

高松市水道局向け

上水道配水コントロールシステム

Distribution Network Control System for Water Supply

ネットワーク状になっている配水管網の水圧分布と流量分布を制御する配水コントロールは、上水道にとって重要な分野であるが、非線形特性を示す配水管網の現象を正しくとらえることが難しく、その実現はいまだしの観があった。

このたび高松市水道局が導入した配水コントロールシステムは、30万都市全域を対象とした本格的なもので、前記問題点をオンラインで管網計算し、ポンプ・バルブの最適操作量を決定する新しい配水制御方式を開発し解決した。

その結果、全市の末端圧が $2.0\sim 4.0\text{kg/cm}^2$ に収まり、かつ水源間の相互融通も計画どおり行なえることが確認された。

本論文では、開発した配水コントロールシステムを高松市のデータを引用して報告し、特に、設備計画と配水制御方式について重点的に触れる。

西岡博彦* Hirohiko Nishioka
高木照夫** Teruo Takagi
四宮文人** Fumito Shinomiya
宮岡伸一郎*** Shin'ichirô Miyooka
嶋内繁行**** Shigeyuki Shimauchi

1 緒言

従来、取水場、浄水場などの設備に対する自動化は精力的に取り組まれてきたが、配水池以下の配水管網に対する制御についてはほとんど手がつけられていなかった。このため、配水システムの管理上の問題として、管網内の水圧、流量の分布がつかめず、水圧分布が不均一になり、地域により、また時間によって水の出が悪い場所があったり、逆に夜間には水圧が高くなって、配管部の漏水が多くなったり、管破裂事故が起こるなどの問題があった。

こうした問題の解決と、省エネルギー、水の有効活用を目的に、このたび高松市水道局は配水コントロールシステムを導入した。

本システムでは、小容量、高性能な管網解析ソフトウェアを開発し、高速制御用計算機を採用することにより、従来オンラインでは難しかった配水管網の現象を実時間レベルでとらえることにより、ポンプ・バルブの最適操作量を決定する新しい配水制御方式を開発して、種々の問題点を解決した。

結果として、高松全市の末端圧が $2.0\sim 4.0\text{kg/cm}^2$ に収まり、かつ水源間の相互融通も計画どおり行なえることが確認された。

本論文では、開発した配水コントロールシステムの中核技術である設備計画と配水制御方式について重点的に述べ、更に配水コントロールシステムの構成と運転実績について述べる。

2 目的と機能

我が国の上水道で、全配水量の約16%が漏水によって失われていると言われている。この原因の一つとして、配水システムの圧力過剰が挙げられる。特に、夜間の需要減少時に管網内の水圧が上昇し、漏水量が増える。また、配水圧が高すぎると、ポンプ吐出し圧が高く無駄なエネルギーを消費することになる。これらの不都合を除くため適正な末端圧で配水される必要がある。

圧力の適正化のほか、水源間の相互融通という要請もある。例えば、他組織から買水している場合、契約受水量を守る必要がある。このような状況では、需要の増減に応じて自己水

源との間で水を融通し合い、契約受水量どおりの配水を行なうことが望まれる。また、ある水源が枯渇した場合や事故などで配水不能な場合は、他の水源から水を融通するという必要となる。更に、需要量の少ない夜間には、ポンプ圧送の水源を停止して、省エネルギーを図ったり、製造コストの安い水を重点的に配水するなどの目的がある。

上記は、配水管網に対する圧力制御と流量制御という二つの機能に集約されるが、配水コントロールは必然的にトータルシステムの形態をとるので、無人施設の中央監視制御機能も合わせて計画されることになる。

図1に配水コントロールの目的と機能を整理して示す。

3 設備計画

管網の中の適当な位置に、圧力監視所とかバルブ制御所を少しずつ導入し、最後に埋め尽くされたときに、配水コントロールが完成されるという考えがあるとすれば、これは誤りである。

配水コントロールで、設備計画は配水制御方式と同様に重要である。バルブ制御所の位置が悪ければ、制御ができる範囲もわずかである。

配水コントロールの設備計画はトップダウンである。配水コントロールで、何を目標しているかをまず明確にさせることが肝心である。目的は図1に示したように多くあるが、各市の事情を踏まえて決める。次に、この目的に合うように圧力監視所とかバルブ制御所や増圧ポンプ所の位置を決め、更に管路の変更も行なう。そして制御したときに、どこまで効果があるかを事前に見極める。

なお、設備計画は配水制御方式が実現可能なものであることが必要であり、この点で制御方式に裏付けされた設備計画ということになる。

3.1 バルブ制御所位置決定¹⁾

バルブ制御所の設置目的は、サービス圧の制御と水源間の配水量配分制御である。このため、基本的には、水源間で相

* 高松市水道局工務課 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所システム開発研究所 **** 日立製作所システム事業部

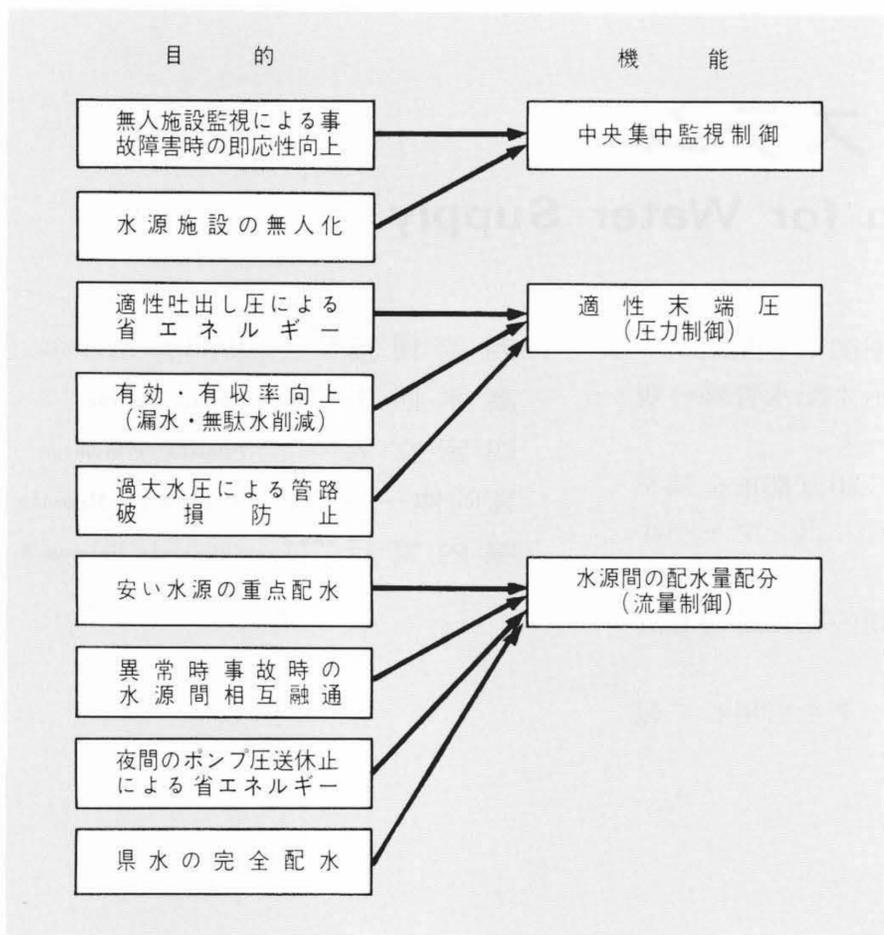


図1 配水コントロールの目的と機能 配水コントロールの目的は数多くあるが、機能的には、中央集中監視制御、圧力制御及び流量制御の三つに集約される。

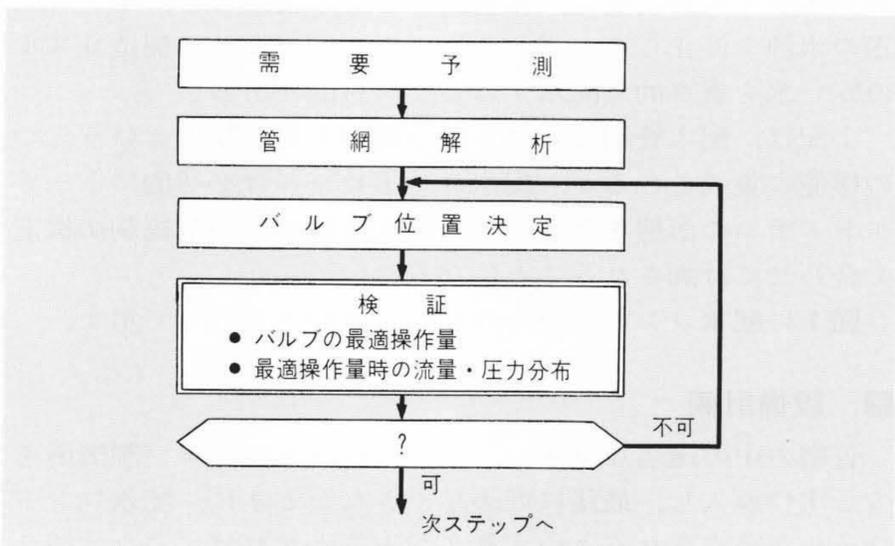


図2 バルブの位置決定手順 計画年度の時間最大と最小の需要量をベースとし、目的にかなう位置にバルブを設置する。次に、オンライン配水制御方式“NEFLAN-C”を使い、制御時のシミュレーションを行ない検証する。

互融通できる幹線で、かつ水圧の高い地域に流入する管路に設置すればよい。

図2に位置決定の手順を示す。まず、配水コントロール目標年度の年間時間最大需要量と年間時間最小需要量を予測する。需要量は、この最大値と最小値の間を連続的に変化するので、この区間をあるピッチ、例えば $1,000\text{m}^3/\text{h}$ ピッチで区切り、その各々の需要量に対し管網解析を行なう。このデータを基に、バルブ制御所の位置決定を行なう。高松市の場合、基本的に自然流下方式の配水であるので、次に述べるような考えで決定した。

- (1) 高松市を標高に従い、高区〔(35~30m)以上〕、中区〔(35~30m)~10m〕及び低区(10m以下)に分ける。
- (2) 高区と中区の分かれ目に1段目のバルブを、中区と低区に分かれ目に2段目のバルブを設置する。
- (3) バルブは幹線で、かつ相互融通にも機能する位置に設置

する。

(4) 運転に当たっては、1段目のバルブは中区が適正圧となるように、2段目のバルブは低区が適正圧となるように制御する。

次に、実際にその位置に設置したとき、どのような操作量をもたせたら最適な運用になるか、また、そのときの流量配分と圧力分布が適切となっているか、を検証する²⁾。この検証には実際にオンライン制御に使用する配水制御方式“NEFLAN-C”(Network Flow Analysis and Planning Method-Control)を使って行なう。

このようにして決定したバルブ制御所位置を図3(a)に示す。

3.2 圧力監視所位置決定¹⁾

圧力監視所の目的は、

- (1) 管網の圧力分布を監視する。
- (2) 管網の圧力バランスが崩れたときの制御の目安とすることである。また、管網の圧力を常時監視することにより、管路破裂などの事故を迅速に知ることできる。

これらの目的に照らすと、圧力監視所は下記の条件を満た

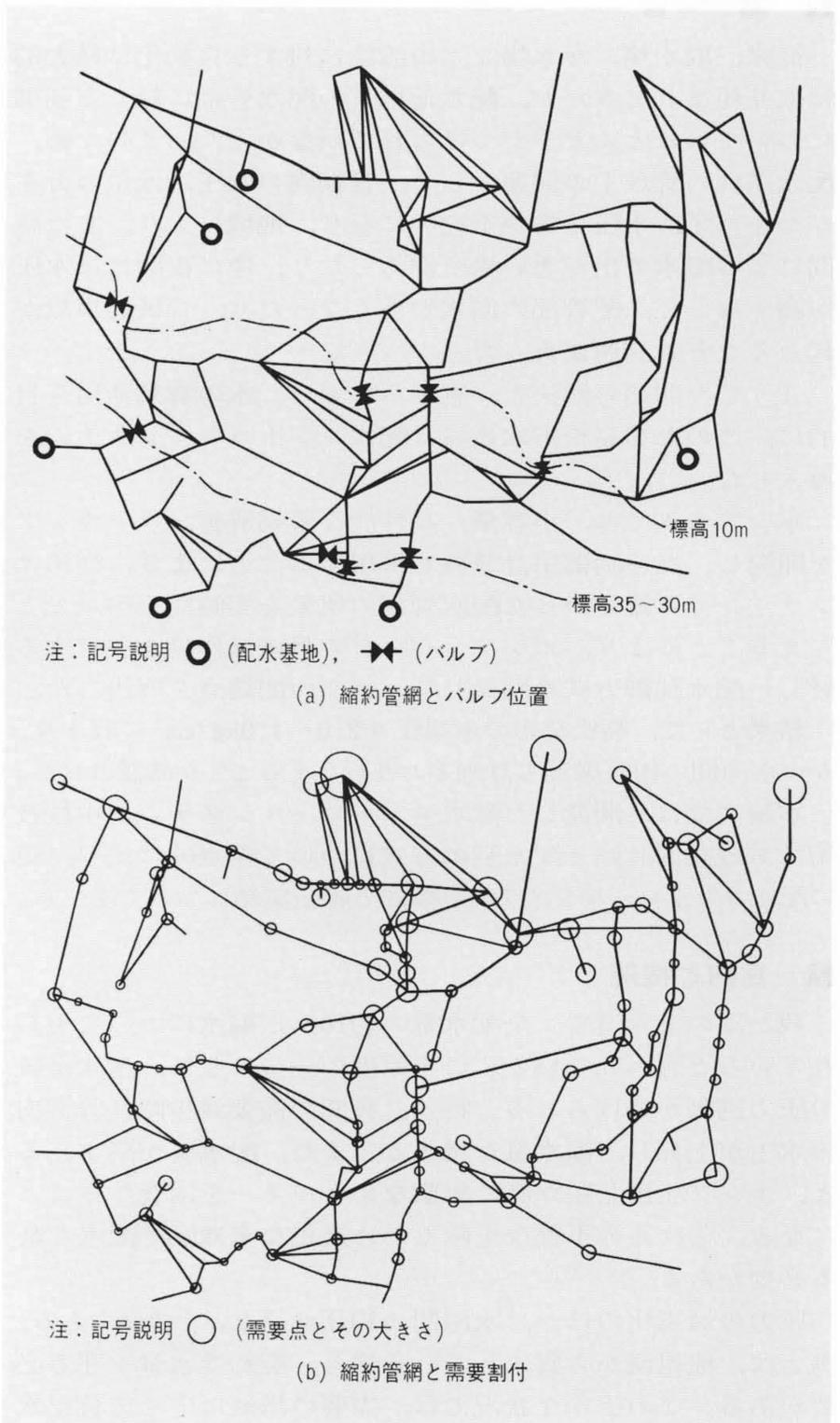


図3 縮約管網図 高松市の管網を図示するように縮約化し、実機に入れている。配水制御方式“NEFLAN-C”は、この管網に対し管網計算を行ない、8個のバルブの最適開度を求める。

す区域に設置することが望ましい。

- (1) 配水系統別に、同じようなサービス圧となるノードのグループに1点ずつ設置する。
- (2) ポンプ・バルブ制御による影響の大きい区域に設置する。
- (3) (流量の多い)幹線管路に設置する。

このような区域を抽出するためには、配水系統別に、サービス圧の等圧線を引き、同じ等圧線で囲まれる範囲に1箇所ずつ圧力監視所を設置すればよい。ただし、ポンプ・バルブ制御による影響の大きい区域に圧力監視所を設置するという観点から考えると、ポンプ・バルブ制御を行わない場合と行なった場合で、それぞれ異なる等圧線に囲まれる区域に設置することが望ましい。そこで、まず、需要最大時のポンプ・バルブ制御を行なった場合、行なわない場合の等圧線を重ね合わせ、異なる等圧線で囲まれる区域を求める。次に、需要最小時についても同様の区域を求め、両者の共通区域を抽出すれば、前述の条件を満足しながら、必要最小限の圧力監視所設置区域が求められる。このようにして得られた区域の中から、道路状況、幹線支線を区別して、最終的な設置位置を決定する。以上の手順をフローチャートにしたものを図4に示す。

3.3 主・副弁構成³⁾

需要量の多い昼間はバルブを開き、需要量の少ない夜間はバルブを絞る。バルブの絞り具合は、損失係数で表わされるが、配水コントロールを行なう場合、損失係数の所要値はゼロから数万まで必要となる。しかし、制御の安定性から一つのバルブで、これだけの制御可能な損失係数を与えることは不可能である。

このため、図5で示す主・副弁構成をとっている。この場合の運用は、小さな損失係数を与えるときは副弁を全閉にし主弁で制御を、大きな損失係数を与えるときは主弁を全閉にし副弁で制御すると、広範囲の制御が可能で、かつ副弁径を小さくとることができる。

このような運用を行なうときの副弁径は次式で求まる。

$$D_{副} = D_{主} \left(\frac{F_{副MIN}}{F_{主MAX}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

ここに $D_{副}$ 、 $D_{主}$ ：副弁径及び主弁径

$F_{副MIN}$ ：副弁制御範囲の最小損失係数

$F_{主MIN}$ ：主弁制御範囲の最大損失係数

次に主・副弁の切替方法について述べる。例として、主弁から副弁に切り替えるとき次の三つの方法がある。

- (1) 主弁を全閉にしてから副弁を開く。
- (2) 主弁・副弁を同時に動かす。
- (3) 副弁を目標開度にしてから主弁を閉じる。

(1)の方法は締切り状態の時期があるため好ましくない。(2)の方法は切替時の等価合成損失係数が5,000~10,000を超える。これは一時的に全閉にしたときと同等の水撃現象を表わす。(3)の方法は一時的に二次圧が上昇するが、副弁径が前述のように定められているので、最大でも当初減圧値の $\frac{1}{3}$ しか二次圧が上昇しない。

図6に切替時の水撃シミュレーション例を示す。同図の例では、切替前の減圧値10mに対し、副弁が全開となったときの減圧値は5mとなっている。これは二次圧が高くなったためこの管路の流量が増え、より大きく減圧されたためである。

副弁を開く過程で、バルブの一次圧は下降している。配水制御の場合、厳密に言えばバルブの減圧値が問題なのでなく二次圧を適正にすることが問題である。下降した一次圧に対し5m減圧されているのであるから、切替時の二次圧上昇は

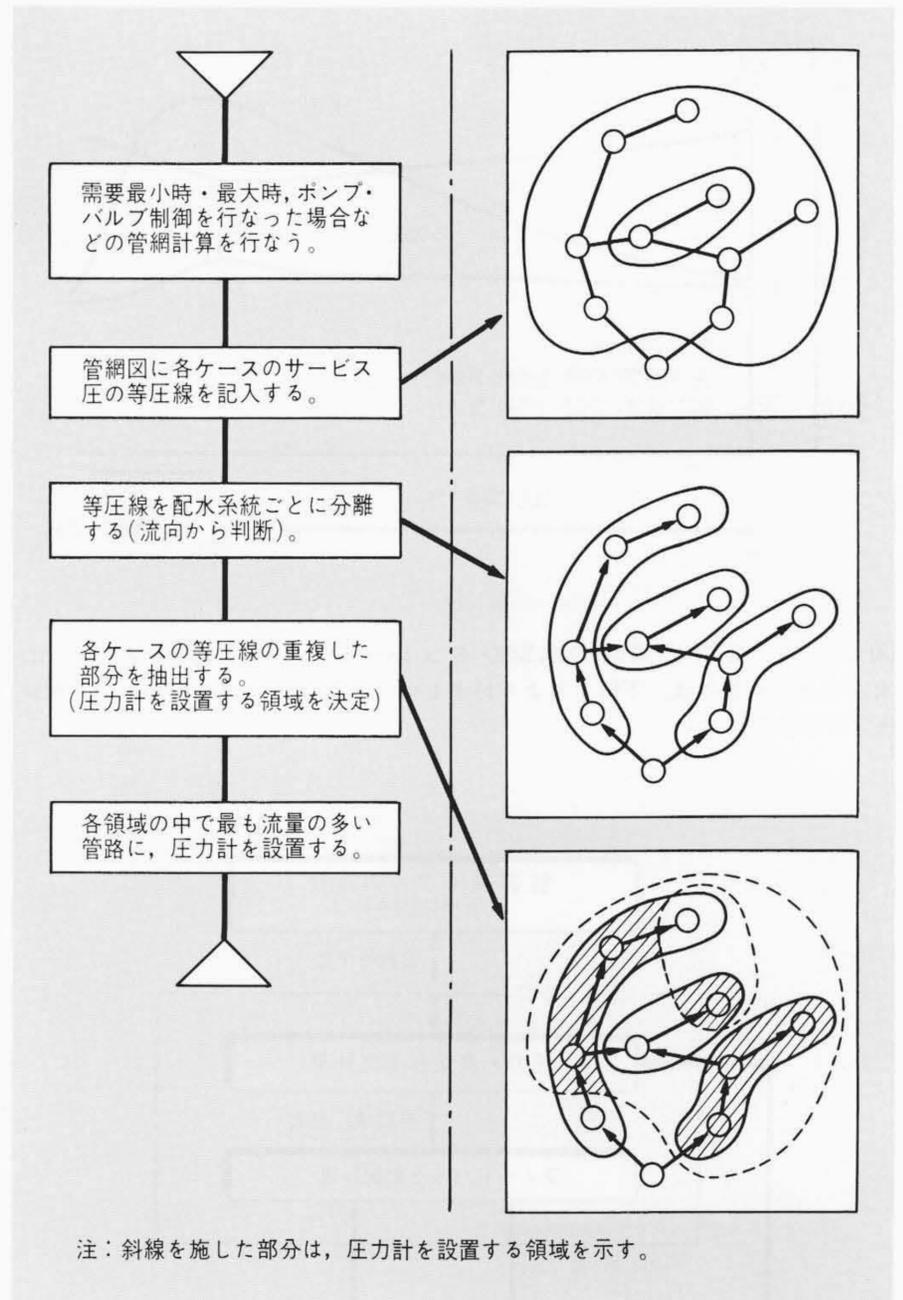


図4 圧力監視所の位置決定手順 圧力監視所は、需要量や制御状態がどのように変わっても、常に、全市の圧力分布が把握できる位置に設置する。

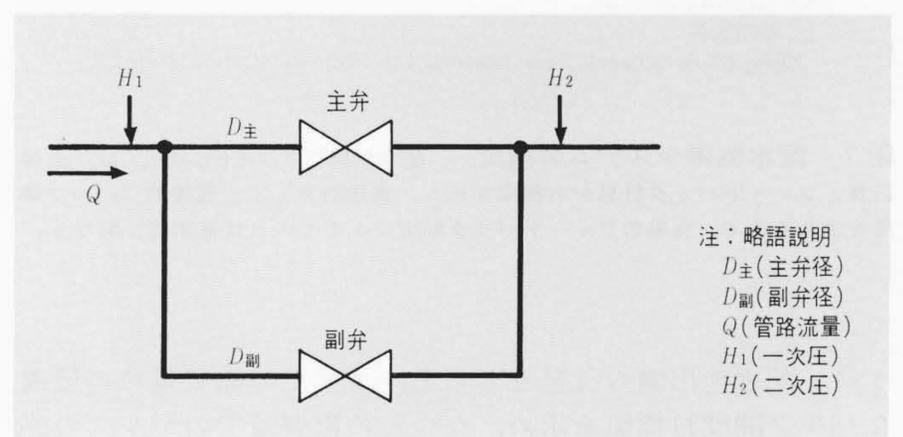


図5 主・副弁構成 主・副弁構成にすることにより、広範囲な制御を行なうことができる。

更に少なくなる。図6の例では、2.5m程度の二次圧上昇であり、実運用上全く問題とならない。

4 配水制御方式“NEFLAN-C”⁴⁾

4.1 制御方式

需要の変動に左右されず、管網内の圧力、流量を適正に保つため、配水池出側流量や管網内圧力の計測情報に基づき、多数のバルブを操作する。しかし、バルブ操作は圧力と流量が強い非線形特性をもち、また、これらが全域にわたって相互に干渉し合っていることから、単純なフィードバック制御だけでは不可能である。このため、本方式では図7に示すよ

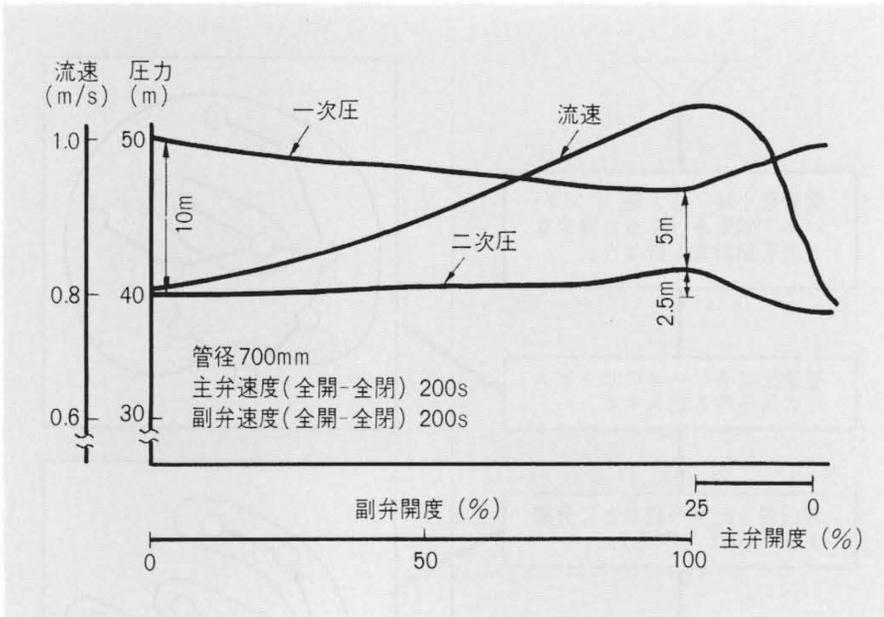


図6 主・副弁切替時の水撃シミュレーション 切替の過程で、二次圧が上昇するのは、下降するより好ましい。また、上昇値もわずかで、末端圧に影響を与えない。

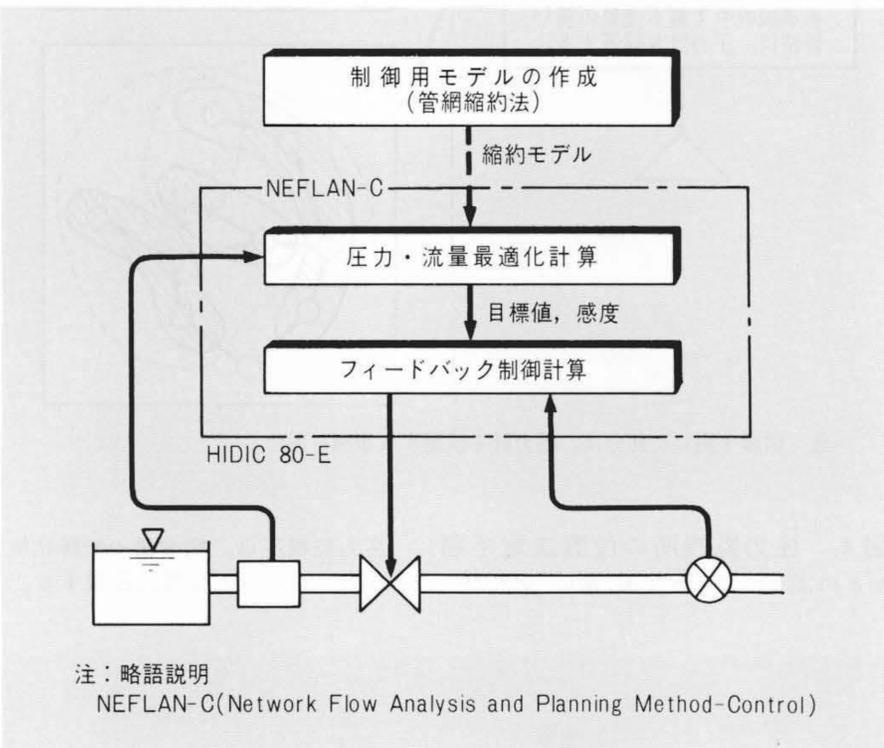


図7 配水制御システムの構成 配水制御方式“NEFLAN-C”は、最適計算とフィードバック計算から構成される。最適計算して、直接的にバルブ開度を決めるので、従来のフィードバック制御によるものとは基本的に異なる。

うに、配水池出側の流量をとらえ、まずその需要量での最適なバルブ開度目標値を求め、かつその需要量でのバルブの感度を求める圧力・流量最適化計算部分と、感度を用いて微小な需要変動に対処し計測値を目標値に合致させるフィードバック制御計算部分で構成した。

圧力・流量最適化計算部分では、管網内の圧力、流量の適正值からの偏差自乗和が最小となるようなバルブ開度を求める。この最小化には、問題の特徴を考慮し非線形最適化法の一つであるSimplex法を用いている。Simplex法の計算過程では、目的関数値を求めるために、数十回から数百回にわたる管網計算が発生し、オンラインで計算を行なうためには、この部分の高速化が必須となる。そこで、管網計算問題を管網内水流のエネルギー最小原理を利用して、最小費用流問題に変換することにより、高速のネットワークフロー算法の適用を可能にする。ネットワークフローの算法としては、Primal法及びPrimal-Dual法と呼ばれる方法を、図8に示すようにその特徴に応じて適宜使い分けることにする。初回の管網計

算では、基準となる流れが全く得られていないため、ゼロの状態から計算可能なPrimal-Dual法を用いる。Simplex法の計算過程でバルブ開度の変更されたときの管網計算には、前段階での流れを必要な範囲で修正するだけで、新たな平衡解を求めることのできるPrimal法を採用する。このような計算構造をとることにより、最適操作量の高速算出が可能となる。また、求めた最適操作量の周りでバルブ開度を微小変化させ、これに対しPrimal法を適用すれば、フィードバック制御計算のための感度も同時に求められる。

管網計算には、全ノードの需要量データが必要であるが、これには、総配水量に先験的に定めた需要分布比率を乗じた指定値を利用し、負の分布からの偏差による影響はフィードバック制御で吸収する。フィードバック制御部分は、簡単なPI(比例・積分)動作により構成されるが、感度の変化に応じてゲインが更新される可変ゲインの方式を採ったため、非線形性の強い対象に適したものとなっている。

4.2 管網縮約

一般的に、制御演算に用いるプロセスモデルは、精度が保証される限り簡易なものとし、制御量算出の時間を短縮することが望ましい。このような視点から、配水管網設計用の精密かつ大規模な管網モデル(原管網と呼ぶ。)を縮約変換し、制御用の簡易管網モデル(縮約管網と呼ぶ。)を自動的に作成する方法を配水制御方式“NEFLAN-C”と合わせて具備している。

本縮約法の特徴は、距離に基づくネットワーク分割アルゴリズムを用いて管網を複数領域に分割した後、同一領域内の全ノードを単一のノードで表現することにより、ノード数の大幅な削減を図る点にある。また、制御演算で要求されるモデル機能を考慮して、

- (1) 縮約後も、プロセス(管網)の入出力であるバルブ操作量、圧力監視情報を直接扱えるモデル構造とする。
 - (2) 需要変動に対し、非線形的に変化する流量、圧力を、制御上必要とされる精度で計算できる。
- の2点が可能となっている。

本方法により、高松市の486ノードの配水管網を前出図3(b)に示すように、142ノードに縮約変換した。原管網と縮約管網のそれぞれで定常流シミュレーションを実施し、縮約管網の近似精度を評価したところ、原管網に対し平均圧力誤差約0.5m、最大圧力誤差約2mと良好な結果が得られた。NEFLAN-Cによる制御量算出に縮約管網モデルを用いれば計算時間が短縮され、NEFLAN-Cの高速化手法と合わせて、実時間での配水制御が可能となった。

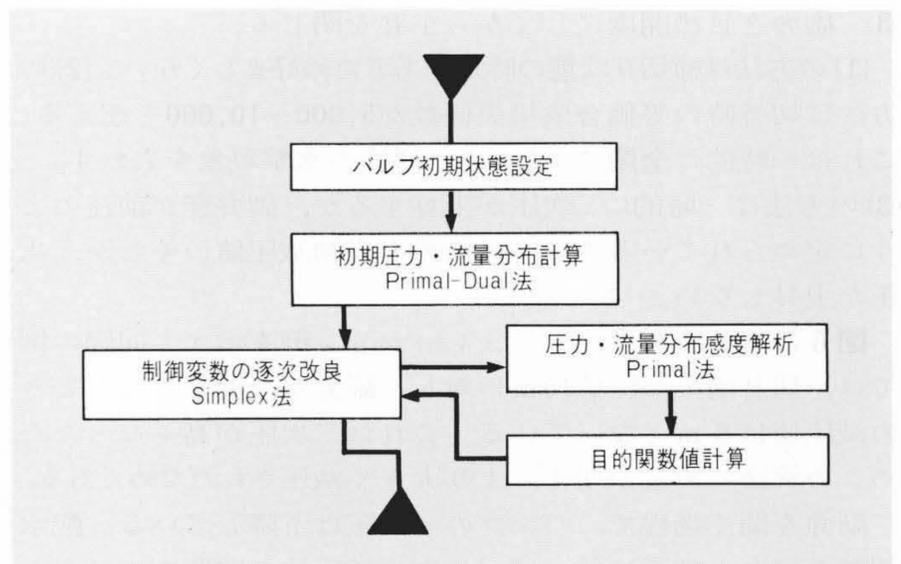
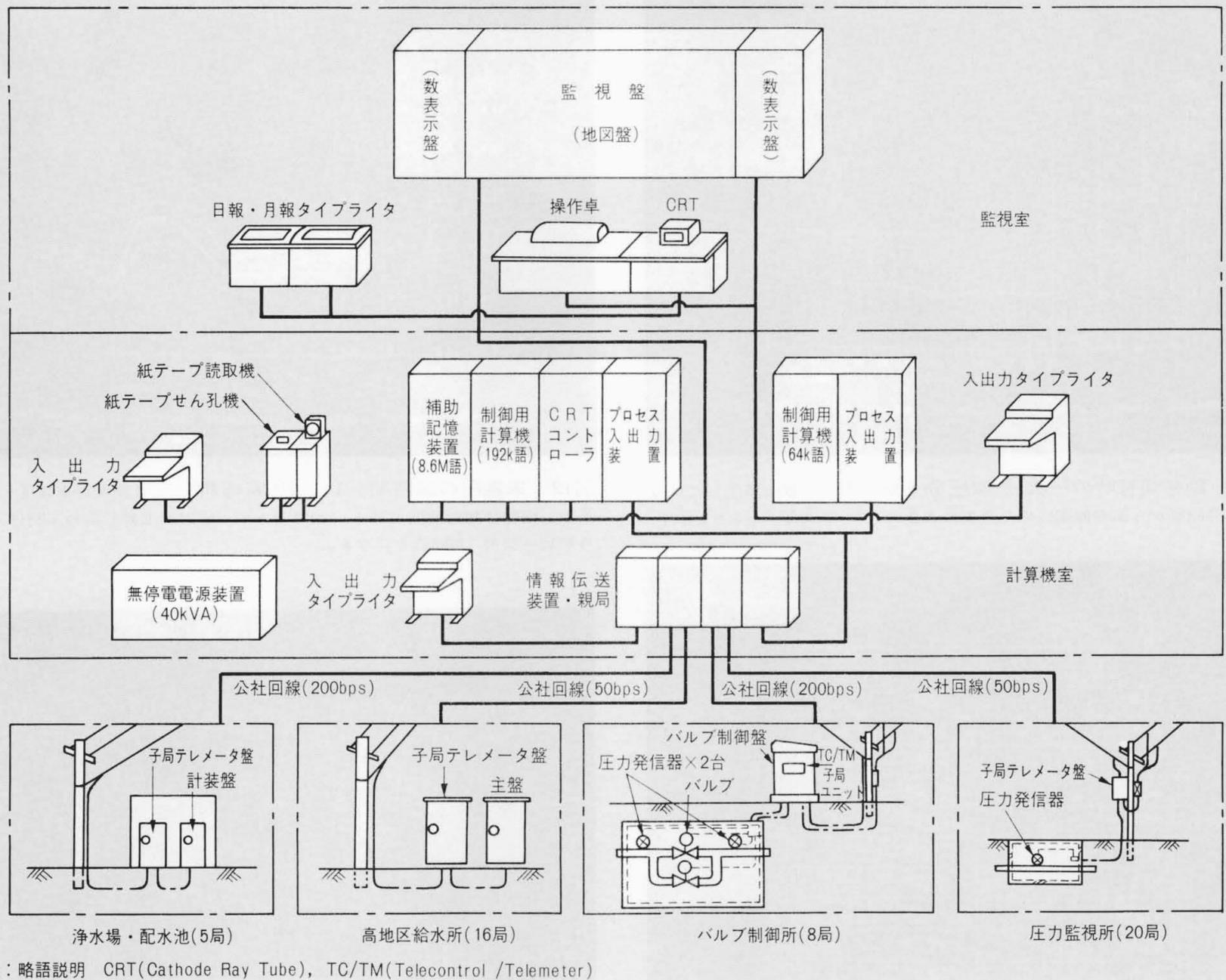


図8 圧力・流量最適化計算の構造 特徴に応じて使い分ける計算構造にすることにより、最適なバルブ開度を高速で演算することが可能になった。



注：略語説明 CRT(Cathode Ray Tube), TC/TM(Telecontrol /Telemeter)

図9 高松市配水コントロールシステム構成図 テレメータで吸い上げた情報をもとに、最適なバルブ開度を計算し、バルブ制御所へ設定値として送出する。

5 システム構成

配水コントロールシステムは、図9に示すように、計算機と情報伝送装置を中核としたものとなる。情報伝送装置は、浄水場・配水池、高地区給水所、圧力監視所が1:nテレメータであり、バルブ制御所が1:Nテレコントロールテレメータとなっている。

子局と回線はシングルで、中央設備は二重化している。親局は完全二重化し、計算機はシングルであるが、たとえダウンしても、バルブ制御とシステム監視はできるようになっている。

バルブの制御は配水制御方式“NEFLAN-C”が計算した最適バルブ開度をCRT(Cathode Ray Tube)にいったんガイダンス表示し、オペレーターが確認のうえ、制御出力するようになっている。

伝送項目を表1に示す。子局数が49局と多く、1局当たりの伝送項目が少ないのが特徴である。

6 運転実績

図10に主・副弁切替時の一次圧、二次圧トレンドを示す。先の図6のシミュレーションと同様、切替途中に一次圧は下降し、二次圧は上昇している。20m減圧時の二次圧の一時的圧力上昇は5mであり、運用の上で全く問題とならず、当初の弁設備計画の正しいことが実証された。

表1 伝送項目表 入力データは監視盤とCRTに表示されるほかに、日報、月報としてタイプライタに印字される。

データ	子局名					
	浄水場 (ポンプ 圧送)	配水池 (自然 流下)	高地区 給水所	圧力 監視所	バルブ 制御所	
子局数	2	3	16	20	8	
計	流量積算値	○	○	—	—	
	流量瞬時値	○	○	—	○	
	圧力	○	—	—	○	一次圧 二次圧 ○
測	配水池水位	○	○	○	—	
	弁開度	—	—	—	—	主弁 副弁 ○
表	停電	○	○	—	—	○
	通話要求	○	○	—	—	○
	ポンプ運転・故障	—	—	○	—	—
示	浸水	—	—	—	○	○
	バルブ状態	—	—	—	—	○
制	流向	—	○	—	—	—
	バルブ開・閉、停 開度設定値	—	—	—	—	○

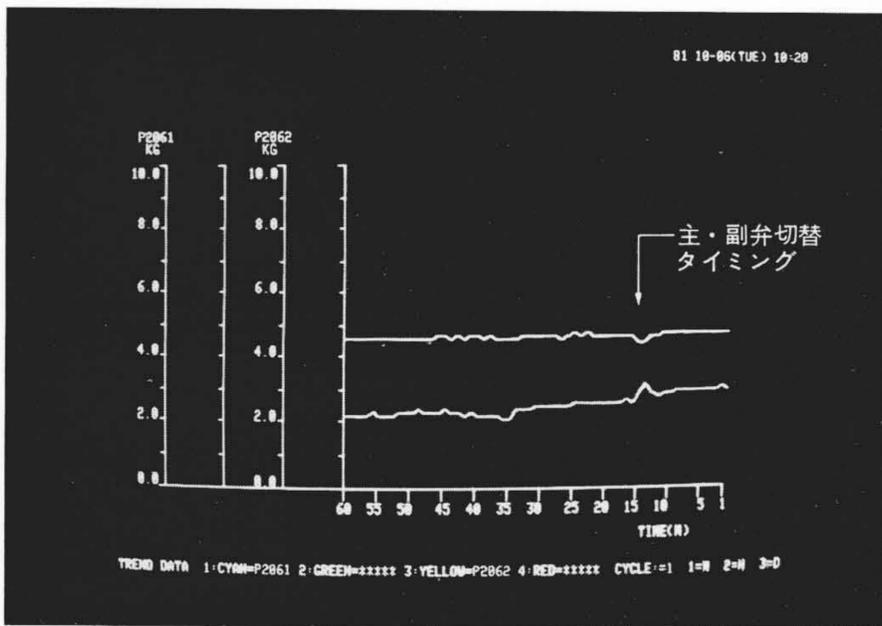


図10 主・副弁切替時の一次・二次圧分トレンド 20m減圧している状態で、主弁制御から副弁制御に切り替えたときの一次・二次圧トレンドを示す。

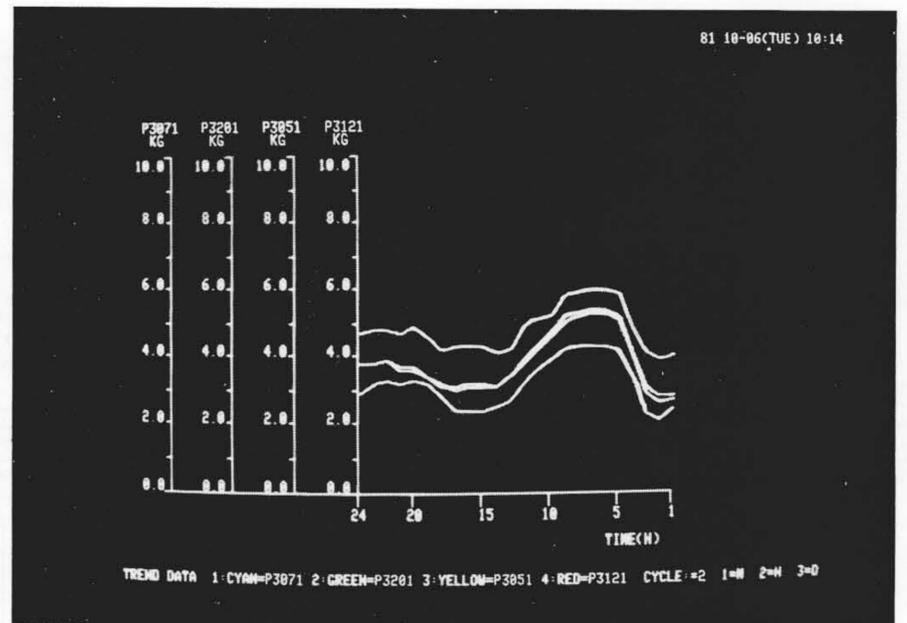


図12 末端圧の24時間トレンド(制御前) 4箇所の末端圧トレンドを示す。横軸は相対時間である。22時ごろから圧力が上昇し始め、明け方5時ごろがピークで、60m近くになる。

81 10-06(TUE) 10:25

71102

NO	シララ	71102 (KG/CM2)			UI	NO	シララ	71102 (KG/CM2)			UI
		1	2	3				1	2	3	
1	中山町	3.1	2.7		4	11	喜松町	3.7	4.1		1
2	鹿市町	3.7	3.5		2	12	春日町	4.4	4.7		1
3	鹿市町	3.9	3.7		1	13	新田町	3.9	4.5		1
4	鹿市町	3.0	3.1		3	14	東山崎町	4.2	4.6		1
5	笑地町	3.5	3.2		3	15	前田東町	3.6	4.1		1
6	朝日町	3.4	3.1		2	16	下田井町	4.2	4.2		1
7	木太町	3.5	3.3		3	17	川島東町	3.7	4.2		2
8	屋島西町	3.0	4.2		1	18	十川東町	3.3	3.7		2
9	屋島西町	3.0	4.4		1	19	多肥上町	2.7	3.2		2
10	高松町	3.7	4.2		1	20	多肥下町	3.0	3.2		1

NO=xx シララ=xxxx UI=xxx

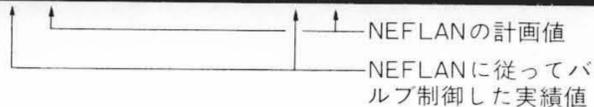


図11 圧力監視画面 20箇所の末端圧とNEFLAN-Cの計画値との偏差は平均3.6mであり、よく一致している。

図11は20箇所の圧力監視所からテレメータで吸い上げられる末端圧の分布を示すCRT画面である。本画面は計測値とNEFLAN-Cがガイダンスしたとおりのバルブ開度にしたとき、こうなるであろうと予測した計画値と並記して表示している。計測値と計画値との偏差は需要レベルにかかわらず、平均3～4mで、よく一致している。また、計画値と計測値が大幅に狂ったときは、この近くの管路が破裂したと判断することができる。

図12は4箇所の末端圧トレンドで、バルブ制御を行わないときを示す。需要量の少ない0時から5時に高水圧を示す山ができています。そして、明け方の6時から9時にかけて急激に圧力が下降する。

図13は、バルブ制御後の末端圧トレンドである。圧力は平坦となり、特に夜間の高水圧がなくなっている。

設備計画に従って設置した8箇所のバルブを配水制御方式“NEFLAN-C”のガイダンスどおり制御することにより、夜間の高水圧をなくし、更に朝の需要ピーク時に低水圧となる地域を適性圧にできることが確認された。

また、配水池間の配水量バランスも、8箇所のバルブで制御できるほか、浄水場ダウン時の相互融通も、事前計画どおりの試験結果を出すことができた。

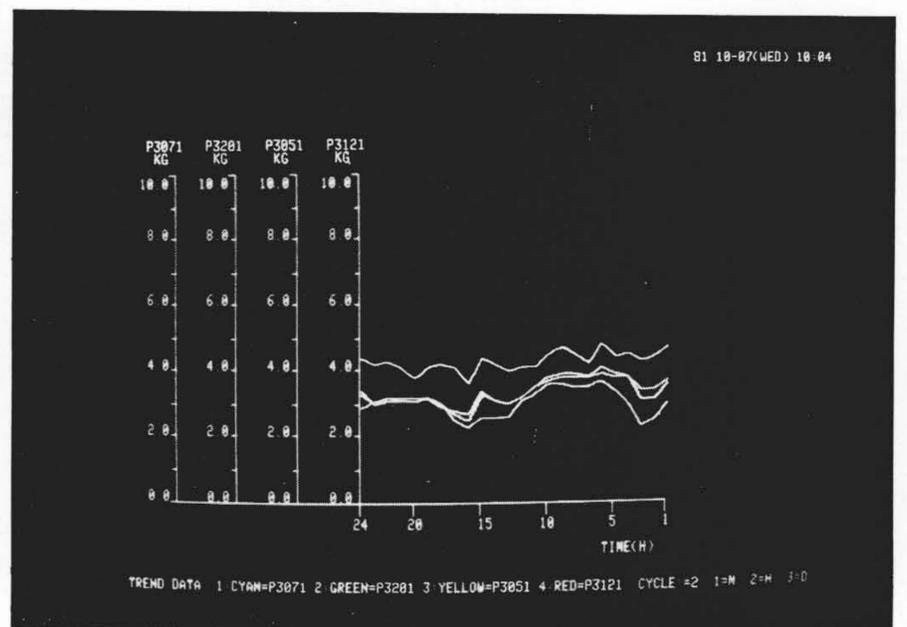


図13 末端圧の24時間トレンド(制御後) 1日を通して制御したときの末端圧トレンドである。圧力は平坦で、特に夜間の高水圧がなくなっている。

7 結 言

配水コントロールの目指すところは、取水から配水に至るまで、それぞれ独立した機能をもつ諸施設の運営を相互に関連づけ、システム化して全体としての施設管理の最適化を図るものであるが、狭義には、配水池以下の配水管網を対象としてとらえることができる。

高松市配水コントロールシステムは、配水コントロールの最も困難な部分である配水管網に対する制御を実現した。

終わりに、設備計画から運用開始までの20箇月の間、終始熱心な御指導をいただいた関係各位に対し、感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 嶋内, 外: 配水コントロールのための監視・制御点設置位置決定法の開発, 水道研究発表会(昭53-5)
- 2) 林, 外: 配水制御におけるポンプ・バルブの最適操作量計画, 水道研究発表会(昭56-5)
- 3) 高木, 外: 配水制御における減圧弁設備計画, 水道研究発表会(昭56-5)
- 4) 宮岡, 外: 上水道配水制御方式“NEFLAN-C”の開発, 日立評論, 64, 2, 135~140(昭57-2)