

水圧調整技術——松山市の水圧調整システム——

*1 柳下 修(やぎした おさむ)

*2 風間 清(かざま きよし)

*3 上本 憲嗣(うえもと けんじ)

*4 黒谷 憲一(くろたに けんいち)

1 まえがき

松山市は四国愛媛県の海側に位置し、小説「坊ちゃん」で有名な道後温泉を有する風光明媚な観光都市である。

昭和50年から着工された上水道第3次拡張事業により、給水区域の拡大、給水需要増大に対応した浄水場・配水池の設備改造を行った結果、昭和59年度にて給水区域面積91.8km²、給水人口369,000人、給水能力190,000m³/dになっている。

更に、昭和57年からは維持管理の時代に対応した“漏水防止総合対策事業”に着手し、その一環として水運用コストの低減、有収率の向上、渇水時の均等給水を目指す“水圧調整システム”を完成した。本システムは、導入にあたり水圧調整の実験モデルを構築し、その効果を十分に確認した上で、昭和59年度に運用を開始した。水量的に全市の1/3が水圧調整区域に含まれた昭和59年度において、有収率は約3%向上している。また、昭和60年冬期の渇水において、均等給水に非常に効果があったことが確認された。

本稿では、本システムの概要と成果を紹介する。

2 水圧調整システム

2.1 概要

図1に松山市の区給水区域図を示す。給水区域が10配水区に分かれており、それぞれ配水池からの自然流下方式で給水されている。平均水圧は水圧調整以前は4～6kg/cm²であり、これを2～2.5kg/cm²に水圧調整することにより、漏水量の削減及び渇水時の均等給水の実現を図ろうとするものである。昭和60年度に10配水区、29水圧調整ブロックの整備が完了して、水圧調整システムが完成した。

水圧調整システムの導入に先立ち、代表的配水区1か所の実験システム(水圧調整弁×3、水圧監視所×3)を設置し、水圧調整効果を確かめながら、水圧調整弁の制御方法を確立した。更に、導入前に減圧弁設置場所や仕様、あるいは圧力監視点を決定するなどの設計シミュレーションの精度を検証した。

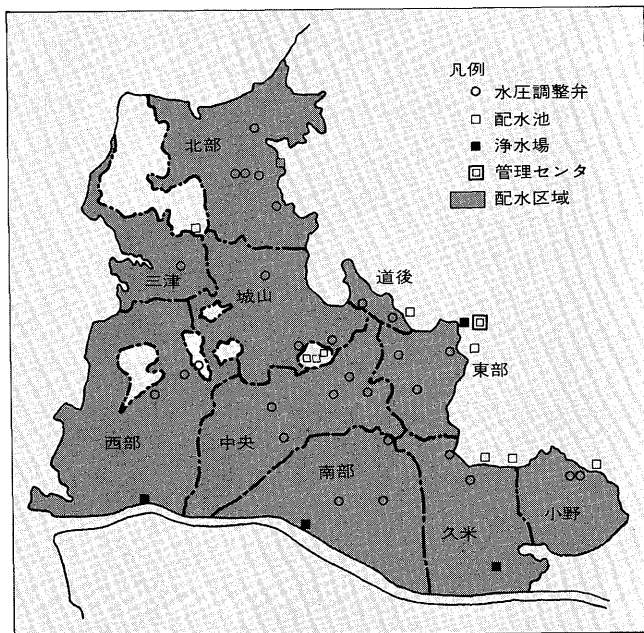
2.2 システム構成

システム構成図を図2に示す。監視制御設備は以下の三つのレベルに階層化されている。

(1) 管理・計画レベル

水運用計画、水圧調整を実現する高度な演算制御(予測、管網シミュレーションほか)、多量データの管理などを行う

図1 松山市の給水区域図



レベルであり、32ビットスーパーミニコンピュータ(S-3500システム)により構成される。端末装置として、パーソナルコンピュータを各事務所に設置している。オンラインで日報、月報データの監視、印字が可能なほか、施設台帳管理など幾つかのオフラインジョブが用意されている。

(2) 監視・制御レベル

プロセスコンピュータ(U-1200システム)2台は、配水ブロック及び浄水場の監視制御を行う。このコンピュータはデュプレックスシステムであり、相互バックアップ及びロードシェアにより機能分散を行っている。遠方監視制御装置(TM/TC)親局は、マルチ伝送(1:N/2)×2により伝送のスピード化及び高信頼性を実現する。

(3) 現場のマイナ制御レベル

ディジタルコントローラによるマイナ制御系を構成し、TM/TCやコンピュータダウン時においても現場自動モードにスムーズに移行し、水圧の急変を無くする。図3にディジタルコントローラの機能を示す。圧力の細かい変動によるバルブの頻繁な動作を不感帯により抑制する。また、バルブの非線形性による制御系への悪影響を除くため可変ゲイン回路を持つ。すなわち、全体制御系の中で最下位に位置し、直接プロセスを制御する装置である。

このように信頼性の高いハイアラキー制御システムを構築している。

*1 総合技術第二部 水処理技術部 *2 営業推進本部 新プロジェクト推進室 *3 システム本部 第一システム部

*4 システム本部 第一システム開発部

図2 システム構成図

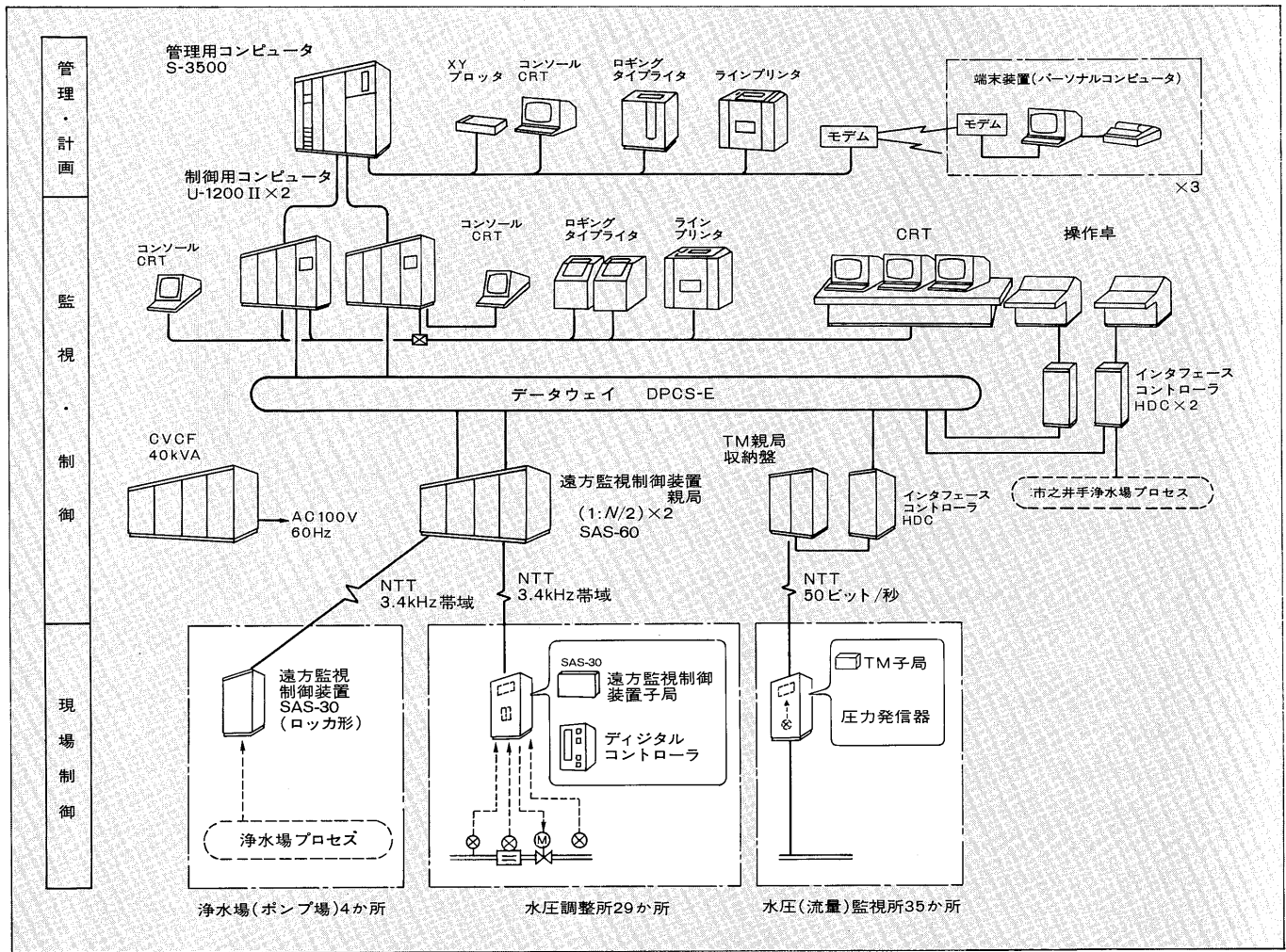
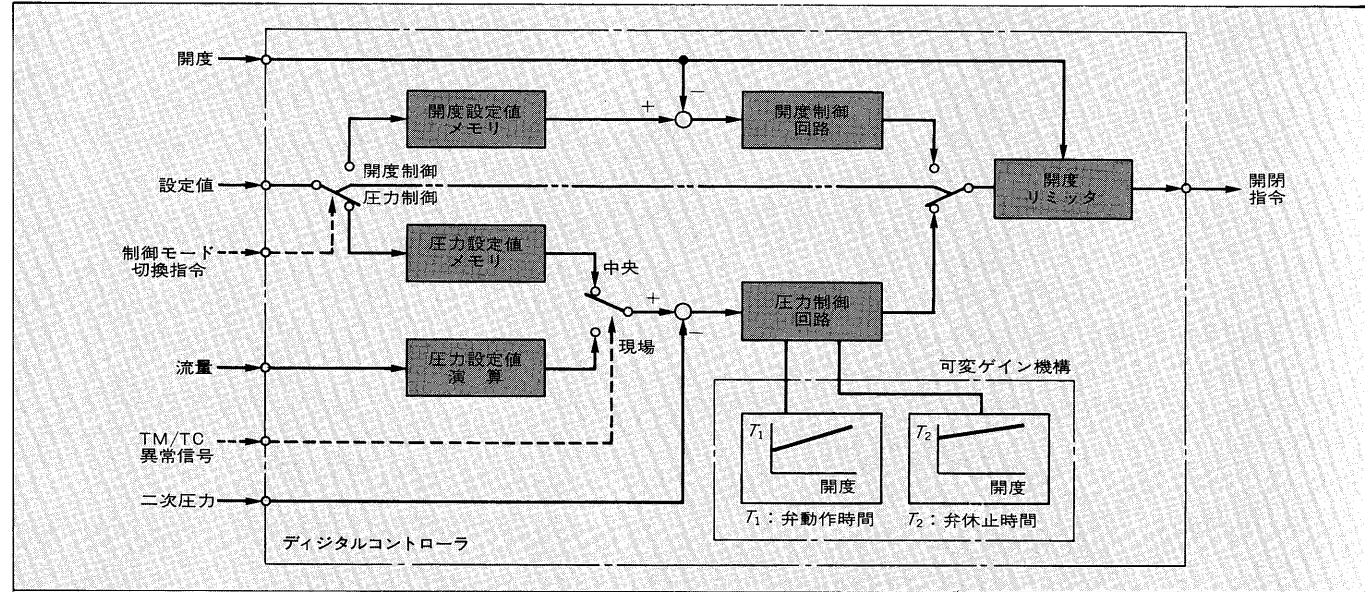


図3 デジタルコントローラの機能



2.3 機能

本システムは図4に示すように、配水制御機能と浄水場制御機能と水源管理機能を持つ総合的な水運用システムである。本稿では、中心的機能である配水制御機能について

述べる。

2.3.1 水圧調整制御

水圧調整制御は図5の機能系統図に示すように、3レベルの二次圧設定値演算機能と三つの補償機能から構成され

図4 水運用システム

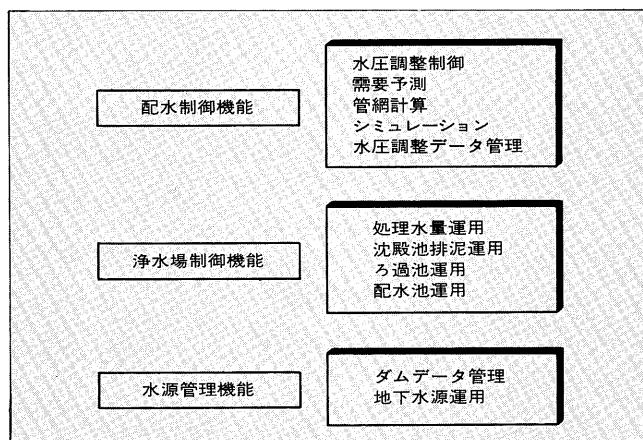
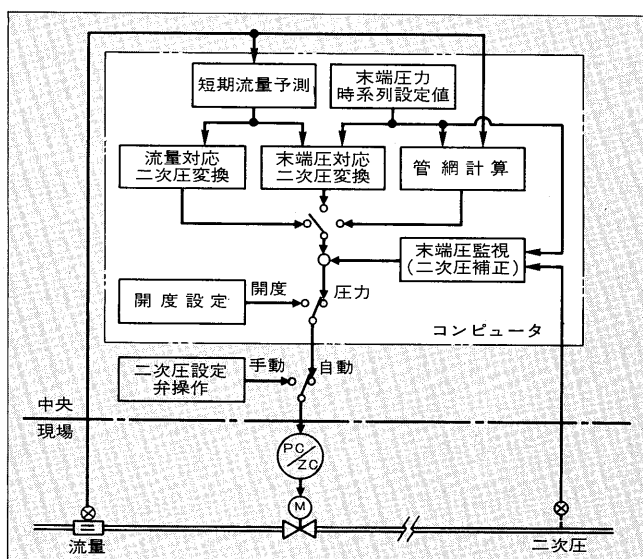


図5 水圧調整制御機能



ている。

(1) 管網モード

末端圧が所定圧となるよう、管網計算により二次圧設定値を求める。

(2) 末端圧対応モード

末端圧時系列設定値を実現するよう、管路定数 r により二次圧設定値を求める。

(3) 流量対応モード

あらかじめ定めた最大流量・圧力、最低流量・圧力から、流量の変化に対応した二次圧設定値を求める。

(4) 二次圧補正

末端圧を時系列的に監視し、目標末端圧と定常的な偏差があるとき、二次圧設定値の補正を行う。

(5) 短期流量予測

過去の流量変化から10～20分先の流量予測を行い、二次圧設定値の演算に使用することにより、需要変化時の一時的な末端圧の過不足を補う。

(6) 開度制御

水圧調整弁の相互干渉を少なくし、むだな動作を排除するため、夜間の需要極小時は開度制御の運用に切り換え、

安定圧力を確保する。明け方、需要の増加とともに開度を大きくしてゆき、所定開度で圧力制御に切り換える。

2.3.2 需要予測

過去数日の給水量実績、最高気温、天候及び当日の予想最高気温、天候から、カルマンフィルタ法で当日の需要量（日量）を予測し、減圧量演算の運用状況から時間変動パターンを推定する。

2.3.3 管網計算

管網計算は水圧調整システムを支える重要機能であり、その目的により次の3レベルの計算が可能である。

(1) 渇水対策レベル

制水弁、止め弁を含めた詳細モデルであり、渇水時の均等給水、減圧給水などを検証する。

(2) 水圧調整レベル

水圧調整弁、主要弁を対象とした管網モデルであり、二次圧設定値、推定圧力、平均圧力の演算に使用する。

(3) 経済運用モデル

全市配水管網を一つにまとめた縮約モデルであり、配水区間の水融通など、経済運用に使用する。

管網データは詳細な渇水対策レベルで一元管理されており、配水区の変更を含め水圧調整レベル、経済運用レベルの管網データは自動生成される。

2.3.4 シミュレーション

渇水時においても公平かつ適切な給水量の調整を行うため、給水量、二次圧、末端圧、弁開度などを与え、水圧調整弁、制水弁（止め弁）操作上で参考とするシミュレーションである。

(1) 減圧シミュレーション

給水制限を必要とするとき、制限給水量と減圧量の相互関係から、減圧運用の参考データを得るものである。

(2) 渇水シミュレーション

配水区の境界変更時の操作上の参考データ及び可能減圧量の限界などを深るものである。

2.3.5 水圧調整データ管理

(1) 配水管網図

シミュレーションの結果はリスト形式の印字だけでなく、流量・圧力の大小により色分けされた管網図としてXYプロットに印字される。

(2) 漏水管理週報

日最小流量、調整幅、推定圧などを週単位で集計印字し、漏水管理データとして使用する。

(3) データバンキング

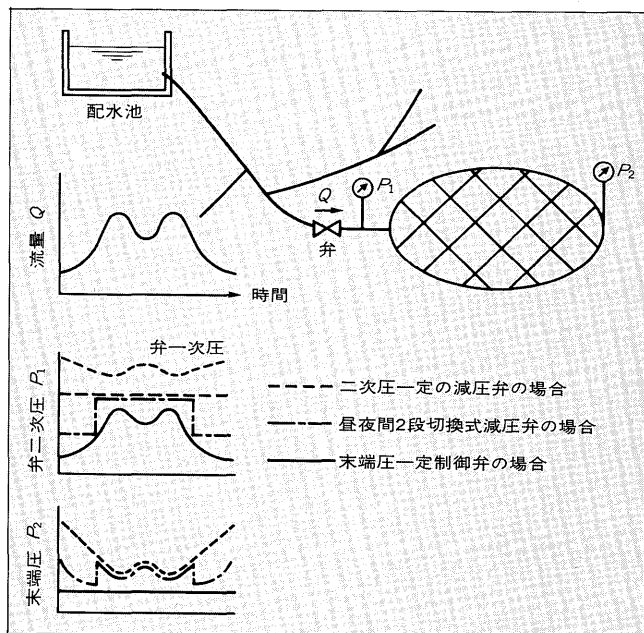
必要データを磁気ディスク、磁気テープに保存する。特に水圧調整運用上重要なデータは磁気ディスクに1年分保存し、前年同日データなどの即時呼出しが可能である。

③ 水圧調整効果

3.1 水圧調整システムとブロック化による効果

一般に、配水池からの自然流下系統の場合、計画最大水量に合わせ、配水池レベル・配水管網が計画されているの

図6 自動減圧弁と水圧調整弁の効果の違い



で、水圧は高目になる。特に、水量の少ない夜間は高すぎる水圧となる可能性があるので、次の3種類の制御方法により弁で減圧する必要が出てくる。

- (1) 弁二次圧一定制御
- (2) 昼・夜間2段切換式弁二次圧一定制御
- (3) 末端圧を一定に保つような制御

このうち、(1)、(2)は自力式の減圧弁で可能であり、(3)は本システムのような水圧調整システムで可能となる。(1)、(2)の場合、末端での水圧を保証するため、水圧が最も低下するときに合わせて設定値を決定しなければならない。その結果、弁での減圧量と末端の水圧は図6に示すような関係となる。水圧調整効果は減圧量が大いほど大きいので、水圧調整システムの優位性が明らかである。

一方、配水区の中を標高をもとにブロック化し、ブロック間は完全に仕切って、それぞれを水圧調整することにより、空間的に見た平均圧力を均一に低く抑えることができる。細かくブロック化すればするほどその効果は大きくなる。また、このようなブロック化によって、常に流向が一定に保てることにより、弁の動作による赤水の心配がなくなる。

3.2 水圧調整効果の算定方法

水圧調整効果を定量的に給水量減少量（効果水量）として算定する。効果水量には使用水量の減少（節水効果）と漏水減少量とがある。これを次のようにモデル化する。

ある基本単位（管網モデルの節点に対応） i の流量 q_i は漏水量 q_{Li} と実使用量 q_{Di} とから成る。

$$q_i = q_{Li} + q_{Di} \quad \cdots \cdots (1)$$

漏水量は水圧 p_i の関数である。

$$q_{Li} = r_{Li} \cdot p_i^\alpha \quad \cdots \cdots (2)$$

ただし、 r_{Li} は係数で、 α は0.5ないし1.15といわれている。使用量は水圧に依存する部分と依存しない部分とから

成り、水圧に依存する部分は使用量そのものにも関係する。これを次のような式で表現する。

$$q_{Di} = q_{Ai} (1 + r_{2i} \cdot p_i^\beta) \quad \cdots \cdots (3)$$

q_{Ai} は水圧に依存しない使用量、 r_{2i} は係数である。

更に、次のように仮定する。

- (1) $\alpha = \beta = 1$ とする。
- (2) r_{2i} は場所によらず一定とする。
- (3) 水圧が同じなら、節点の漏水量は日単位での計画水量に比例する。
- (4) 水圧に依存しない使用量はどの節点も同じ比率で時間的に変動する。
- (5) 末端圧制御をしているので、各節点水圧の時間的変動は小さい。

これらの仮定により、調整ブロック単位の日量 Q と、時間・空間的に平均したブロック平均圧力 P との関係を次のように表すことができる。

$$Q = Q_S - Q_E \quad \cdots \cdots (4)$$

$$Q_E = r_E (P_S - P) = r_{E1} (P_S - P) + r_{E2} (P_S - P) \quad \cdots \cdots (5)$$

Q_S 、 P_S はそれぞれ無減圧時の流量、平均圧力で、 Q_E が効果水量である。式(5)の第1項が漏水減少量、第2項が節水効果で、 r_E 、 r_{E1} 、 r_{E2} はそれぞれ、効果水量係数、漏水減係数、使用量減係数を表す。

圧力調整時と無減圧時では、天候などの諸条件が違うので、平均圧力を変えて統計的にこれらの係数を算出する必要がある。使用水量には、水圧のほか、天候、季節、気温、曜日などが影響する。そこで、平均圧力、天候、日最高気温を説明変数として重回帰分析で r_E を決定する。

$$\hat{Q} = a_0 + a_1 \cdot \theta + a_2 \cdot W + r_E \cdot P \quad \cdots \cdots (6)$$

$\hat{Q}$ は重回帰式による Q の推定値を表し、 θ は最高気温、 W は天候を数値化したもの、 a_0 、 a_1 、 a_2 は係数である。

漏水減の係数 r_{E1} は、使用量がゼロとなる水量で算出すれば良い。それに近いものは日最小流量であるが、日最小流量は瞬時値のため、信頼性が低い。そこで、夜間平均流量を用いることとする。夜間流量は使用量そのものが少なく、かつ天候・気温などの影響も無い（冬期に水道水が凍る都市では影響がある）。そこで、夜間平均流量を日量に換算した水量 Q_N について、夜間平均圧力 P_N を説明変数として、重回帰分析で r_{E1} を決定する。

$$\hat{Q}_N = b_0 + r_{E1} \cdot P_N \quad \cdots \cdots (7)$$

$\hat{Q}_N$ 、 b_0 の意味は式(6)に準ずる。

3.3 データ解析結果

前記の方法により、設定圧力を変えたときのデータから r_E 、 r_{E1} を決定した。

東部2、東部3ブロックについては、4日間ごとに設定圧を下げた時期の36日間のデータをもとに算出した。この間、末端の設定圧力は3.5kg/cm²から2.0kg/cm²（昼のピーク時は2.5kg/cm²）まで下げられている。

また、小野1、小野2ブロックでは、他の要因との相関を除くため、51日間にわたり、毎日、設定値をランダムに変える実験を行った。この間、末端の設定圧は、小野1で

図7 重回帰式による配水量の推定値

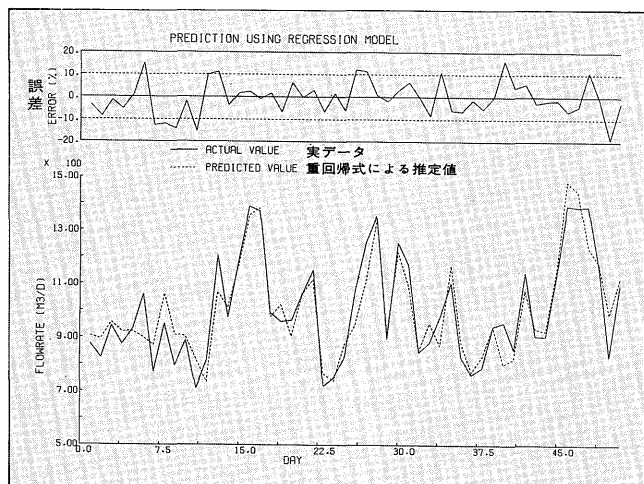
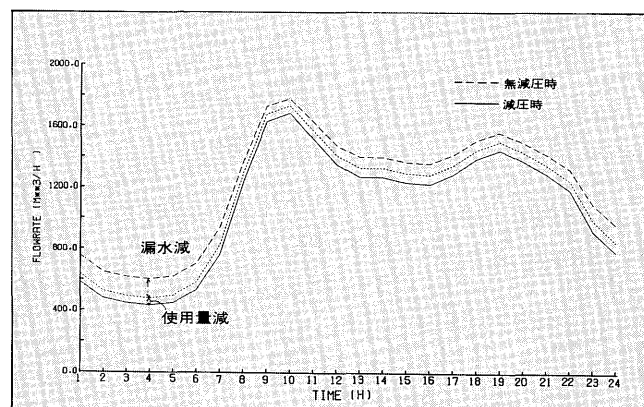


図8 効果水量の変動



は $2.6\text{kg}/\text{cm}^2$ から $3.4\text{kg}/\text{cm}^2$ 、小野2では $3.6\text{kg}/\text{cm}^2$ から $5.6\text{kg}/\text{cm}^2$ まで変化させている。ただし、両ブロック間は制水弁で仕切られてはいるが、水頭差による多少のブロック間流入があり、この項を補正してその影響を取り除いた。図7に、小野2の重回帰式と実データのあてはまりの様子をグラフで示す。

これらによるデータ解析の結果、四つのブロックの平均

として、測定期間の平均流量に対し、 $r_E = 6\% / (\text{kg}/\text{cm}^2)$ 、 $r_{E1} = 3.4\% / (\text{kg}/\text{cm}^2)$ という数字が得られた。

この数字をもとにあるブロックについて、1日の効果水量の変化を計算して求めたグラフを図8に示す。

3.4 有収率向上

松山市では、昭和56年度にモデル地区で水圧調整を実施し始め、昭和59年度には水量的に全市の1/3が水圧調整区域に含まれている。この間、全市の有収率は約3%向上している。有収率は有収水量を給水量で除したものであり、漏水減は有収率向上の要因に、使用水量減は有収率低下の要因となる。したがって、効果水量中に占める使用水量減の割合が、有収率より低ければ水圧調整により有収率も向上する。前記のデータ解析の結果では、使用水量減の割合は半分以下であり、有収率が向上したのもうなずける。有収率向上の原因には、漏水調査などによる管路改良の効果もあるが、過半は水圧調整による効果とみられる。

4 あとがき

本システムの設計、製作、納入に際し、御指導、御協力いただいた松山市公営企業局殿はじめ関係各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) 佐伯泰ほか：松山市における給水圧コントロール，第36回全国水道研究発表会講演集，pp.220～222（1985）
- (2) 黒谷憲一ほか：デジタルコントローラによる配水圧制御，第28回システムと制御研究発表講演会講演論文集，pp.31～32（1984）
- (3) 比企三蔵：漏水量と圧力の関係，水道協会雑誌，572，pp.50～54（1979）
- (4) 雄倉幸昭：漏水量と水圧との関係についての実験，水道協会雑誌，537，pp.38～44（1979）



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。