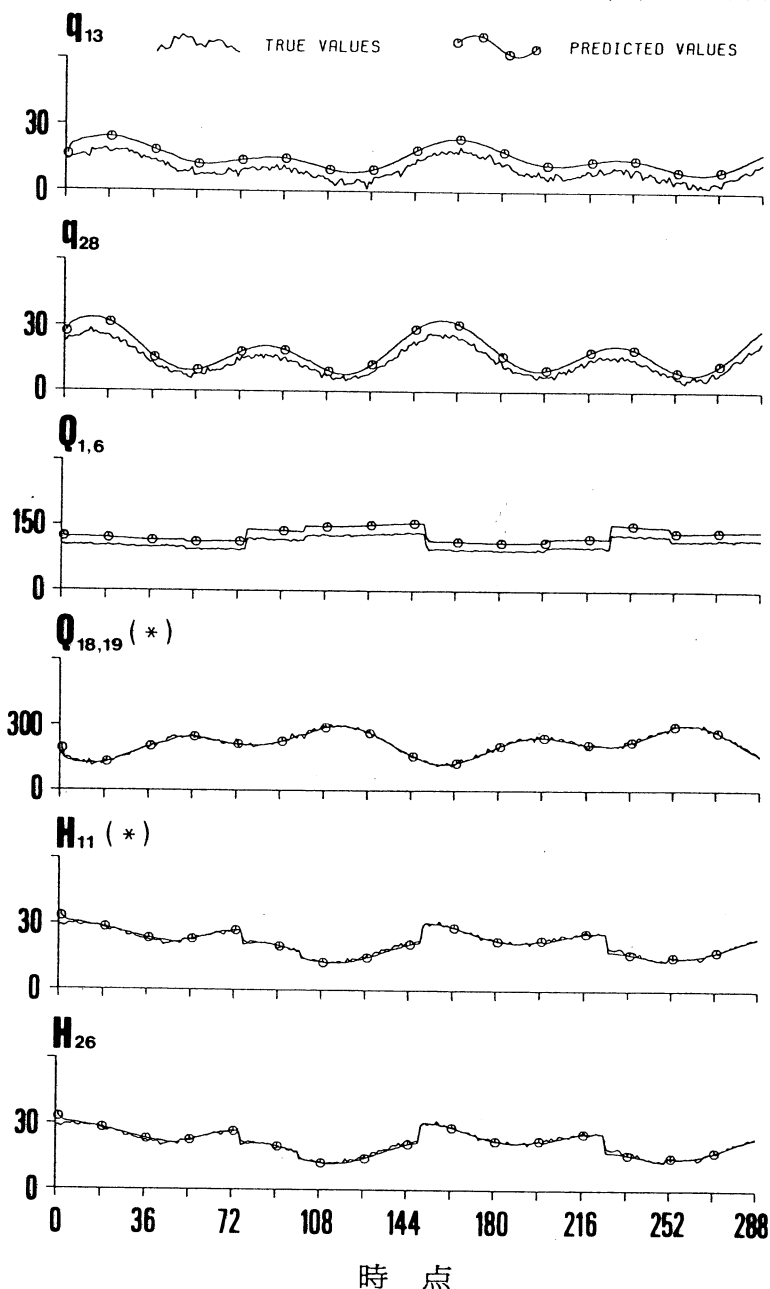


図-4 需要量、流量、水頭の真値と予測値

ことが確かめられた。

(4-3) 観測値の数が予測精度に及ぼす影響について

図-7にはセンサ情報として観測される観測値の数を増した場合の需要量 $q_{1,3}$ の予測結果を示している。図-7(a)は、図-2における流量計、水圧計に新たに節点1~2間と節点11~28間に流量計を2個追加した場合を、図-7(b)は、さらに節点6~7間と節点20~21間に流量計を2個、図-2において計4個追加した場合の予測結果である。図-7(a)は、図-2における流量計、水圧計に新たに節点1~2間と節点11~28間に流量計を2個追加した場合を、図-7(b)は、さらに節点6~7間と節点20~21間に流量計を2個、図-2において計4個追加した場合の予測結果である。同様に図-7(c)は、新たに節点2と節点26に水圧計を2個追加した場合を、図-7(d)は、さらに節点14と節点21に水圧計を2個追加した場合の予測結果を示している。なお、このときのバルブ操作は図-3に従うものとする。

まず流量計追加の予測結果を見ると、図-4の需要量 $q_{1,3}$ と比較して、図-7(a)の流量計を2個追加した場合の方が予測精度が向上していることがわかる。さらに、図-7(b)の流量計を4個追加した場合は、図-7(a)に比べわずかながら精度が向上している。一方、水圧

計を追加したときは、図-7(c)の2個追加した場合および図-7(d)の4個追加した場合のいずれをみても予測精度の向上はほとんど認められない。これは、流量と需要量が連続式においてダイレクトに結びついているためと考えられ、従って需要量の予測精度を向上させるためには、水圧計よりも流量計を設置する方がより効果的であると言える。また、需要量の予測精度を向上させ、同時に管網内の未知の流況を把握するために、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る。このような場合は、対象の配水管網に本手法を適用して、さまざまな配置パターンで試行錯誤的に計算を行うことで、要求されている予測精度を得るのに必要十分な観測値の数とその最適な配置を見出すことができると考える。

5. むすび

本報は、管網内のいくつかのセンサ情報を利用して、配水管網の各節点での需要量、水頭および各管路にお

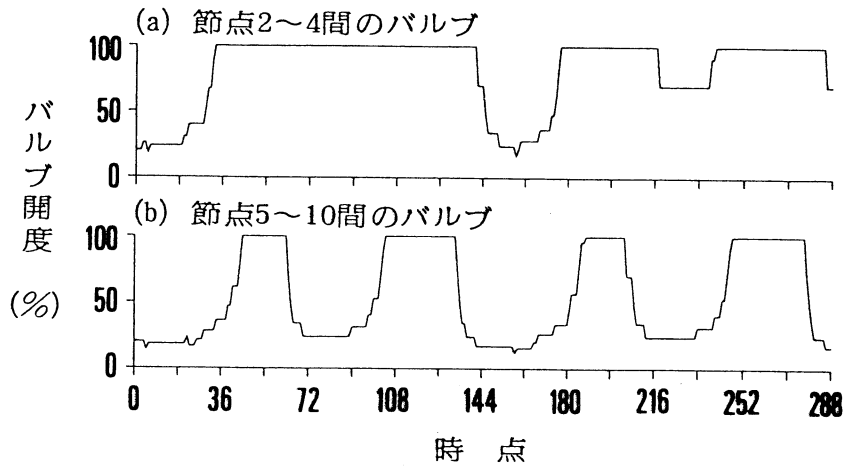


図-5 圧力制御を考慮したバルブ開度の変化

単位 ; Q, q (m^3 /hour) H (m)
(*) --- 観測値

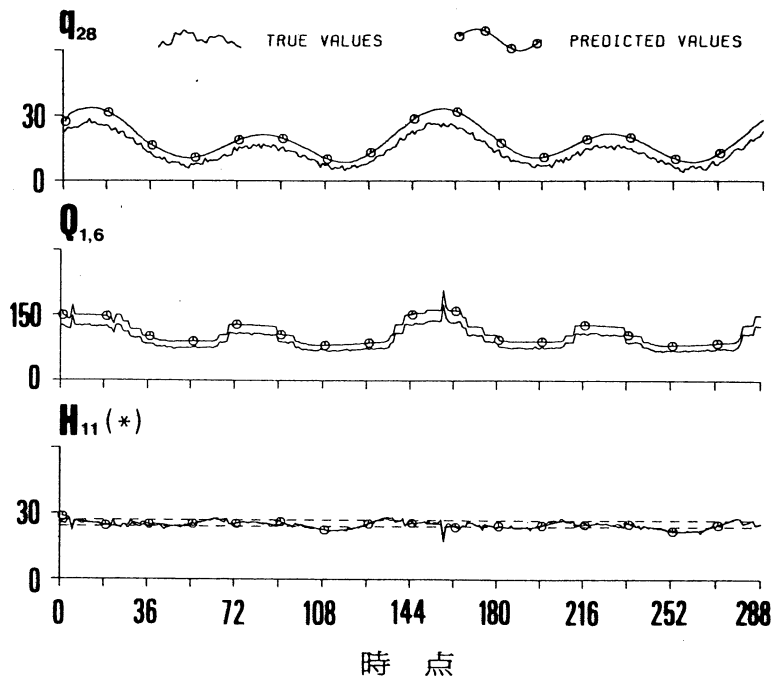


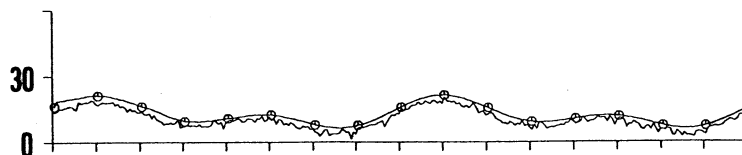
図-6 圧力制御を考慮した場合の予測値

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配水管網に適用してその妥当性、有効性の検討を行った。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かなり精度よく予測されることがわかった。さらに、配水管網内における流量計、水圧計の設置数およびその配置の問題を考える際にも、本手法が有効であることが確かめられた。

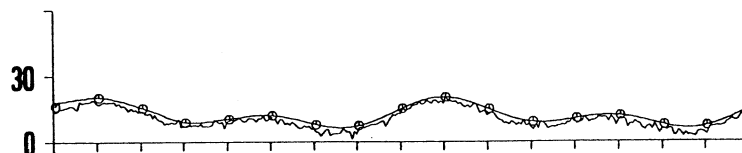
大規模で複雑な都市配水システムにおいて本手法を適用すれば、需要量、流量および水頭の予測をオンラインで簡単かつ精度よく行うことができると考える。

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ならびに水道局計画課の方々に、懇切な御助言を受けました。ここに記して深謝申し上げます。

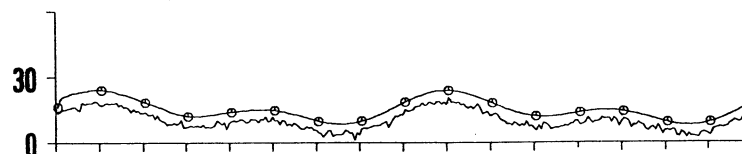
(a) 流量計を2個付加した場合の Q_{13} ($m^3/hour$)



(b) 流量計を4個付加した場合の Q_{13} ($m^3/hour$)



(c) 水圧計を2個付加した場合の Q_{13} ($m^3/hour$)



(d) 水圧計を4個付加した場合の Q_{13} ($m^2/hour$)

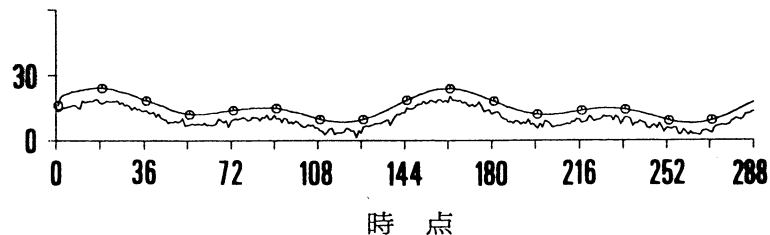


図-7 観測値の数を増した場合の予測値

参考文献

- 1) 大櫛星太：水管理都市宣言、水道協会雑誌、第52巻第8号、pp.16~22、昭和58年8月。
- 2) 瀬古沢照治、船橋誠壽、宮岡伸一郎、嶋内繁行：カルマンフィルターによる需要推定を用いた配水管路網の流量、圧力制御、昭和56年電気学会全国大会講演集、pp.1806~1807。
- 3) 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、pp.677~684、昭和61年10月。
- 4) 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、pp.29~42、昭和56年4月。
- 5) 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、pp.495~502、昭和61年8月。