

上水道配水制御技法“NEFLAN-C”の開発

Methods for Controlling Water Distribution Networks

配水システムの圧力や流量を、バルブなどの操作により希望値に保つという配水制御は、漏水量を減少させる効果が大きいことから、強く望まれている。これを実現するためには、計算制御システムの導入が不可欠であり、開発した配水制御方式“NEFLAN-C”は、上記システムに組み込みオンラインで最適な操作量を算出するためのソフトウェアである。管網の大規模性や圧力と流量の非線形的相互関係から生ずる制御演算上の困難さを克服するため、内蔵する管網モデルの簡略化と、ネットワークフロー理論によるモデル計算自体の高速化の二面から技術開発を行なった。この結果、配水制御システムの実用化が可能となり、その効果として約2割の漏水削減可能の見通しを得ている。

宮岡伸一郎* Shin'ichirô Miyaoaka

松橋 誠 寿* Motohisa Funabashi

高 木 照 夫** Teruo Takagi

嶋 内 繁 行*** Shigeyuki Shimauchi

1 緒 言

上水道系は、取水口から浄化処理プロセスを通り配水池に至る導送水システムと、配水池から管網を経て需要端に至る配水システムとに大別できる。これらの施設の大規模化、複雑化に伴い、従来の人手による運用制御が困難となりつつあることや、効率の良い運用制御を行なうことにより省資源、省エネルギーが図れるとの期待から、計算機システムの導入が活発化している。特に、配水システムの圧力や流量を希望値に保つという配水制御システムは、漏水削減の効果が大きいと期待されるため、そのニーズは大きい。それにもかかわらず、配水制御システムの実用化が一歩立ち遅れた理由として、管網の大規模性や圧力と流量の間の非線形的相互関係に起因する制御の困難さが挙げられる。平均的規模の配水システムでも、考慮すべき圧力、流量の個数は1,000を超え、しかもこれらが相互に非線形的に関連し合っているため、常とう的な方法ではオンラインで最適なバルブ操作量を求めることは難しい。

今回開発した“NEFLAN-C”(Network Flow Analysis and Planning Method-Control)は、操作量算出に用いる管網モデルの簡略化と、ネットワークフロー理論による演算自体の高速化により、上記配水制御を実現可能とする新方式である。なお、本方式は、「流体ネットワーク系の最適構成・制御技法」NEFLANシリーズの一環として開発したものである^{1),2)}。

2 配水制御システムの構成

2.1 配水制御の要請

我が国の上水道で、全配水量の約2割が漏水によって失われていると言われている³⁾。この原因の一つとして、夜間など需要の減少する時間帯に管網内の水圧が上昇し、管路の接続部分などからの漏水量が増大することが挙げられる。また、昼間の需要増大時でも、地域間で圧力の不均等が発生し、これがユーザーへの公平なサービスという観点から問題となっている。これらは共に、バルブを操作して管網上の圧力分布を適正化することにより、かなり解消できると期待される。

圧力の適正化のほか、水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

から水を融通し、他組織からの受水量を一定に保つことが望まれる。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。これら水源間の相互融通も、バルブ制御によりある程度可能である。

配水制御システムに要求される機能は、以上述べたように水圧の適正化と相互融通のための水量制御とに大別される(図1)。これらを計算機システムで実現するためには、

- (1) 圧力、流量のテレメータリング
- (2) 計測情報に基づく最適なバルブ操作量の算出
- (3) バルブのテレコントロール

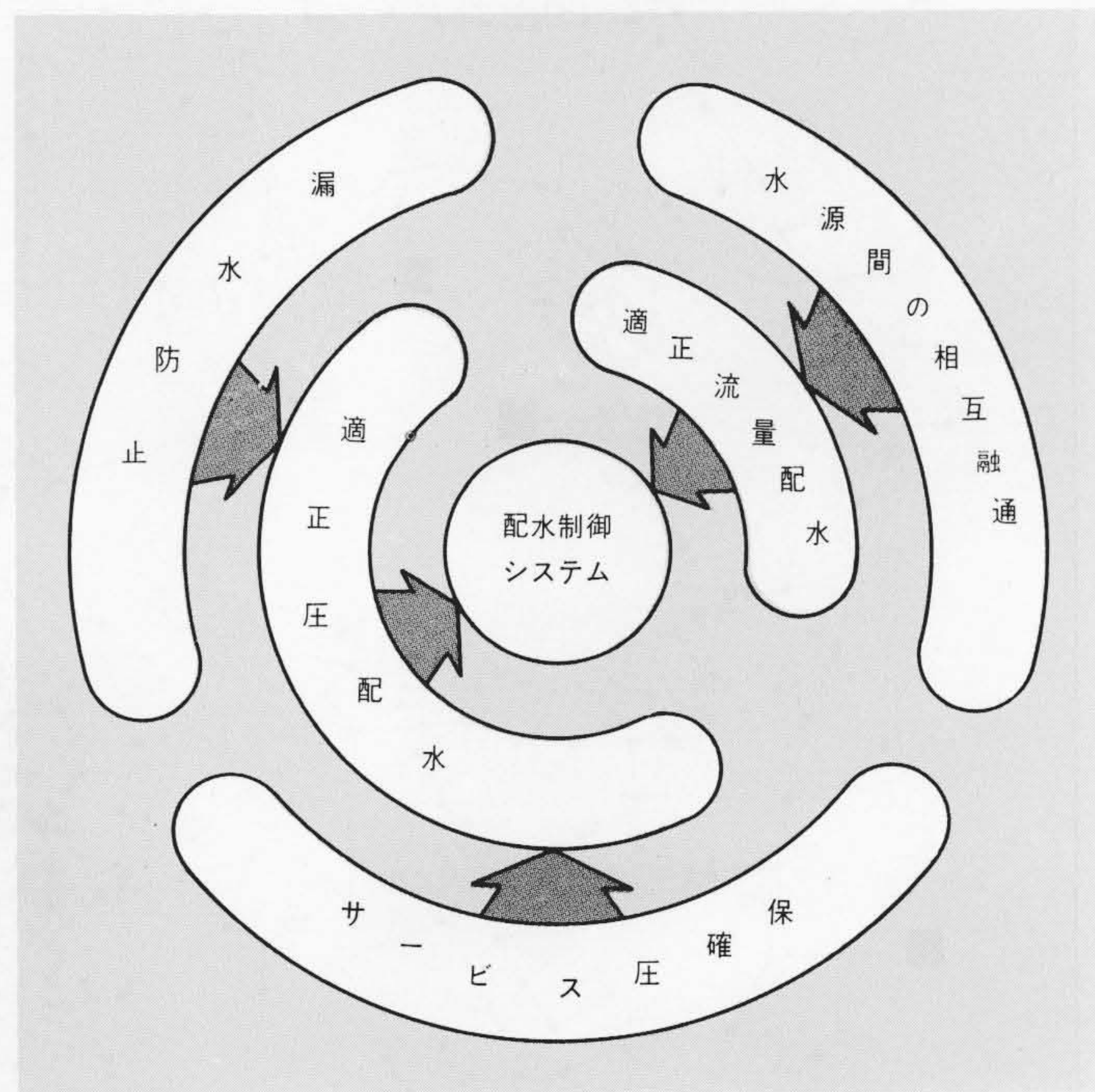


図1 配水制御システムの要請 漏水の原因となる圧力過剰や地域間での圧力の不均等を防ぐとともに、柔軟な水運用を可能とする配水制御システムは、その実用化が強く望まれている。

* 日立製作所システム開発研究所 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所システム事業部

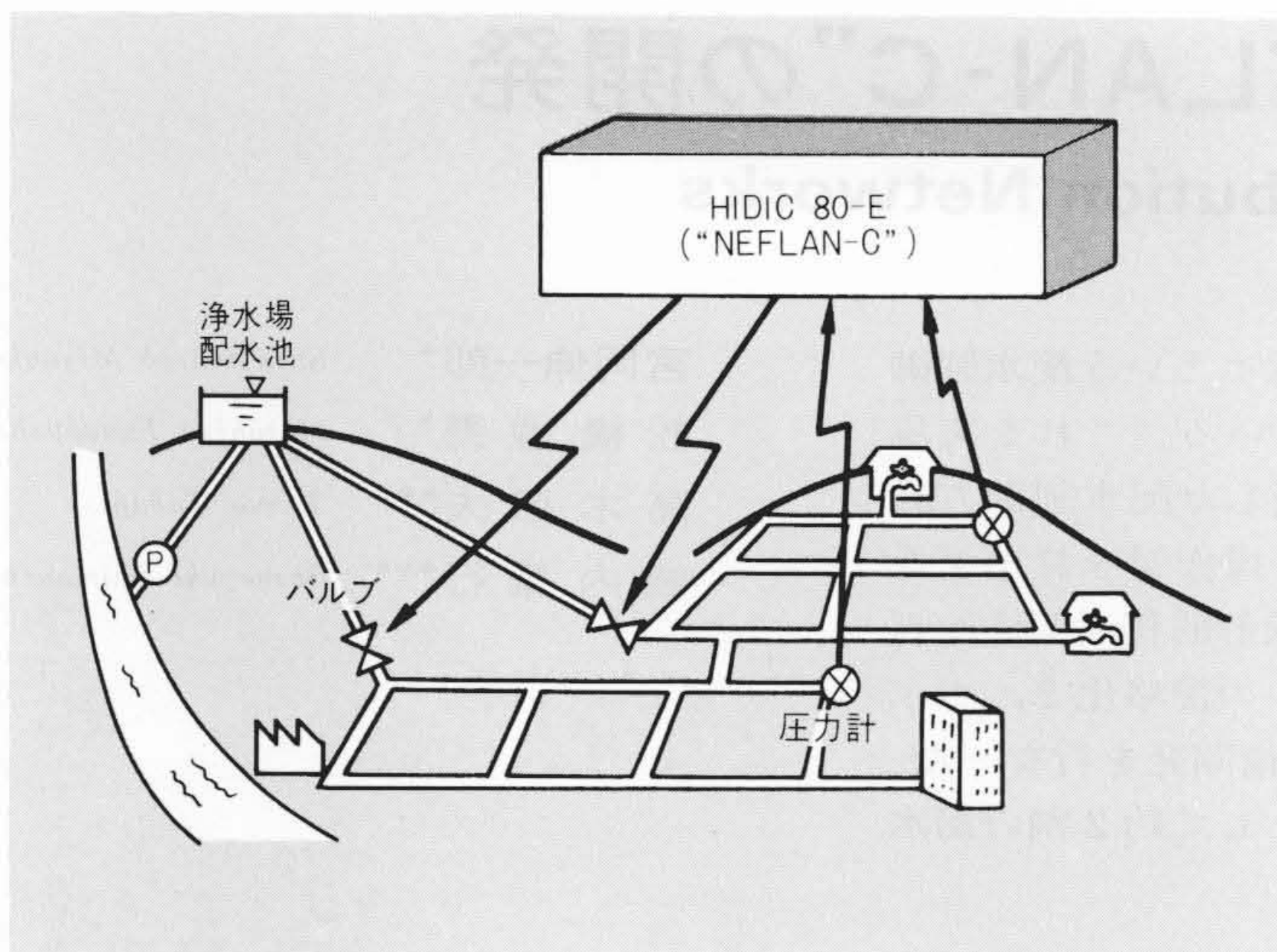


図2 配水制御システム概念図 管網内の圧力、流量を適正值に保つため、監視情報に基づきバルブを遠隔制御する。

が必要である(図2)。“NEFLAN-C”は、このうち、「計測情報に基づく最適なバルブ操作量の算出」を行なうための方式であり、制御用計算機向けプログラムとして具現化される。

2.2 制御システムの基本機能とその構成

配水系統の特徴は、次の2点に集約される。

- (1) ネットワークとしての規模が大きく、ノード数は数百のオーダーとなる。図3に示す実例では、ノード数は約500、また、変数の数は圧力と流量を合わせて1,200にも上る。こ

れらの変数が系統全域にわたって相互に関連し合っている。

- (2) 流体特有の非線形特性をもつ。すなわち、管路で発生する圧力損失が、流量の非線形関数となっている。

このような多変数、非線形の系に対し、オンラインで最適操作量を算出するため、制御システムを下記のような基本機能の組合せで構成した(図4)。

大規模系の制御でまず必要となるのは、不必要に詳細な計算でいたずらに計算時間を増大させることを避けるため、適切なサイズの制御モデルを作成することである。このために、解析や設計の目的で作成されている大規模管網モデルを、制御に必要な十分な形に縮約変換する方法(管網縮約法)を開発している。

このようにして作成した管網モデルに基づき、オンラインで最適な操作量を算出する。縮約したとはいえ、ノード数が100を超える非線形ネットワークの最適化計算では、計算時間の短縮が依然として大きな課題となる。また、種々の外乱による圧力、流量の変化をきめ細かくとらえ、操作量に修正を加えられる方式であることが望まれる。これらの課題を解決するため、需要量の変動域が狭いときは、管網を線形モデルで近似できることに着目し、次のような計算構成をとった。需要量が大きく変動したときは非線形モデルによる最適化計算(圧力分布最適化計算)を、その他の時間帯ではフィードバック情報に基づき、線形モデルによる修正計算(フィードバック制御計算)を行なうものとする。特に前者では、オンラインでの非線形最適化計算を可能とするため、ネットワークフロー理論による高速定常流解法を、この計算に組み込む方式とした。

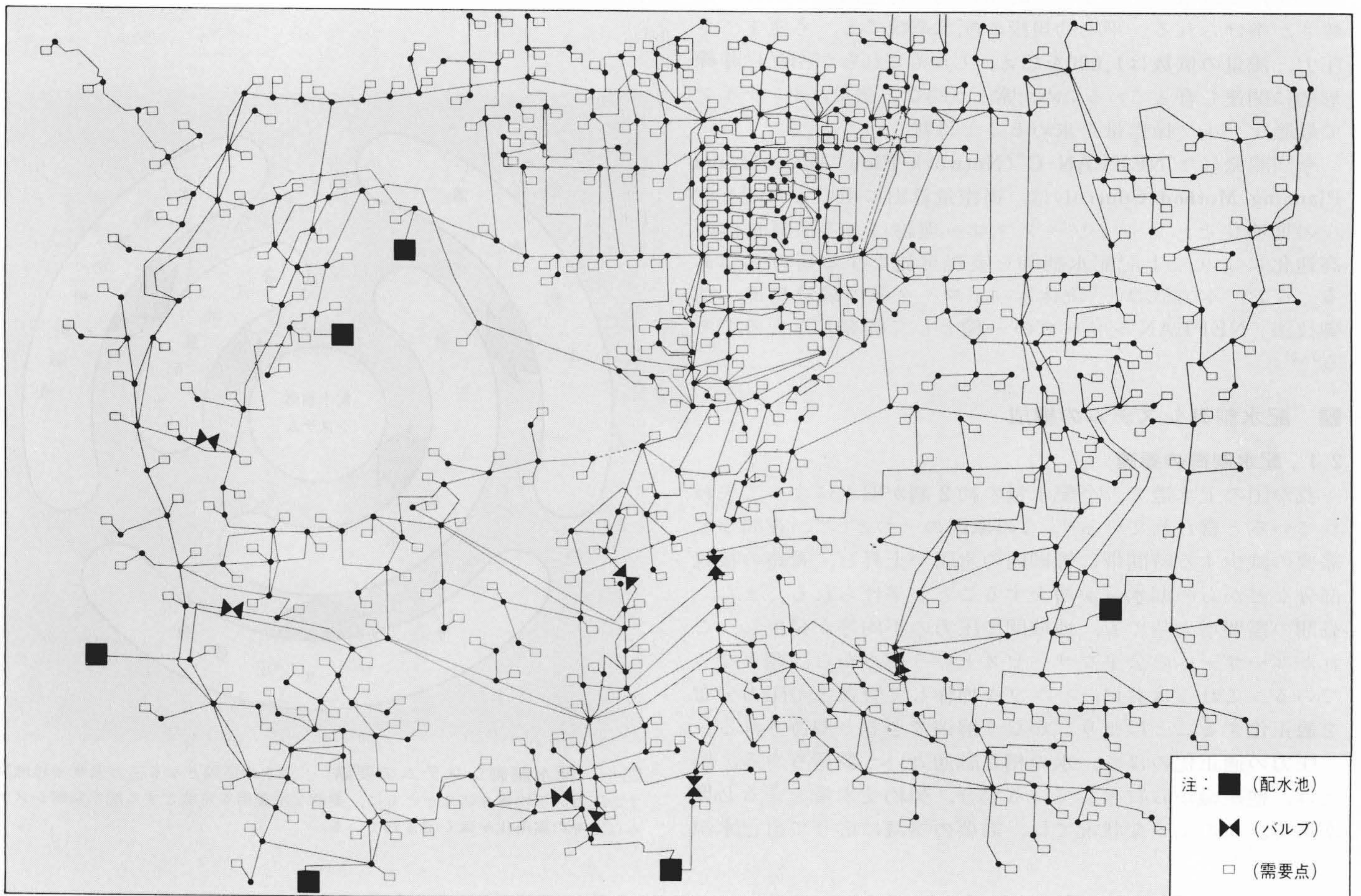


図3 実際の配水管網 人口30万人クラスの都市の場合でも、ノード(需要点 分岐・合流点)数は500、管路数は700もあり、圧力、流量変数は合わせて1,200にも上る。

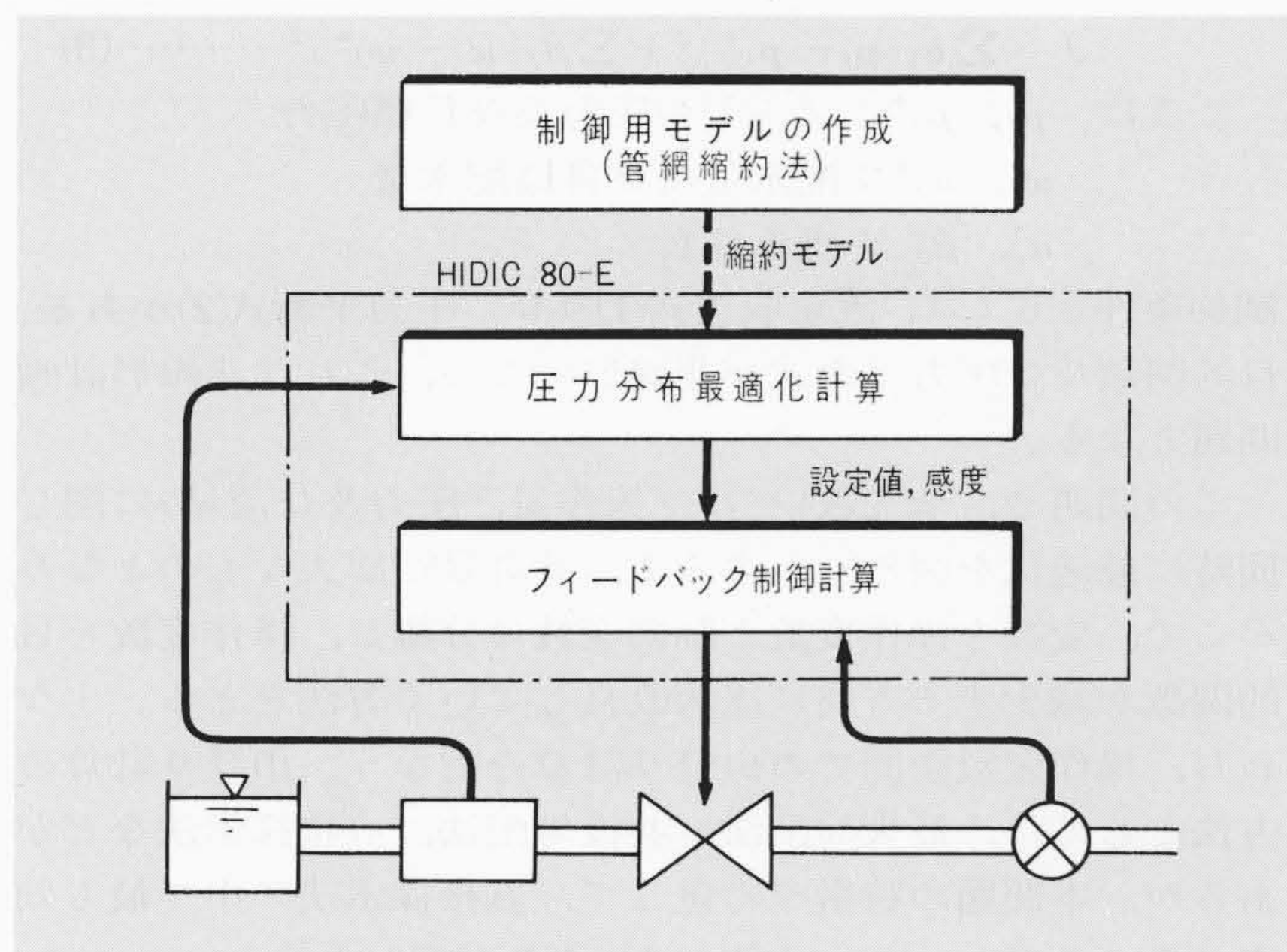


図4 配水制御システムの基本機能構成 管網縮約法により、オフラインで制御用の縮約モデルを作成し、このモデルに基づいてオンラインでバルブの最適操作量を算出する。

3 制御用管網モデル作成

設計用に作られた詳細な管網モデルを、そのまま操作量算出に用いようとすると、いたずらに計算量を増大させることになりかねない。モデルは、オンラインで使用可能な程度に簡略化しなければならぬことはもちろんであるが、同時に、要求される精度を満足する必要がある。これを可能とする方法として、ネットワークの分割に基づく縮約法を開発した。

3.1 配水管網のモデル

配水管網の構造は、管路とノードの間の接続関係から定まる。更に、各管路の長さ、直径、流速係数などのデータを与えれば、ノードでの流量収支条件、及びノード間の圧力平衡条件から、ノード圧力と管路流量に関する連立方程式が導かれ、管網モデルが得られる。

$$\sum_{j \in A^+(i)} x_j - \sum_{j \in A^-(i)} x_j = y_i \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$p_{s(j)} - p_{e(j)} = R_j |x_j|^{\alpha-1} \cdot x_j \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに x_j : 管路 j の流量

y_i : ノード i での流入量又は流出量

p_i : ノード i での圧力

R_j : 管路又はバルブの抵抗(管路の場合は長さ、直径など、バルブの場合は開度などから定まる。)

$A^+(i), A^-(i)$: ノード i を始点、終点とする管路の集合
 $s(j), e(j)$: 管路 j の始点及び終点

(1)式、(2)式で、管路の抵抗は施設条件から、配水池ノードの圧力は水位計測値から与えられているものとする。また、各ノードからの流出量は、配水池からの流出量計測値の総和(総需要量)に、ノードごとに定められた需要分布比率を乗ずることにより、その推定値が得られているものとする。結局、独立変数として残るのはバルブの開度であり、これを定めれば、(1)式、(2)式を解くことにより、圧力、流量が求まる。この管網内定常流の計算は、通例、管網計算と呼ばれている³⁾。

3.2 管網モデルの縮約

縮約する前の管網を原管網、縮約後の管網を縮約管網と呼ぶことにする。原管網の複数のノードの圧力を、縮約管網の一つのノードの圧力で代表させ、また、原管網の複数の管路の流量の和を、縮約管網の一つのブランチの流量で表わ

すことにする。このような縮約を行なうため、原管網を複数領域に分割し、各領域に一つのノードを、領域間に一つのブランチを対応させる(図5)。領域分割に当たっては、同一領域に含まれる原管網のノードの圧力が互いに近い値をとるようにする必要がある。

ノード、ブランチの接続構造に着目したネットワークの分割法については、幾つかの方法が研究されている⁴⁾。しかし、上記のような分割を行なうためには、接続構造だけでなく、ノード相互の量的な親近度(以下では距離と呼ぶ)に着目する必要がある。まず、分割領域数を、近似モデルの要求される精度、簡易度から決め、各領域の中心となるべきノードを設定する(これを核と呼ぶ)。それぞれの核を中心に、近距離にあるノードをグルーピングしていけば、互いに近い距離にあるノードが同一領域に含まれるような分割が得られる。

本分割法を配水管網に適用する場合、距離としては管路の圧力損失を用いる。また、核の設定に関しては、手間を省きかつ縮約モデルを使いやすくするため、次のような設定基準を設ける。

- (1) 原管網の形状を保存するため、幹線上のノードを核とする。
- (2) 配水基地、監視点及び制御点を核とする。
- (3) 近似度を向上させるのに必要と思われる箇所に核を設定する。

縮約管網の接続構造を決定した後、原管網の圧力・流量分布を最も良く近似するように、最小二乗法を用いて抵抗を同定する。

以上の処理は、かなり複雑な計算やデータ処理を要するため、計算機内ですべて自動的に行なえるようにした(図6)。

図7は、図3の原管網を縮約した結果であり、数値は原管網をどの程度近似しているかを示している。ノード数を $\frac{1}{5}$ 以下に減らしているが、圧力、配水量ともに、実用上問題のな

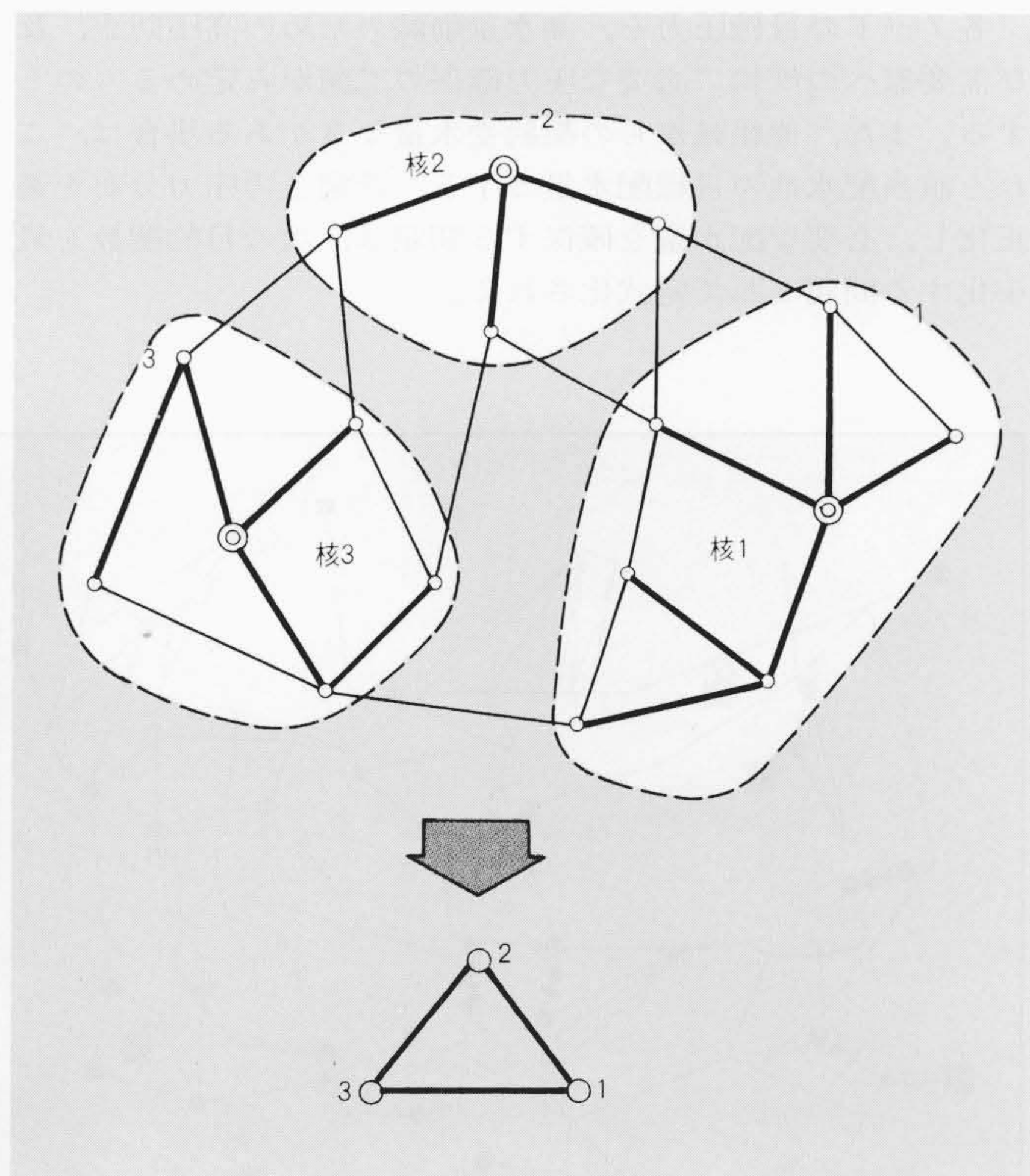


図5 管網縮約法 圧力が類似の値をとるノードが同一領域に含まれるように、管網を複数領域に分割し、各領域を一つのノードに縮約する。

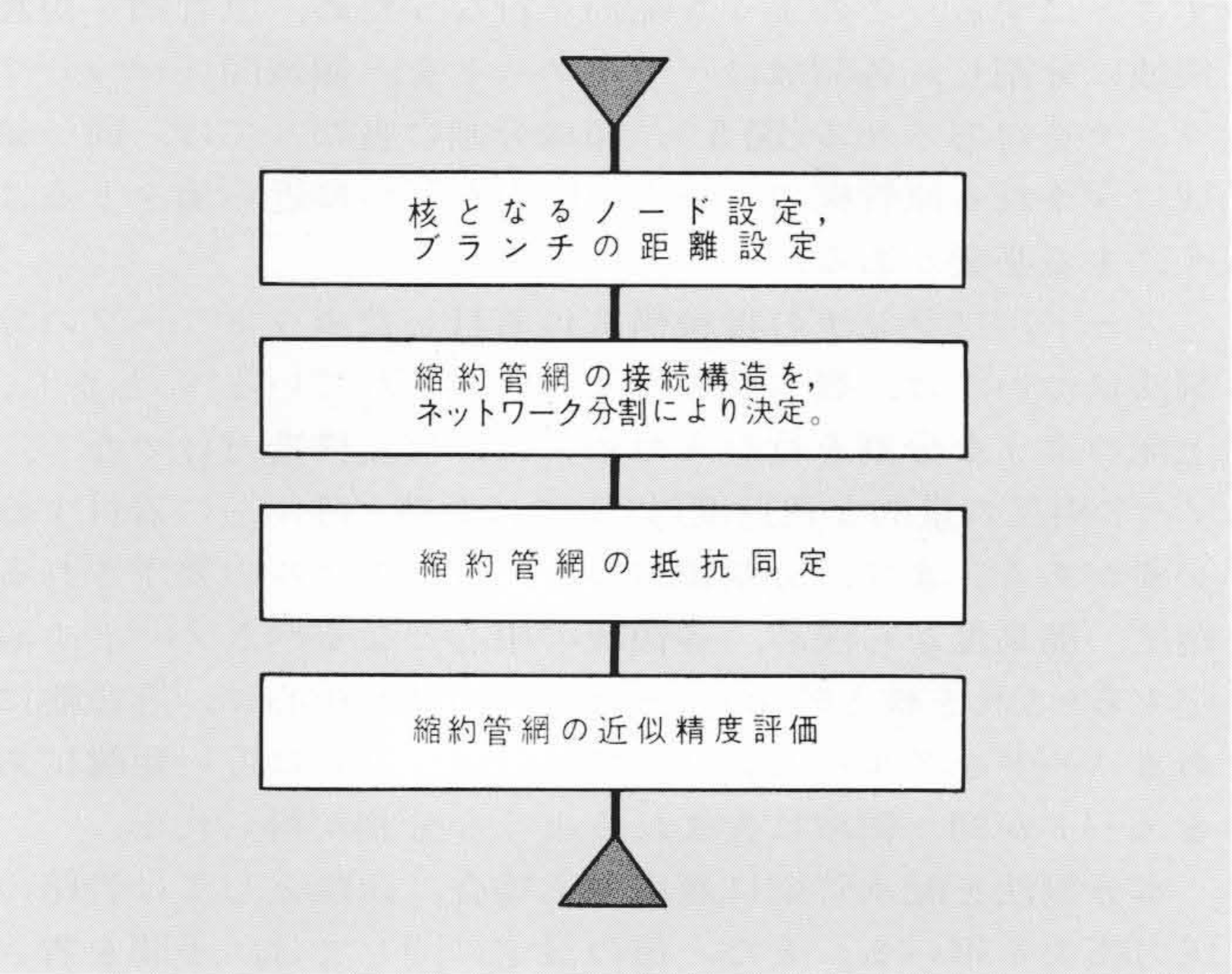


図6 管網縮約プログラム概略フロー 管網縮約の手続きは、すべてプログラム化され、計算機内で自動的に縮約モデルが作成される。

い程度の精度が得られている。

4 制御方式

最適なバルブ操作量を算出する本方式は、需要量などの外部状況が大きく変化したとき、新たにバルブ操作量を求め直す部分(圧力分布最適化方式)と、時々刻々変化する圧力、流量の情報をフィードバックし、操作量の修正を行なう部分(フィードバック制御方式)から成る。

4.1 圧力分布最適化方式

本方式では、オンラインで非線形最適化計算を行なうため、ネットワークフロー算法を組み込んで計算の高速化を図っている。

各ノードの目標圧力を、漏水量削減のための高圧防止、及び需要家への供給に必要な圧力確保の二面から定めるものとする。また、他組織からの契約受水量などがある場合は、これを該当配水池の目標配水量とする。管網上の圧力分布を適正化し、必要な配水量を確保する問題は、次の目的関数を最小化する問題として定式化される。

$$J = \sum_i \alpha_i (p_i - p_i^*)^2 + \sum_j \beta_j (w_j - w_j^*)^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここに p_i, p_i^* : ノードの圧力及び目標圧力
 w_j, w_j^* : 配水量及び目標配水量
 α_i, β_j : 重み係数

制約条件としては、流量収支式(1)及び、圧力平衡式(2)がある。目的関数及び圧力平衡式が非線形のため、これは非線形計画問題となる。

この問題で、全変数(バルブ操作量、圧力及び流量)に関し同時に最適化を図ろうとすると、計算量が膨大なものとなる。そこで、変数を操作変数と制御変数に分離し、操作変数を目的関数が減少する方向に逐次改良していく方法をとる。すなわち、操作変数空間での山登り計算を行なう。山登り計算の方法としては、最大勾配法、共役勾配法、直接探索法などがあるが、本問題の特徴を考慮して、直接探索法の中で最も効率の良いと言われているSimplex法を選択した⁵⁾。

Simplex法による山登り計算の過程で、操作量が改良されるごとに、対応する目的関数値を計算する必要がある。このためには、(1)式、(2)式を連立して得られる非線形代数方程式を解き、上記操作量に対応する定常流(圧力、流量)を求めなければならない。この計算が山登り計算の中で最も時間を要する部分であるため、その高速化が必須となる。

先に開発した定常流解析法“NEFLAN-A(Aqua)”は、定常流求解を1回だけ行なう場合は、数百ノードの配水管網に対しても十分に高速な方法と言えた⁶⁾。しかし、本問題では山登り計算の過程で定常流求解が数十から数百回発生するため、操作量が変化したときの定常流を、より高速に求める方法が必要となる。

このために、山登り計算への組込みを意図した定常流解法を、“NEFLAN-A”の延長として、今回新たに開発した。管網の定常流は、次式で定義される損失エネルギーを最小とする流れとなっている⁶⁾。

$$E = \sum_j R_j |x_j|^a \text{sgn}(x_j) dx_j - \sum_i w_i p_i \dots\dots\dots (4)$$

ここに x_j : 管路流量
 R_j : 管路又はバルブの抵抗
 w_i, p_i : (3)式に同じ

ここで、操作量が変更された場合を考えると、 R_j の変化により、(4)式で損失エネルギーの最小性が成立しなくなる。このとき、ネットワークフロー算法の一つであるPrimal法⁷⁾を用

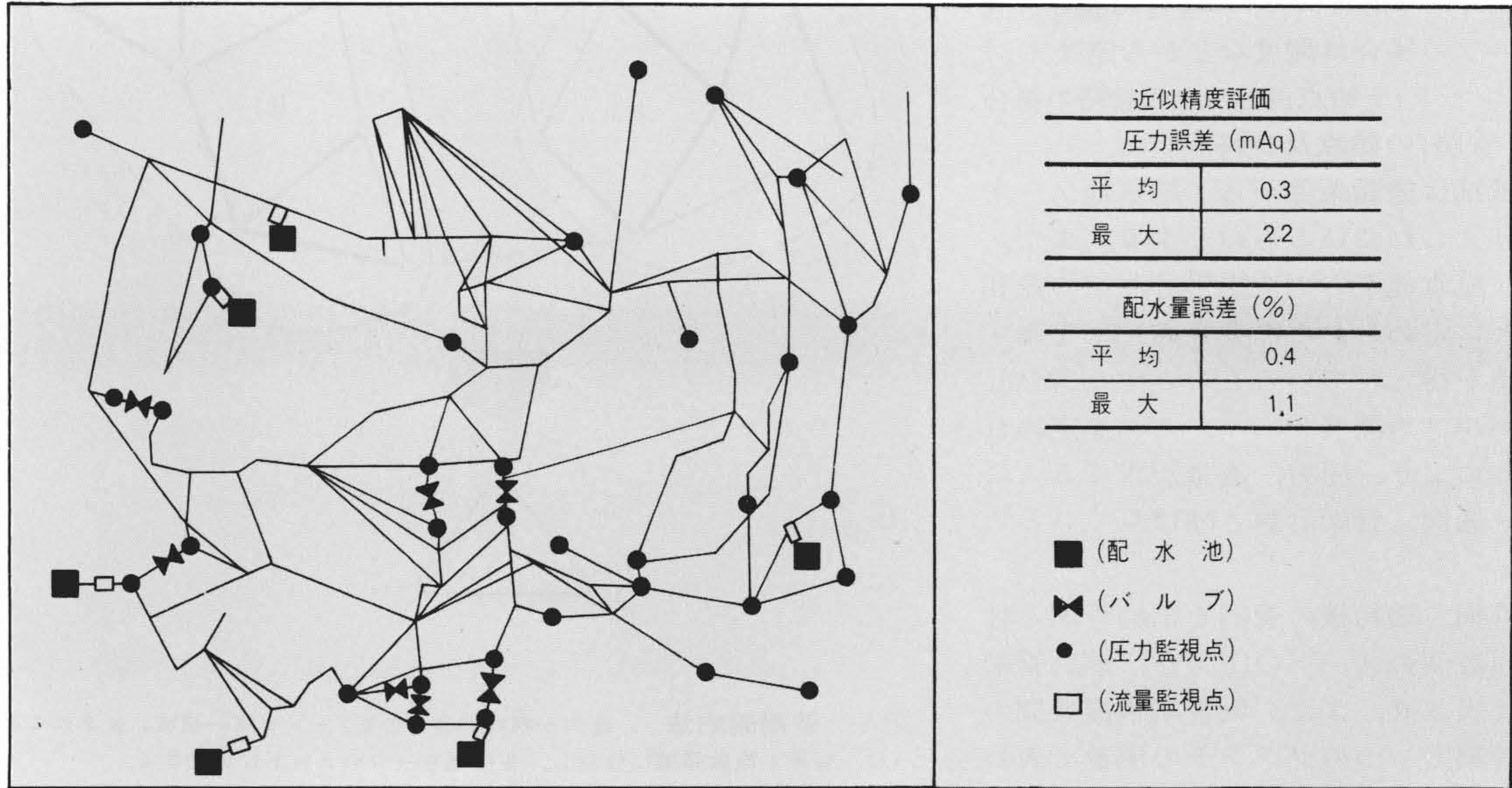


図7 管網縮約結果 ノード数が5以下になるまで縮約したが、圧力、配水量とも原管網を良く近似している。

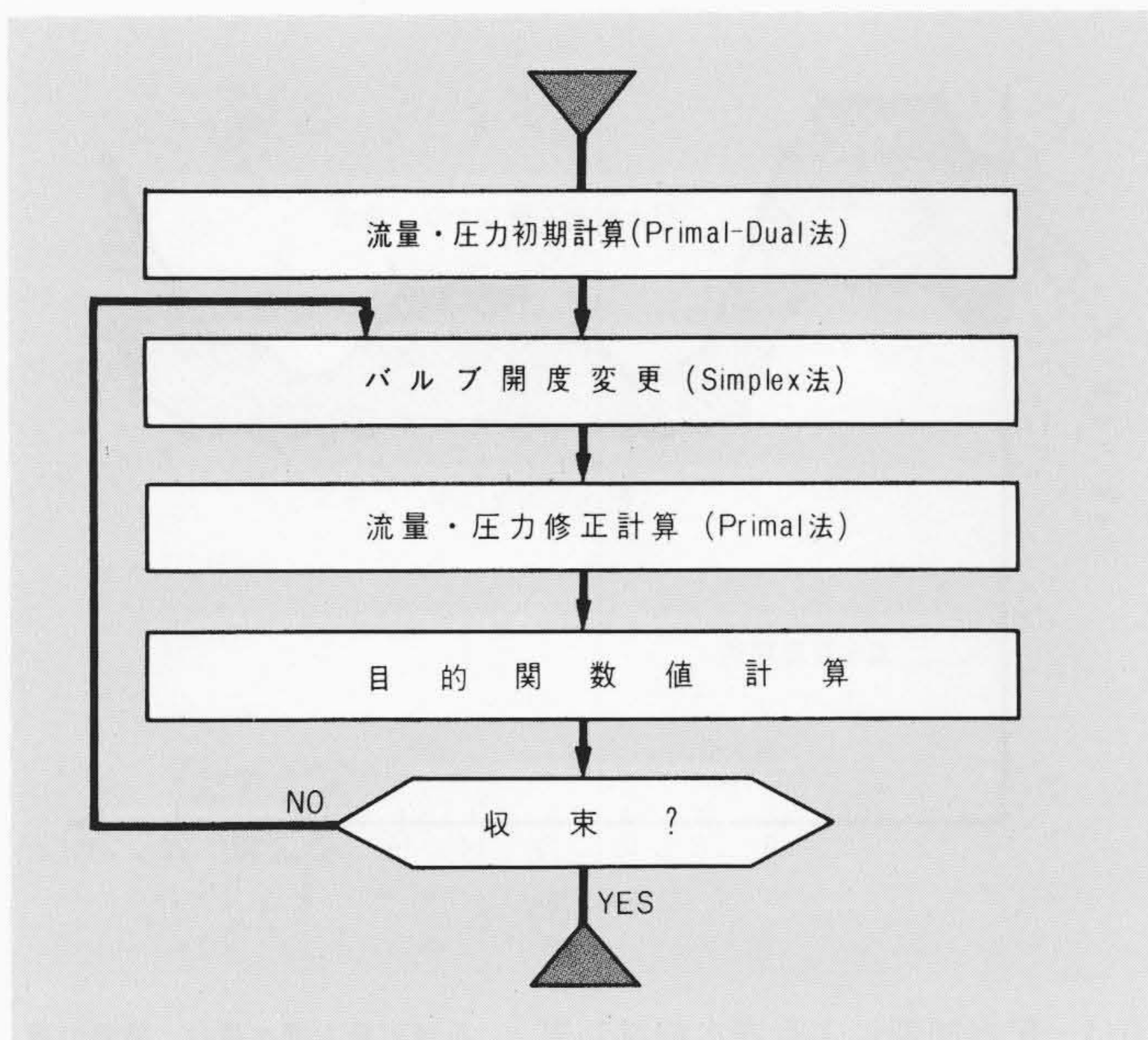


図8 最適化計算の構造 Simplex法による山登り計算の過程で何度も発生する流量・圧力修正計算を、Primal法により効率良く行なう。

いれば、前回の流れを部分的に修正するだけで再び損失エネルギー最小の流れを求めることができるため、操作量変更時の定常流求解を高速化することができる。

最適化計算の構造を図8に示す。初期定常流は、前回の流れがないため、Primal法により求めることはできない。そこで既存の流れを必要としないPrimal-Dual法⁷⁾による方法で求める。山登り計算の過程では常に前回の流れがあるので、Primal法による方法を用いる。

図9に、本方法と従来手法の、HIDIC 80-Eを用いた場合の計算時間の比較を示す。従来手法としては、最適管網計算と呼ばれているニュートン法による方法、及びSimplex法とPrimal-Dual法を組み合わせた方法を取り上げた。また、管網モデルとして、原管網を用いた場合と縮約管網を用いた場合の比較も合わせて示した。従来手法では、約500ノードの管網の最適化に数時間から十数時間要していたのに対し、本方法によると20分程度で計算可能である。更に、縮約した管網モデルを用いれば、計算時間はさらに短縮され、5分程度で求解可能となる。これは、上水道システムの状態変化の緩やかさを考慮すれば、オンラインで使用するのに十分な程度の時間である。

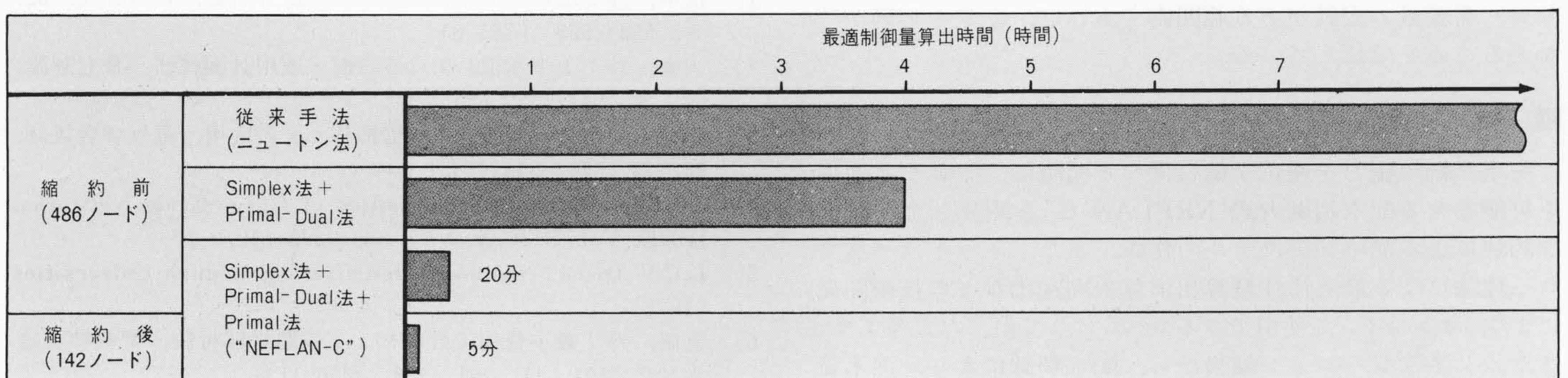


図9 計算時間短縮効果 従来手法では数時間から十数時間要していた圧力分布最適化の計算を、“NEFLAN-C”では20分程度で行なうことができる。管網縮約法と併用すると5分程度まで短縮され、オンラインでの計算が可能となる。

4.2 フィードバック制御方式

4.1で述べた方式により求めた最適操作量で実際に制御した場合、管網モデルのもつ誤差、需要量の変動などの原因で、圧力や流量は計画どおりにはならないと考えたほうが实际的である。そこで、観測値をフィードバックして操作量に修正を加え、圧力や流量を計画値に近づける方法を導入した。

操作量や制御量の変更量は小さいものとし、管網モデルを最適値の周りでTaylor展開した線形モデルを用いる。

$$\Delta z_t = Y \Delta v_t + \xi_t \dots\dots\dots (5)$$

ここに Δz_t 、 Δv_t ：観測量及び操作量の変更量

Y ：操作量の変化に対する観測量の感度

ξ_t ：誤差項

この線形モデルに基づき、以下の2点を評価基準として制御アルゴリズムを導出する。

(1) 観測量を計画値に近づける。

(2) 操作量の変更量を小さくする。

(1)、(2)に関する重み行列をそれぞれ P 、 Q とすれば、次の制御タイミングでの操作量の修正分が次式から得られる。

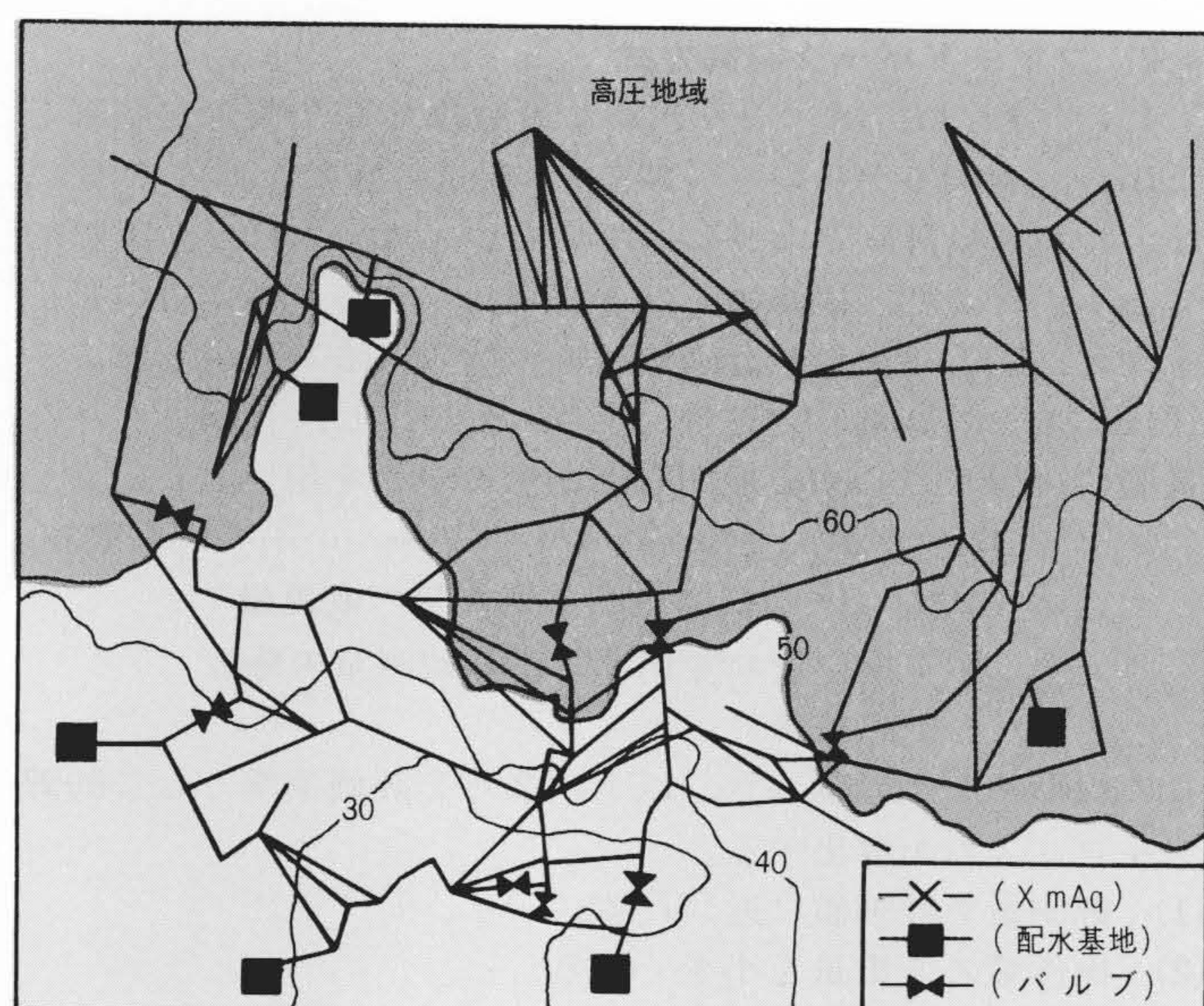
$$\Delta v_{t+1} = -(Y^T P Y + Q)^{-1} Y^T P \Delta z_t + \Delta v_t \dots\dots\dots (6)$$

(1)、(2)の評価基準のいずれを優先するかは、 P 、 Q の調整によって行なうことができる。なお、(6)式は積分動作となっており、オフセットの発生を除去することができる。

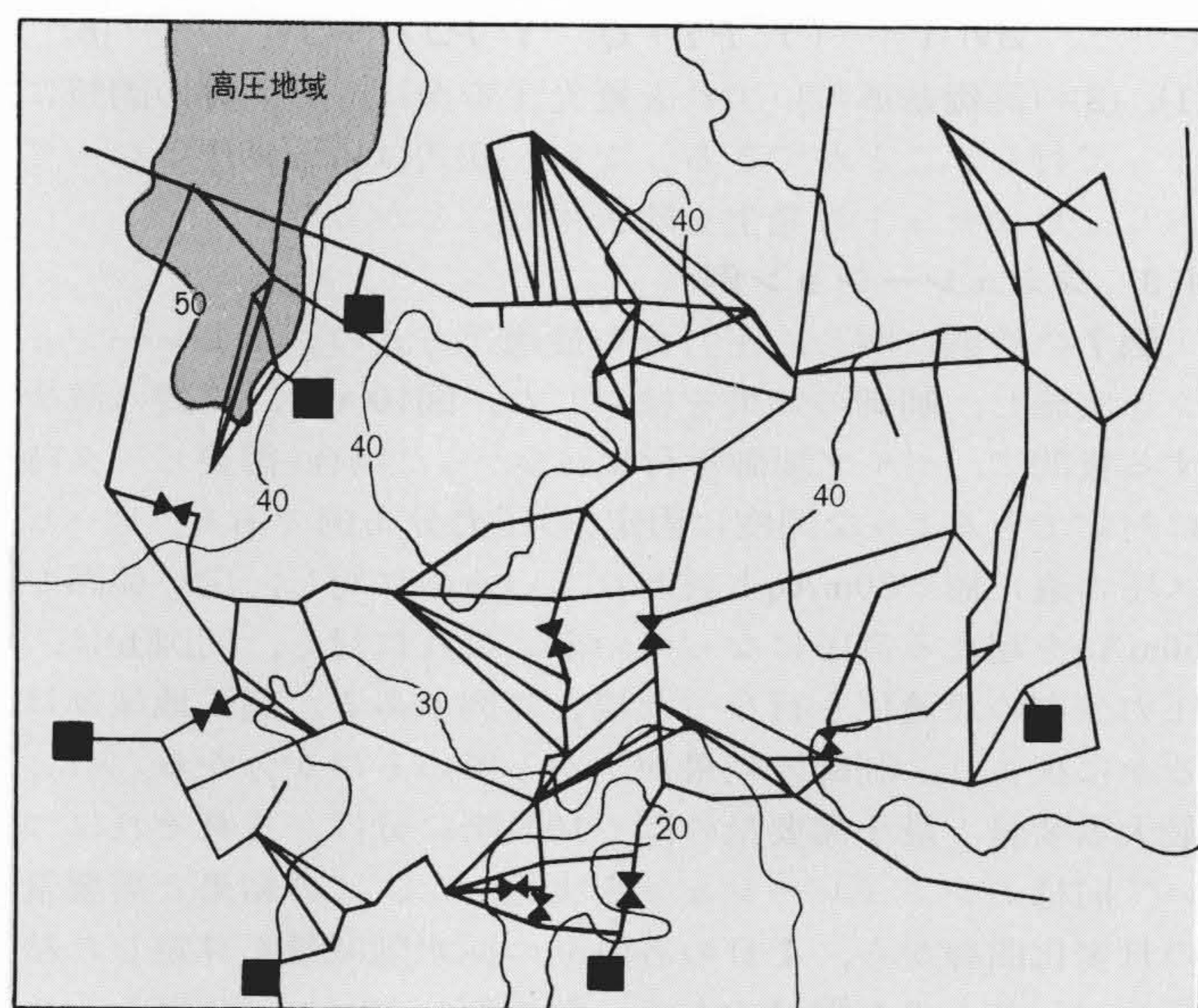
4.3 シミュレーション例

図7の管網に関し、圧力分布最適化方式のシミュレーションを実施し、制御の効果を検討した。図10(a)は、需要の減少する夜間で、バルブ制御を行なわなかった場合(需要ピーク時に対応できるような開度に固定)の圧力分布例である。サービス圧の適正值が30mAqと言われているのに対し、広い範囲が50mAqを超える高圧になっている。これに対し、同図(b)は、圧力分布の最適化を行なった場合の例である。高圧地域ははるかに狭まり、制御の効果が上がっているのが分かる。次に、最大需要量と最小需要量の間を10段階に分け、それぞれについて同様のシミュレーションを実施した。この結果と需要量の日変化曲線から、1日の各時刻の漏水削減量を算定した結果を示したものが図11である。斜線部分がバルブ制御を行なうことによる漏水削減量になる。漏水削減量の時間積算値を、バルブを制御しない場合の漏水量の時間積算値で割ることにより、漏水削減率が得られる。同図の場合、この値は0.22となり、約2割強の漏水削減が可能という結果になる。

次に、フィードバック制御方式のシミュレーションを実施し、その効果を検討した。図12は、代表的な圧力監視点及びそれに直接的な影響を与えるバルブについて、需要量が10%



(a) 配水制御前の圧力分布例



(b) 配水制御後の圧力分布例

図10 配水制御による圧力適正化の効果 適正圧は30mAqと言われているが、配水制御前は、広い範囲が50mAqを超える高圧になっている。配水制御を行なった結果、高圧箇所はごく狭い範囲に限られ、他の地域では適正な圧力分布が得られる。

増減したときの制御状況を時系列的に示したものである。同図から、需要量の変動があると圧力の偏差が増大し、次のタイミングで操作量の変更が行なわれ、圧力が計画値近傍まで引き戻されるのが分かる。シミュレーションに基づく検討の結果、需要量の変動がある範囲内であれば、安定な制御が行なえることを確認している。

5 結 言

配水システムの圧力を適正な値に保つと同時に、柔軟な水運用を可能とする配水制御方式“NEFLAN-C”を開発した。管網縮約法による簡略制御モデルの作成、また、ネットワークフロー理論による最適操作量算出演算の高速化などの技術開発により、オンラインで使用できるレベルにまで至ったと考える。また、シミュレーション結果から、配水制御により、漏水量を約2割削減可能との見通しを得ている。

最後に、本研究の推進に当たって、御指導、御協力をいた

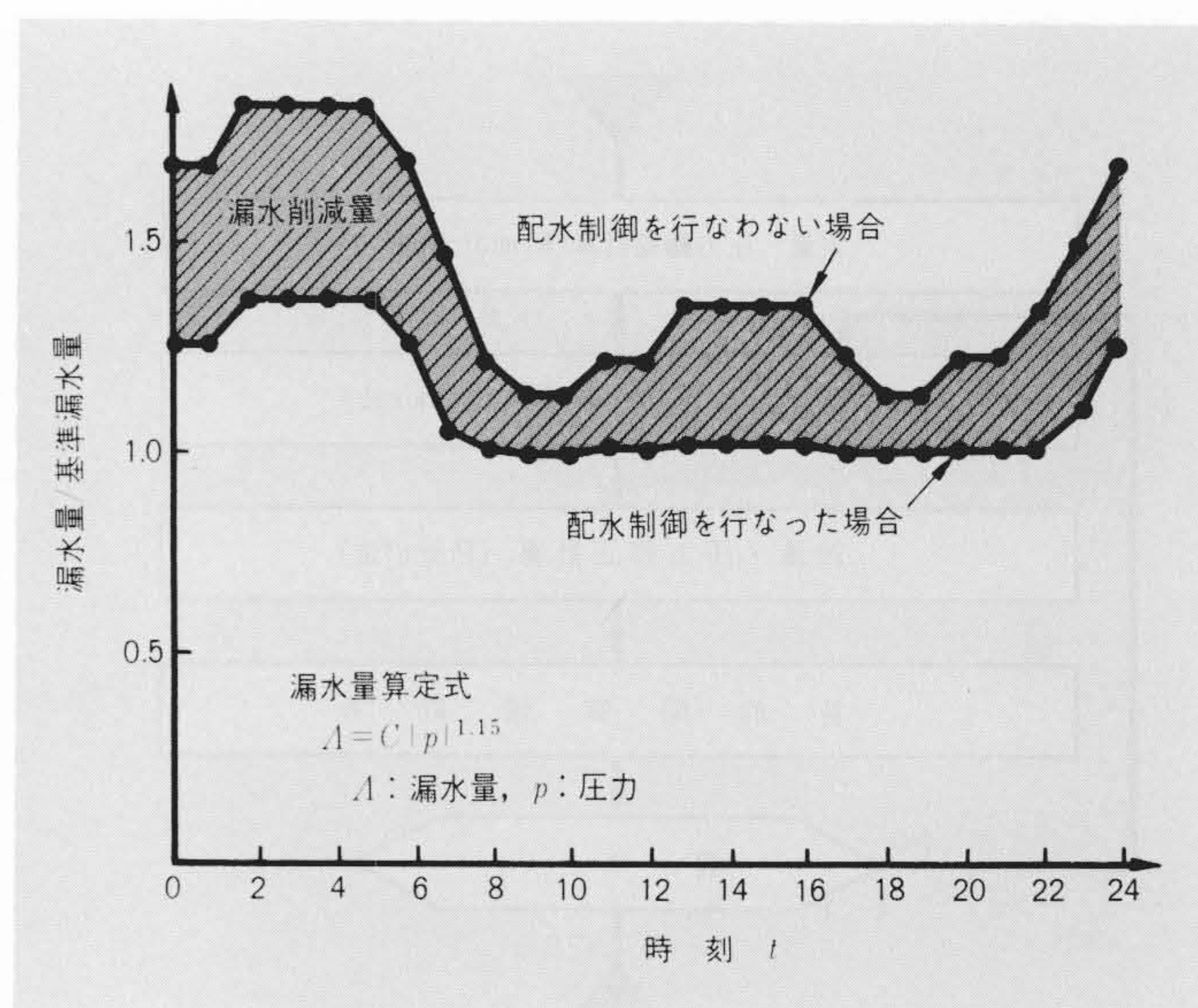


図11 配水制御による漏水削減効果 削減可能な漏水量は、需要の減少する時間帯で特に大きく、1日トータルでは総漏水量の約2割となる。なお、基準漏水量としては、サービス圧30mAqのときの漏水量をとった。

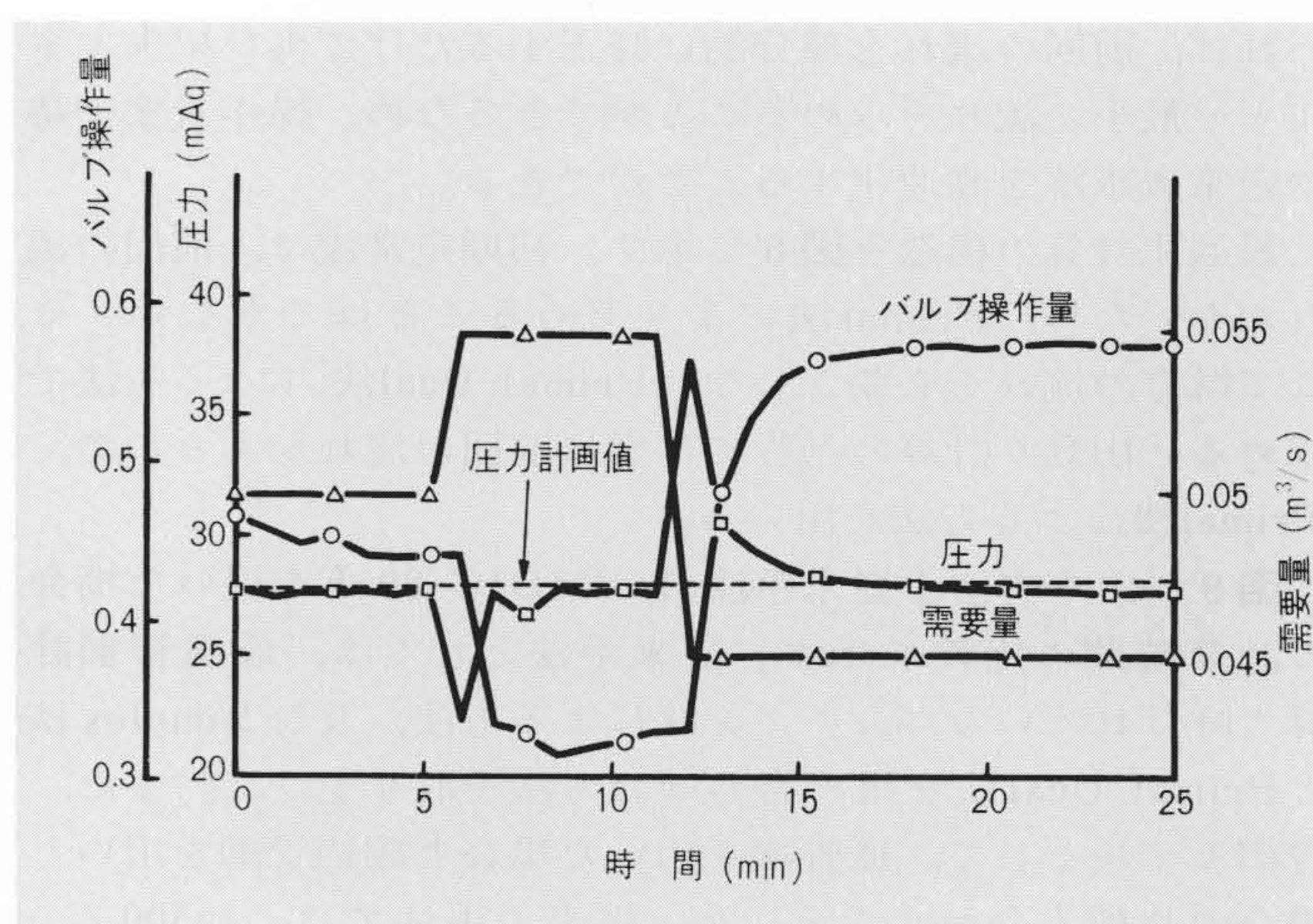


図12 フィードバック制御の効果 需要の変動に伴い圧力が変化しますが、この情報をフィードバックしてバルブ操作を行なうと、圧力は計画値にまで引き戻される。なお、バルブ操作量に関しては、基準化した値を示している。

だいた高松市水道局殿ほか、関係各位に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 松本、外：広域上下水道システムの総合制御、日立評論、62、8、553～558 (昭55-8)
- 2) 大成、外：上下水道における設備・運用計画技法、日立評論、62、8、547～552 (昭55-8)
- 3) 高桑：配水ネットワークの解析法とその応用、電気学会雑誌、96、6、527～534 (昭51-6)
- 4) J.G.Lee: Optimal Decomposition of Large-Scale Networks, IEEE, Vol. SMC-9, No.7, 369～375 (1979-7)
- 5) L.C.W.Dixon: Nonlinear Optimization, English Universities (1972)
- 6) 宮岡、外：最小費用流計算による管路網解析法、電気学会論文誌C、101、11、261～268 (昭56-11)
- 7) 日本OR学会：ネットワーク構造を有するOR問題の電算機処理に関する基礎研究 (昭48)