

配水管路網制御のための

管路網モデル縮約およびパラメータ同定手法

舩橋誠壽¹、宮岡伸一郎¹、笠井武郎¹

¹(株)日立製作所システム開発研究所 〒215 川崎市麻生区王禅寺1099 ☎044-966-9111

” 大みか工場 〒319-12 日立市大みか町5-2-1 ☎0294-53-1111

概要

配水管路網を適確に制御するには、管路網の数式モデルが不可欠である。一般に、管路網に関する詳細情報は存在するが、このままでは、計算量が大きくなりすぎて制御に用いることはできない。このため、管路網の詳細情報から、制御に適した数式モデルを求める方法を開発した。この方法は、管路網の概略構造を求める縮約機能と、縮約した管路網モデルの管路抵抗値を実際の計測値から同定する機能からなる。縮約機能では、管路網の位相構造の骨格となる、幹線管路、および、監視制御の基本要件である操作端、計測端などを管路網の核部分として、複数管路を一つの管路に集約することを反復する。この集約可能性の判断は、核管路網に対する流量、圧力の変動度合いである。同定機能では、計測値とモデル計算値とが一致するように、管路抵抗値を調節する。調節すべきパラメータの個数は、管路網の枝数だけ存在するため、通常の数学的最適化手法を適用することはできない。このため、経験則として、モデル誤差のパターンに応じて調節すべきパラメータのグループを予め与える、知識工学的手法を導入した。本方法の有用性は、実管路網情報に基づいて評価済みである。

キーワード

配水管路網 配水制御 管路網モデリング モデル縮約 管網特性同定 ネットワークアルゴリズム 知識工学

1. はじめに

施設の普及拡大に伴う監視制御の自動化から、需要供給のバランス、配水管網末端圧力の適正化など施設の運用制御の高度化へと上水道の制御技術課題は進展してきている。最近、とくに重要視されているのは、都市の装置ともいべき巨大な施設をどのように維持管理するかという問題である。この課題解決を目指して、配水管路網の図面情報管理システムが導入され始めている。このシステムは既存の管路図面情報を電子ファイリングするとともに、これに管路諸元、属性情報を結合することによって維持管理に係る諸作業を効率化しようとするものである。

管路情報が計算機化されることの意義は、維持管理作業の効率向上だけにとどまらない。これは、水道事業にかかわる様々な業務が、管路を軸として展開されているからである。水道事業では、維持管理に加えて、事業企画、建設管理、営業、施設運用などの業務があり、それぞれの部署で段階的にデータベースが構築さ

れていっている。今後、これらの業務の量的、質的水準を向上するには、必然的に個々のデータベースの相互利用が不可欠である。管路情報は、個々のデータベースの共通の情報と位置付けられ、相互運用化上の基本的な役割を果たす[1]。このように、管路情報は、上水道事業に係る様々な業務を結び付ける基本的な軸であるが、この情報を業務の間で融通することはかならずしも容易ではない。この問題を解決した一例として、本稿では、維持管理のための管路網詳細情報から、管網制御のための数式モデルを導く方法について述べる。

2. 配水管網制御と網の基本特性

配水管路網に対しては、需要家サービスの向上、漏水量の削減のために、末端の圧力、水質を管理制御することが必要である。適確な制御を実現するには、管路網の数式モデルが不可欠である。数式モデルが表現すべき対象の基本特性は、流量、圧力に関する事象であり、これらは次の方程式系によって記述される。

$$\sum_{j \in -\delta(i)} x_j - \sum_{j \in +\delta(i)} x_j = \begin{cases} -w_i & (i \in N_{IN}) \\ y_i & (i \in N_{ON}) \end{cases} \quad (1)$$

$$p_{a+(j)} - p_{a-(j)} = h_j(x_j) \quad (j \in B) \quad (2)$$

ここに、 x_j は管路 j の流量 ($+\delta(i)$ 、 $-\delta(i)$ は管路 j に便宜的に向きをつけた時の節点 i をそれぞれ始点、終点とする管路の集合)、 p_i は節点 i の圧力 ($+(j)$ 、 $-(j)$ はそれぞれ管路 j の始点、終点)、 N は全ての節点の集合、 N_{IN} は流入節点の集合、 B は管路の集合、 w_i は流入点 i の流入量、 y_i は流入点以外の節点 i からの流出量、 $h_j(x_j)$ は管路 j の圧力損失関数で、たとえば、管路の場合には抵抗係数を R_j とあらわすと

$$h_j(x_j) = R_j \cdot |x_j|^{1.85} \cdot \text{sgn}(x_j) \quad (3)$$

と定められる。管路にバルブ、ポンプがある場合も、それぞれに応じた圧力損失関数が定義される[2]。

一般に、管路網の制御では、式(1)、(2)などを対象の基本特性と仮定して、末端圧、あるいは、水質の定値化などの具体的な方策が検討される。今日、維持管理のために管路網の情報が収集されて、計算機に格納され始めているが、これらの情報は制御のためには詳細すぎる。このままでは、計算量が大きくなりすぎて制御に用いることはできない。制御理論的にいえば、維持管理のための管路網の情報は、可制御・可観測の条件を満たしていないといえる。このため、次章以下に述べるように、管路網の詳細情報を、制御に適した数式モデルに変換する方法を開発した。

3. 配水管網モデルの縮約・同定方法

この方法は、管路網の概略構造を求める縮約機能と、縮約した管路網モデルの管路抵抗値を実際の計測値から同定する機能からなる。縮約機能では、管路網の位相構造の骨格ともいえる、幹線管路、および、監視制御の基本要件である操作端、計測端などを管路網の核部分として、この核に複数の管路を集約する。この集約可能性の判断は、核となる管路網に対する流量、圧力の変動度合いである。同定機能では、計測値とモデル計算値とが一致するように、管路抵抗値を調節する。調節すべきパラメータの個数は、管路網の枝数だけ存在するため、通常の数学的最適化手法を適用することはできない。このため、経験則として、モデル誤差のパターンに応じて調節すべきパラメータのグループを予め与える、知識工学的手法を導入した。

モデルの縮約

設備管理のための管路網の情報は、物理的に存在するすべての管路についての情報を含んでいる。一方、通常の制御ではこれらすべての情報を扱う訳ではない。管路網の状態として常時観測できる部分は限られているし、管路網に対して操作できる部分も限られているため、観測できない、あるいは、制御できない網の状態を制御モデルとしてもつことは、計算上からいって不経済であり、さらに、時としては誤り介入の要因

ともなる。このために、詳細な管路網情報（以下ではこれを原管路網と呼ぶ）から、制御に適した細かさをもつモデルを誘導することが必要となる。

ここでは、原管路網の複数の節点の圧力を一つの節点の圧力で代表させ、また、原管路網の複数の管路の流量の和を一本の枝の流量で表すことを考える（Fig. 1）。このような考えは、原管路網を複数領域に分割し、各領域に一つの節点を、領域間に一本の枝を対応させるというアルゴリズムを導くことによって実現できる。ここにおいて、原管路網の特性をできるだけ保存するために、同一領域に含まれる原管路網の節点の圧力は互いに近い値をとるようにすることが必要である。このため、節点 k と節点 l との間の距離 $d(k,l)$ を管路の圧力損失で定義し、この距離の下で、似通った節点をグループ化するという方法によって、ミクロなモデルからマクロなモデルへと変換することとした[3]。

Fig. 2 は、実際の管路網モデルに対して、モデル変換（縮約）をした結果を示す。ここでは、制御にとって都合のよい縮約ができるよう、節点グループ化の核となる節点として（1）配水池、圧力監視点、バルブ両端の節点、（2）一定直径以上の管路の両端の節点、などをあらかじめ指定して縮約を行った。Fig. 2 の場合には、節点数が 486 であった原管路網モデルが、節点数 142 のモデルに縮約できている。この時の縮約後のモデルの原管路網モデルにたいする相違度は、需要量によって変化するが、圧力で概ね $2m\text{Aq}$ の範囲に入っている。

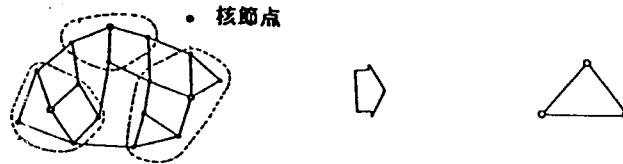


Fig. 1 節点の集約によるネットワークの縮約

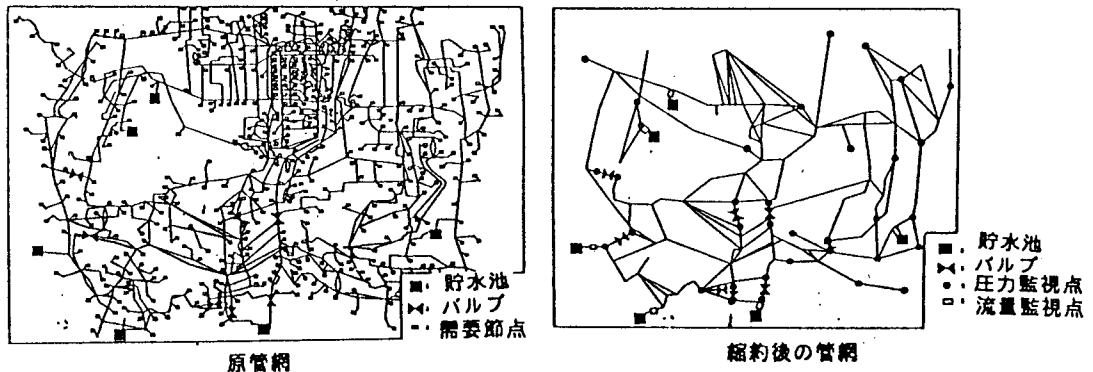


Fig. 2 ネットワークの縮約例

モデルパラメータの同定

配水管路網のモデルに含まれる不確定要因は、主として管路抵抗値である。流体力学的にはこの抵抗値を理論的に決められるが、実際には経年変化などのために理論的に決定する値の信憑性は疑わしいことが多い。また、制御用のモデルでは、原管路網を縮約して表現しているために、現実との対応をとることが困難である。このため、実現象をモデルが忠実に表現できるよう、管路抵抗値を適切に調整する必要がある。

配水管路網モデルのパラメータである管路抵抗値の調節（同定）の難しさは、抵抗値が各管路ごとに異なっているとみなす必要があるため、調節すべきパラメータの個数が管路の個数分だけあるということである。数式的に表現すれば、配水管路網のパラメータ同定の問題は次のように表現される。すなわち、求めるべきパラメータを α としたとき実際の流れや圧力 y^* に近いモデル出力 $y(\alpha)$ が得られるように、かつ、先

験的なパラメータの値 $\hat{\alpha}$ が得られるように次の指標 $I(\alpha)$ を最小化する α を求めることである。

$$I(\alpha) = k \|y(\alpha) - y^*\| + \|\alpha - \hat{\alpha}\| \quad (4)$$

数式的にこのようなパラメータを求めることは容易ではないが、管網モデルに関する知識として、Fig. 3 のような因果関係を利用することによって効率よく、探索すべきパラメータの値を求めることができる。このような知識の活用は、式(4)に対する最適化計算のための勾配計算を代替することに相当する。ここでは、このような勾配計算の代替は定性的には正しいものの定量的には不確実であることを考慮して、パラメータの修正の度合いをクラス分けして式(4)を最小化する、すなわち、抵抗値を同定するアルゴリズムを導いた。Fig. 4には、モデルにおける因果関係の先験的知識を用いた場合の管路網の圧力の計算誤差の削減度合いを示す。この図が示すように、パラメータの調節によって圧力の計算精度が大幅に改善される。

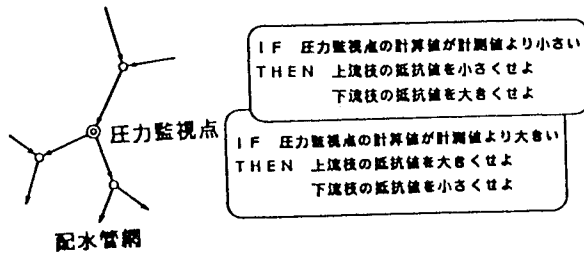


Fig. 3 管網モデルのパラメータ調節のための知識例

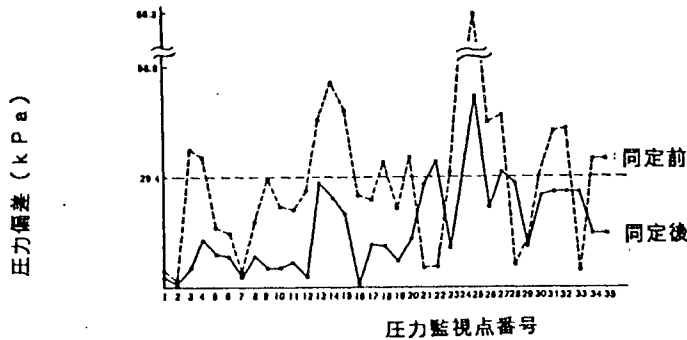


Fig. 4 モデル計算値の誤差分布

4. 結び

配水管路網のデータベースを活用するために、維持管理用の詳細データを制御用のモデルに変換する方法を示した。今日、「おいしい水の供給」、「維持管理の効率化」などは水道事業のキーワードとなっているが、これらを実現する上で不可欠な、管路網データベースの共有化が可能となった。

参考文献

- [1] 船橋：流れの広域ネットワークー上水道：計測自動制御学会流体計測部会講演会資料（平成1）
- [2] 船橋，宮岡，松本：大規模配水管網の解析と制御：計測自動制御学会第7回システムシンポジウム予稿集（昭和56）
- [3] 宮岡，船橋：大規模ネットワーク系の縮約とパラメータ同定：昭和58年電気学会全国大会予稿集