

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

神野 健二*・河村 明*・上田年比古*

On the Dynamic Properties and Predictions of Daily Water Deliveries of the Purification Stations in Fukuoka City

Kenji JINNO, Akira KAWAMURA and Toshihiko UEDA

(Technology Reports of the Kyushu University Vol. 59, No. 4, August 1986)

In this paper, the dynamic properties of the daily water deliveries (from January 1, 1980 to December 31, 1982) of five purification stations in Fukuoka City are investigated. These five stations are Takamiya, Meotoishi, Otogane, Matsuzaki and Zuibaiji. The following dynamic properties are investigated: 1) the relation between the water deliveries during the different days of the week and the different types of service areas (i. e., commercial, industrial and residential areas); 2) the cross-correlation between the daily deliveries and exogenous variables such as average temperature, humidity, etc.; and 3) the exceedance frequencies obtained by spectral analysis using maximum entropy method.

The results of the above investigations are used to develop the mathematical model for each station's daily water delivery. And the Kalman filtering approach is employed to predict the daily deliveries. The accuracy of the predictions is also studied.

1. はじめに

水源に乏しい福岡市では水の有効利用が重要な事項とされている。この一つとして福岡市は昭和 53 年の大渇水をきっかけとして配水調整事業に取り組み、現在は各々の浄水場からの水を相互に関連づけ、水資源の効率的な運用を検討している。この配水調整システムを有効に活用するためには、福岡市各浄水場の配水量特性を把握し、配水量予測を精度よく行い最適な配水コントロールを行う必要がある¹⁾。

本報は、以上のことを考慮し、配水コントロールの運用面では最も基礎的な日単位の配水量を対象として、福岡市の高宮、夫婦石、乙金、松崎および瑞梅寺の主要 5 浄水場について、まず、曜日別配水量などの特性、日平均気温などの外生変数との相関およびスペクトル解析による周波数特性を検討して各浄水場の日配水量の変動特性を把握する。次いで、これらの変動特性を考慮し、各浄水場毎に日配水量の関数形を設定して、カルマンフィルター理論によりオンラインで日配水量予測を行い、その精度を検討したものである。

2. 福岡市各浄水場の日配水量特性

2.1. 一般的特性

福岡市の浄水場として、高宮、夫婦石、乙金、松崎および瑞梅寺浄水場がある。本報ではこれらの浄水場の昭和 55 年 1 月 1 日から昭和 57 年 12 月 31 日までの日配水量データを用いて解析を行っている。日配水量データを用いたのは、日々の配水量を的確に把握することが配水コントロールの運用面で最も基礎的で重要であると判断される¹⁾からである。まず、図-1 にこれらの浄水場の位置と福岡市浄水場施設の概要を示す。また表-1 には各浄水場の施設能力、日配水量の平均値、標準偏差、変動係数(標準偏差/平均値)、トレンドおよび各浄水場の配水区域の都市構成を示している。ここで、トレンドは 3 年間の日配水量の直線的増加傾向を最小 2 乗法により求めた場合の 1 日当りの増分のことであり、また配水地域の都市構成については、福岡市は昭和 56 年 10 月より配水調整システムにより各浄水場の水を相互に関連づけているので必ずしも配水区分がはっきりしている訳ではないが、およその浄水場別配水分布図と福岡市都市構成図を重ね合わせて比較して検討した結果を示している。次に図-2 には、

昭和 61 年 3 月 31 日 受理

* 水工土木学教室

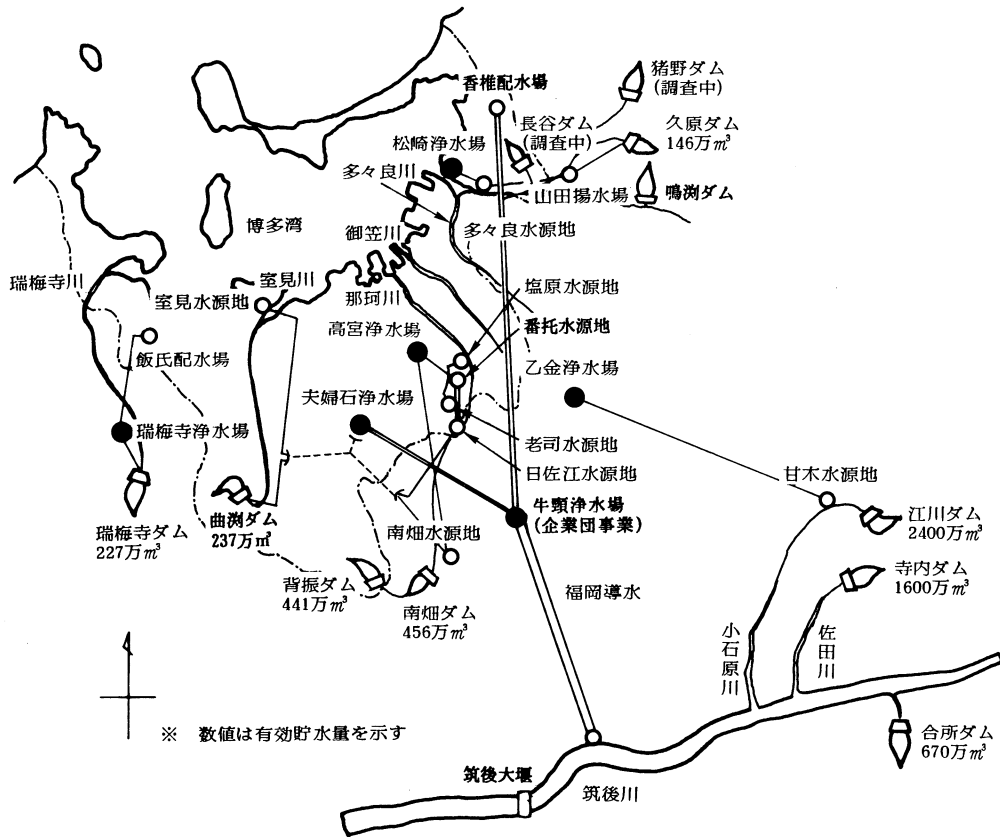


図-1 福岡市浄水場施設概要図
(福岡市水道局夫婦石浄水場パンフレットを基に作図)

表-1 各浄水場の日配水量特性

浄水場	施設能力 (千 m^3 /日)	平均値 (千 m^3 /日)	標準偏差 (千 m^3 /日)	変動係数	トレンド (m^3 /日 2)	配水区域の 都市構成
高宮	199	134.7	14.82	0.11	3.18	商業地域
夫婦石	149	101.6	18.21	0.18	5.15	住居地域
乙金	100	65.6	7.89	0.12	11.95	工業地域
松崎	35	32.3	2.20	0.07	0.08	住居地域
瑞梅寺	15	9.2	1.37	0.15	1.83	住居地域

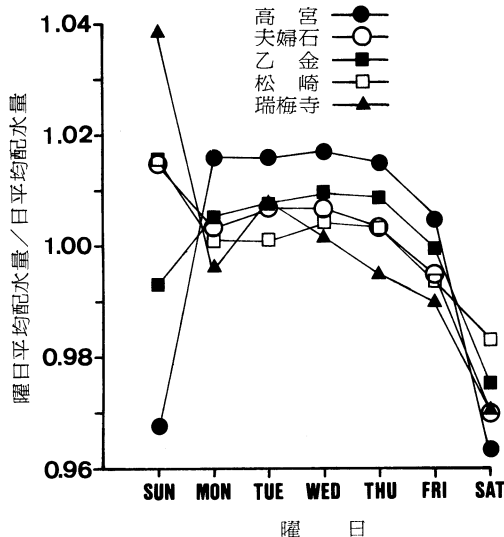
各浄水場の曜日別平均配水量の日平均配水量に対する比を計算した結果を示している。

表-1より松崎浄水場は変動係数およびトレンドが他の浄水場に比べかなり小さく、比較的安定した配水量となっている。これはこの浄水場の配水区域の住居地域の世帯はほぼ飽和しており、世帯の増加が余りな

くこの区域の需要量が安定しているためと考えられる。またこの浄水場は図-2より曜日別の変動も最小となっている。次に、夫婦石浄水場は表-1より変動係数は最も大きくまたトレンドも配水区域が住居地域のうちでは最も大きくなっている。これはこの配水区域である住居地域の世帯数の増加に伴う水需要量の増

加に起因していると考えられる。次に乙金浄水場はトレンドが他の浄水場に比べてかなり大きくなっている。これはこの配水区域である工業地域の工業用水の増加に起因しているものと考えられる。

次に、図一2より高宮、乙金浄水場では平日に比べ日曜日の配水量が小さく他の浄水場では逆に日曜日が最も大きくなっている。これは高宮浄水場の配水区域は天神・中洲をはじめとする商業地域、乙金浄水場の配水区域は空港およびその周辺に工業地域が多く、他の浄水場の配水区域は住居の占める割合が多いためと考えられる。すなわち、商工業地域では、日曜日が休日のため水の需要量が減り、逆に住居地域では日曜日を洗濯日や清掃日に当てているために需要が増えるの

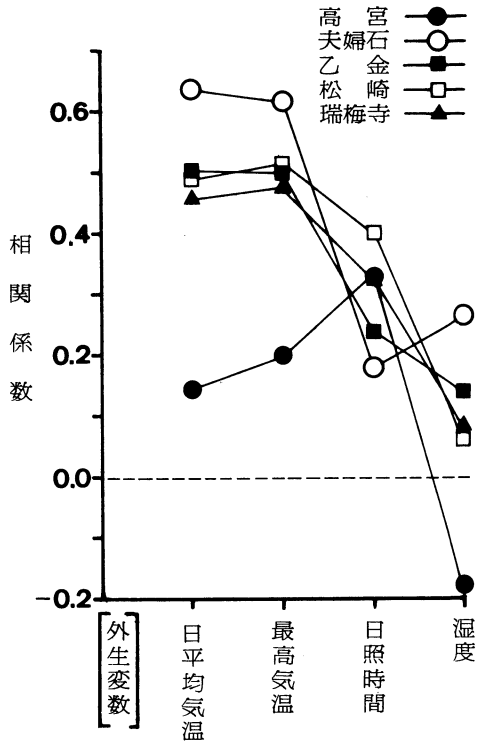


図一2 各浄水場の曜日別配水量特性

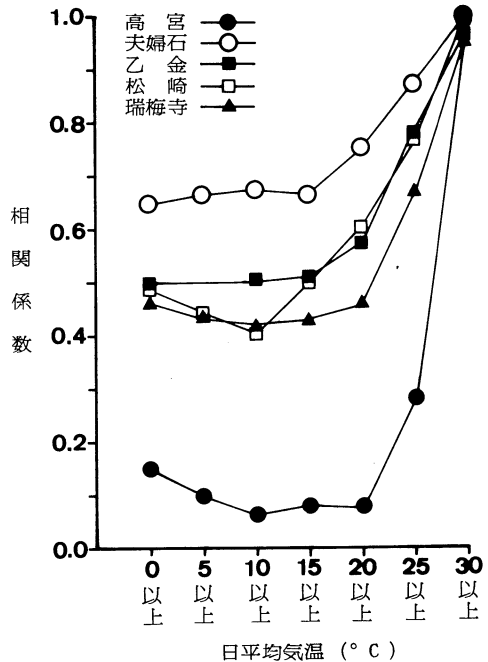
ではないかと考えられる。また各浄水場とも土曜日の配水量は最も低くなっている。これは住居地域では翌日の日曜日に洗濯日、清掃日を当てているため、土曜日の洗濯、清掃などの家事を控えているためと考えられ、また、商工業地域では商店、事業所、工場などが土曜日は午前中勤務もしくは休みのため水の使用量が減るのではないかと考えられる。なお、配水区域が主として工業地域である乙金浄水場では、工場が休みとなる日曜日の配水量が土曜日程小さくはなっていないが、これはこの地域の住居による影響が現れているためと考えられる。

2.2. 外生変数との相関

図一3に日平均気温、日最高気温、日照時間および



図一3 各浄水場の外生変数との相関



図一4 各浄水場の日平均気温の上昇による相関係数の変化

湿度の4つの外生変数（ここに、外生変数とは後述する日配水量の予測モデル式における入力変数のことをいう）と日配水量との相関係数を示す。これより、i) 気温に関しては高宮浄水場は他の浄水場に比べかなり相関が低い。ii) 平均気温に対する相関と最高気温に対する相関はどの浄水場も同程度である。iii) 日照時間に関しては気温ほど相関は高くない。iv) 湿度に関してはどの浄水場もほとんど相関はないといえる。またこれらより高宮浄水場の配水区域である商業地域は天候に余り左右されず水を使用しているといえる。

次に、日配水量と相関の高かった気温について、日平均気温に対する相関係数の変化を図-4に示している。これによると、どの浄水場もほぼ気温が25°C以上になると急激に相関が高まっている。これは7,8月の洗濯水、入浴水あるいはプール用水などの増加に起因していると考えられる。

2.3. スペクトル特性

各浄水場の日配水量の周期性を調べるため、最大エントロピー法(MEM)により日配水量のスペクトル解析を行った。MEMの利点としては、短いデータからでも精度のよいスペクトル解析が可能、スペクトルの分解能が他の方法に比べ極めて高いなどが挙げられる²⁾。さて、日配水量の生データ y をそのままMEMにかけたところ、1年周期以外の周期がはっきり現れなかったため、まず生データ y を次式で表される low-pass フィルター³⁾にかけ、低周波成分 y_L と高周波成分 y_H に分離した。

$$y_L(k) = (1-\alpha)y(k) + \alpha y_L(k-1) \quad (1)$$

$$y_H(k) = y(k) - y_L(k) \quad (2)$$

ここに、 k : 時点、 α : 平滑化係数

ここでは、 α により高周波成分のカットされる特性⁴⁾を考慮して $\alpha=0.7$ とした。さらに y_L については、1週間よりも長周期の周波数を検出し易くするため、 y_L の1週間毎の平均をとりこれを y_{L7} として、高周波成分 y_H と低周波成分 y_{L7} をそれぞれMEMにかけスペクトル解析を行った。その結果を図-5から図-9に示す。これらの図の(a)の y_{L7} の図より、i)すべての浄水場で1年周期が顕著に現れている。ii) 夫婦石、乙金浄水場では半年周期も卓越している。また(b)の y_H の図は高周波成分のスペクトルであるので1週間周期以下の短周期のスペクトルに着目すると、iii) 高宮、乙金浄水場では1週間周期が顕著に現れているが、それ以外の浄水場では顕著でない。iv) 乙金浄水場以

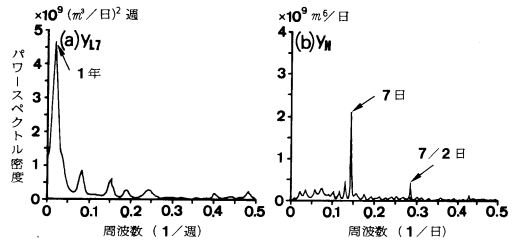


図-5 高宮浄水場のスペクトル

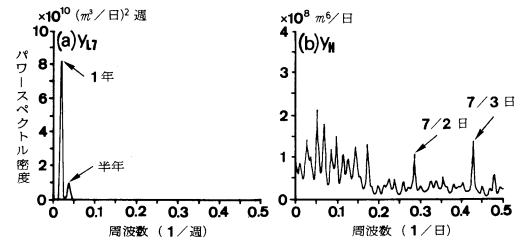


図-6 夫婦石浄水場のスペクトル

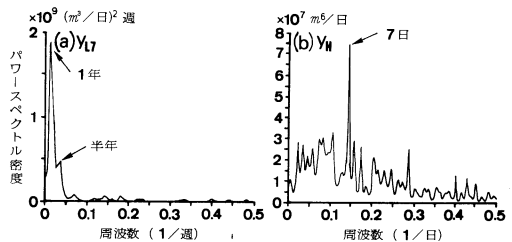


図-7 乙金浄水場のスペクトル

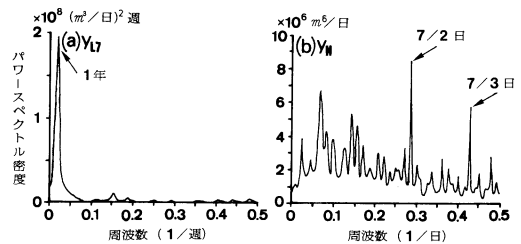


図-8 松崎浄水場のスペクトル

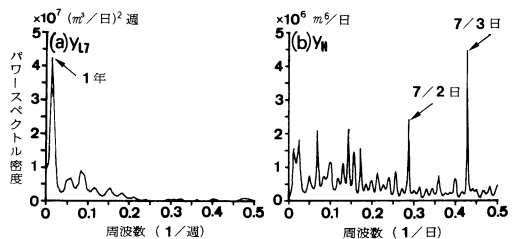


図-9 瑞梅寺浄水場のスペクトル

外では、半週間あるいは1/3週間周期も卓越していることなどがわかる。これらのうち、iii)より商工業地域にはその活動周期である1週間周期が顕著であるが、住居地域では1週間周期は顕著に現れていない。

3. カルマンフィルターによる日配水量予測

2.の日配水量特性を考慮して次のような日配水量予測モデルを作成した。すなわち、日配水量が周期関数と自己回帰項、さらに日平均気温を外生変数項としたこれらの和で表現される予測モデル式(3)を考える⁵⁾。

$$y(k) = M_y + \sum_{i=1}^p (A_i \sin 2\pi f_i k + B_i \cos 2\pi f_i k) + \sum_{j=1}^q C_j y(k-j) + Du[t(k) - t_0] \cdot (t(k) - t_0) + w(k) \quad (3)$$

ここに、

- y: 日配水量 (m³/日) f_i: 周波数成分 (1/日)
- k: 時点 A_i, B_i: f_i に対する振幅 (m³/日)
- p: f_i の個数 M_y: 平均値 (m³/日)
- q: 自己回帰の次数 C_j: 自己回帰係数
- D: 外生変数の係数 u[·]: 単位階段関数
- t: 日平均気温 (°C) w: 観測雑音
- t₀: 外生変数として影響を及ぼす最低の日平均気温 (°C)

ここで、f_iとしては図-5から図-9に示した卓越周波数を与えた。すなわち、夫婦石浄水場に対してはp=4、それ以外の浄水場に対してはp=3として、この場合のf_iを表-2のように与えた。またq=3として3次の自己回帰式とし、t₀は図-4から日平均気温が25°C以上となると日配水量との相関が急激に大きくなることを考慮して、日平均気温が25°C以上のときのみ考慮されるように、t₀=25として単位階段関数を用いた。以上のようにして定めた式(3)について、カ

表-2 数学モデルに用いた各浄水場の卓越周波数 (1/日)

浄水場	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄
高宮	1/365	1/7	2/7	なし
夫婦石	1/365	2/365	2/7	3/7
乙金	1/365	2/365	1/7	なし
松崎	1/365	2/7	3/7	なし
瑞梅寺	1/365	2/7	3/7	なし

ルマンフィルターによりM_y, A_i, B_i, C_j, Dを逐次同定しながら、日配水量yの予測をオンラインで行う場合を考える。

ここで、カルマンフィルターは式(4)のようなダイナミクスで表されるシステム状態量xを推定するのに適用される理論で、そのシステムの状態量は式(5)の観測方程式を通してのみ観測される^{6),7)}。

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + v(k) \quad (4)$$

$$y(k) = H(k)x(k) + w(k) \quad (5)$$

ここに、

- k: 時点
- x: システムの状態量ベクトル (n次元ベクトル)
- Φ: 既知の状態遷移行列 (n×n行列)
- v: システム雑音。平均値0で分散Vの独立な正規性白色雑音 (n次元ベクトル)
- y: 観測量ベクトル (m次元ベクトル (m ≤ n))
- H: 既知の観測行列 (m×n行列)
- w: 観測雑音。平均値0で分散Wの独立な正規性白色雑音 (m次元ベクトル)

時点(k+1)までの観測量によるx(k+1)の最適推定値x̂(k+1|k+1)は、時点kまでの観測量によるx(k+1)の最適推定値x̂(k+1|k)を用いて、x̂(0|0)を初期値として与えると次式で求められる。

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + K(k+1)v(k+1) \quad (6)$$

ここに、

$$\hat{x}(k+1|k) = \Phi(k)\hat{x}(k|k) \quad (7)$$

- K: カルマンゲインマトリックス (n×m行列)
- v: 1ステップ先の観測量の予測残差 (m次元ベクトル)

さて上記のカルマンフィルターを前述の日配水量予測に適用した場合、式(4)、(5)のx(k)=[M_y, A₁, B₁, …, A_p, B_p, C₁, …, C_q, D]^T(^Tは転置記号)、観測量ベクトルの次元m=1で、式(5)のy(k)は式(3)のy(k)であり、H(k)=[1, sin 2πf₁k, cos 2πf₁k, …, sin 2πf_pk, cos 2πf_pk, y(k-1), …, y(k-q), u(t(k)-t₀)·(t(k)-t₀)]そして式(4)のΦ(k)=I(単位行列)となる。いま初期値x̂(0|0)として、パラメータM_yに対してのみ、6万, 6万, 5万, 2万, 4千 (m³/日)をそれぞれ高宮, 夫婦石, 乙金, 松崎, 瑞梅寺に対して与え、それ以外のパラメータA_i, B_i, C_j, Dの初期値には0を与える。こうして5浄水場の昭和55年1月1日から昭和57年12月31日までの3年間の日配水量に対して、カルマンフィルターに

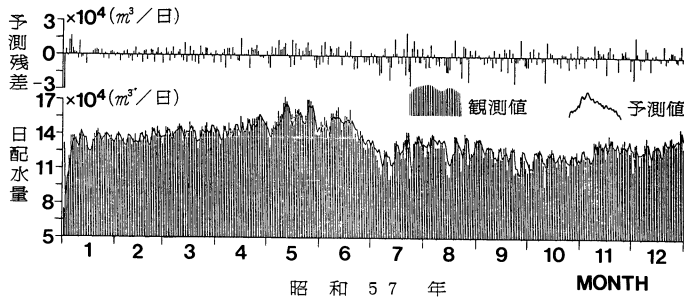


図-10 高宮浄水場の日配水量予測結果

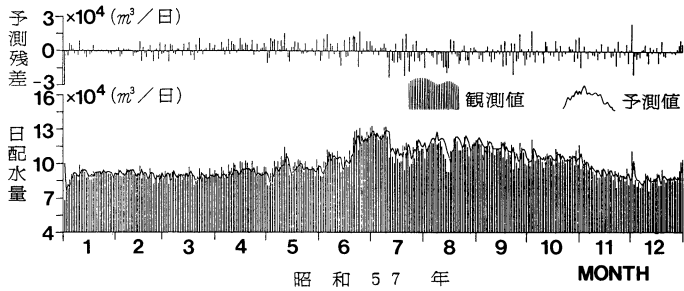


図-11 夫婦石浄水場の日配水量予測結果

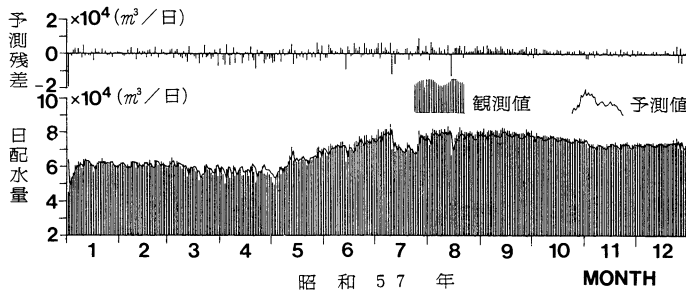


図-12 乙金浄水場の日配水量予測結果

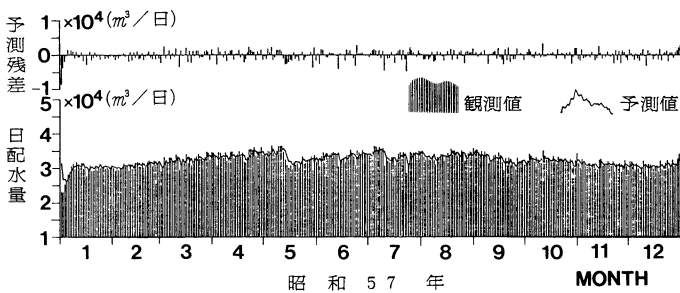


図-13 松崎浄水場の日配水量予測結果

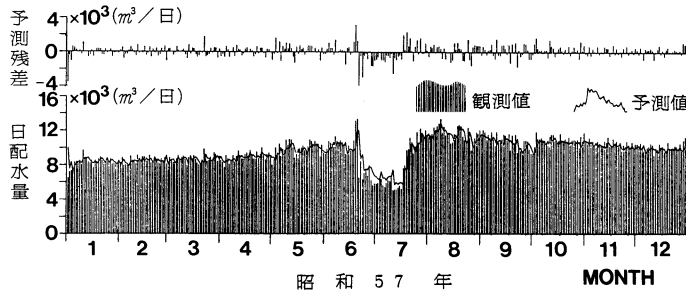


図-14 瑞梅寺浄水場の日配水量予測結果

表-3 カルマンフィルターによる各パラメータの最終同定結果

パラメータ	高 宮	夫婦石	乙 金	松 崎	瑞梅寺
$M_y \times 10^3$	24.05	17.30	5.63	9.31	1.27
$A_1 \times 10^3$	1.56	-2.27	-0.18	0.13	-0.06
$B_1 \times 10^3$	-0.59	-1.86	-0.03	-0.04	0.00
$A_2 \times 10^3$	2.70	1.42	-0.21	-0.31	-0.14
$B_2 \times 10^3$	2.03	0.28	0.21	-0.05	-0.06
$A_3 \times 10^3$	-0.48	-1.28	0.63	-0.10	-0.08
$B_3 \times 10^3$	2.39	0.24	0.62	-0.31	-0.25
$A_4 \times 10^3$	なし	-0.82	なし	なし	なし
$B_4 \times 10^3$	なし	-1.42	なし	なし	なし
C_1	0.73	0.58	0.77	0.52	0.59
C_2	-0.03	0.17	-0.05	0.06	0.15
C_3	0.12	0.07	0.19	0.12	0.12
$D \times 10^2$	6.08	6.99	2.36	1.04	1.00

誤差率 [100 ν /y] (%) を用いて示している。

4. 考 察

表-3より、まず周期関数部分のパラメータ M_y や各周波数 f_i に対する振幅 A_i, B_i をみると、各浄水場とも M_y の値が他の A_i, B_i に比べて最も大きい。1年周期の振幅 A_1, B_1 は、夫婦石浄水場では他の周期の振幅よりも大きいものの、その他の浄水場では短周期の振幅、例えば高宮、松崎、瑞梅寺の A_2, B_2, A_3, B_3 や乙金の A_3, B_3 の方が大きくなっている。次に自己回帰パラメータ C_j についてみると、どの浄水場も C_2, C_3 は C_1 に比べて小さく、ほとんど1次の自己回帰だけで自己回帰部分は決定されているようである。また D の値より、各浄水場とも夏場の水需要量増加に対する補正がこの表に示される程度必要といえよう。

次に、表-4より松崎浄水場は他の浄水場より予測精度が高く、瑞梅寺浄水場はかなり精度が落ちている。これは、松崎浄水場の場合、表-1および図-2に示されるように変動係数、トレンドおよび曜日による変動が他の浄水場に比べかなり小さく、図-10から図-14を比較してもわかるように他の浄水場の日配水量に比べて変動が小さいことが予測精度の高い要因であると考えられる。また瑞梅寺浄水場の予測精度が低い原因としては、図-2、図-14より日曜日に配水区域の需要量が極端に大きく、式(3)のモデルではこれをうまく表現できないこと、図-14に示されるように、6月21日よりおよそ1箇月間極端に配水量が小さくなっており、これを精度良く予測できなかったことなどが挙げられよう。なお上記の期間配水量が極端に減少している原因は、この年の7月10日から12日まで福岡市が給水制限を行ったためであり、この期間前後の減少については6月が6月の雨としては観測史上

表-4 各浄水場の日配水量予測精度

浄水場	平均誤差率 (%)	誤差率の割合 (%)		
		3%以内	5%以内	10%以内
高 宮	4.34	46.5	70.1	92.2
夫婦石	4.67	46.4	66.1	91.7
乙 金	3.37	56.4	78.9	94.8
松 崎	3.14	58.3	81.5	97.4
瑞梅寺	5.36	36.7	57.8	88.3

より状態量 x すなわち式(3)のパラメータ M_y, A_i, B_i, C_j, D を逐次同定して、1時点先の日配水量の予測を行った。図-10から図-14に各浄水場の昭和57年に対する予測値と予測残差 ν を示す。また表-3にはパラメータの最終同定結果、表-4には予測精度を

最少雨であり、給水制限を行わなければならないという情報による区域住民の節水によるものと考えられる。その他の浄水場の同じ期間についても配水量が減少しているのは同様の原因といえるが、松崎浄水場については図-13のようにこの渇水の影響は顕著には現れていない。

次に全般的な予測精度としては、他の文献の値⁹⁾⁻¹³⁾と比較して必ずしもよくないが、正月、お盆、祝祭日などの特殊日や天気予報などを考慮し、また給水制限を行うような渇水年を含まないデータを対象とし、さらにカルマンフィルターにおける初期値パラメータ $\hat{x}(0|0)$ を過去のデータを用いて適切に与え、初期予測誤差を小さくするなどすれば、予測精度はかなり向上すると考えられる。

5. む す び

本報では、福岡市の主要 5 浄水場の日配水量の変動特性を明らかにするため、日配水量の曜日による変動特性、外生変数との相関およびスペクトル特性などを調べるとともに、カルマンフィルターにより各浄水場の日配水量予測を行い、その精度などについて検討を行った。その結果、各浄水場の日配水量の変動特性や日配水量と配水区域の都市構成などの関係が明らかにされた。またカルマンフィルターによる予測精度が各浄水場でかなり異なることが示され、その原因などを明らかにした。今後は特殊日や天候などを考慮してさらに精度を向上させてゆくつもりであり、また実時間配水コントロールのための時間単位の予測、あるいは取水計画などに必要な月間、年間予測についても検討してゆくつもりである。

最後に、本研究を遂行するにあたり、本学卒業生の小平田浩司氏（現在、運輸省）および河野道弘氏（現在、愛媛県庁）に種々御協力頂いた。また、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、貴重な資料を提供して頂き、ま

た御懇切な御助言を賜りました。以上の方々に対してここに記して深謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 坂根稟一郎・室屋浩一郎・西川真正：配水コントロールにおける配水量推定に関する研究，水道協会雑誌，第 411 号，pp. 10-17，1968 年 12 月。
- 2) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，pp. 219-227，1977 年。
- 3) J. S. ベンダット・A. G. ピアソル（得丸英勝ほか訳）：ランダムデータの統計的処理，培風館，pp. 289-296，1976 年。
- 4) 河村 明・上田年比古・神野健二：降水時系列の長期的パターン変動の解析，土木学会論文集，第 363 号/II-4，pp. 155-164，1985 年 11 月。
- 5) Fallside, F. and Perry, P. F.: On-line prediction of consumption for water supply network control, Proceedings of the IFAC 6th World Congress, pp. 1-9, August 1975.
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 松田泰康・石川恒男：日配水量変動要因分析一翌日配水量予測一，第 27 回全国水道研究発表会講演集，pp. 52-54，1976 年。
- 9) 斉藤 肅：カルマンフィルターを用いた配水量予測，第 28 回全国水道研究発表会講演集，pp. 105-107，1977 年。
- 10) 斉藤 肅：水需要構造を考慮した GMDH による配水量予測，第 29 回全国水道研究発表会講演集，pp. 80-82，1978 年。
- 11) 築山 誠・福田豊生：配水量モデルへの GMDH の適用と配水量予測，第 30 回全国水道研究発表会講演集，pp. 158-160，1979 年。
- 12) 田宮正康：札幌市における配水量予測手法一短日予測一，第 33 回全国水道研究発表会講演集，pp. 144-146，1982 年。
- 13) 長谷川進・宮沢雄一郎：天候履歴を考慮した配水量予測，第 33 回全国水道研究発表会講演集，pp. 147-149，1982 年。