

< 特集 >

カオス水需要予測制御による水運用の自動化

Automation of Water Works with Chaos Prediction and Control of Water Demand

大島 信夫

(株) 明電舎 環境システム事業部 技術部 / 〒 103-8515 東京都中央区日本橋箱崎町 36-2 (リバーサイドビル)

NOBUO OSHIMA

Abstract

The amount of water supply of water is changed with regards to the weather, temperature, a day of the week, etc. On the other hand, it is a fact that the amount of water supply was decided by operation by opening and closing of a faucet gathering. Therefore, it can be said that the amount of water supply constitutes the complex systems. In this paper, we performed short-term water demand forecasting using the chaos theory suitable for the analysis of the complex systems. Furthermore, stable operation of a water purification plant, energy saving, curtailment of power rates, a cost cut, and laborsaving are realizable by controlling water purification plants and distribution reservoirs by the method which optimized water management by "Chaotic Demand Predictive Control".

Key Words : 上水道, 浄水場, 水運用, 需要予測, 予測制御, モデル予測制御, 複雑系, カオス制御, 最適化, ファジィ, 省エネルギー, 維持管理, カオス

1 はじめに

制御とは、プロセスに対する操作量を決定し実際に操作を行うことで被制御量を設定値に一致させることであると言える。制御に関しては様々な研究がなされ、最近のコンピュータの発達により、理論から実践の段階に移った制御方法は多い。ところが、実際の上水道システムの制御のほとんどは現在もPIDの制御で行われている。PID制御は長い歴史に培われた現場での信頼感があり、P項(Proportional:比例)により現状の偏差に対する操作量を、I項(Integral:積分)により過去の偏差の積算に対する操作量を、D項(Differential:微分)により未来の偏差に対する操作量を決定するという方法で、おおかたのプロセスはPID制御によって「最適」とまでは行かなくても安定に制御を実現できているからである。

これらのことから、上水道におけるインテリジェン

ト情報処理とそれを用いた制御技術は、PID制御をはじめとするこれまでの制御技術では対応しきれない問題の解決方法を提供するための一つのアプローチと考えることができるのではないだろうか。

制御の観点で現在の上水道システムの問題点を挙げてみると、第一に水量制御の制御性の問題が挙げられる。浄水場では、水は沈澱池や混和池など、上部を大気に開放している複数の槽で処理され、その移動は重力による自然流下により行われるため、流量制御におけるむだ時間が非常に大きく、応答速度も遅い。もう一つの問題点は流量の制限がある事である。浄水場における沈澱池・混和池・濾過池などのほぼ全てのプロセスには負荷量の限界がある。その上、ポンプの送水量にも限界がある。

また、上水道システムにおける配水池と送水ポンプの関係は、他のプラントにおけるタンクとポンプの関係に比べると、配水池がとて大きい設定となっ

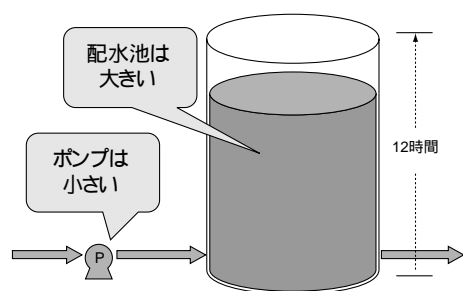


Fig.1 配水池とポンプの関係

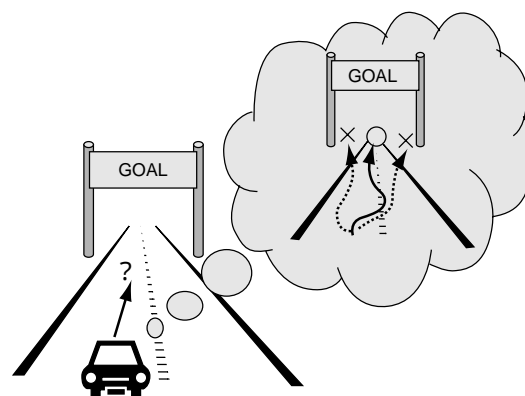


Fig.2 予測制御のイメージ

ている (Fig.1) .

最新の配水池の貯水量は配水量の12時間分で、ポンプは一定に送水する事を基本として設計されているため、送水量を変更した場合でも配水池の水位に反映されるまでには時間がかかる。配水池をいったん空にし、ポンプで送水したと仮定すると配水池を満たすのに12時間もかかることになる。配水池の容量が大きいと言うことは、水位の変化が起こりにくく制御が安定するということであるが、一方では、いったん水位に変動が起きてしまうとなかなか修正が出来ないという問題があることを示している。これらの問題点を整理すると、上水道システムはむだ時間が大きく応答速度が遅いシステムであり、さらに操作量と制御量に制限のあるシステムと言うことが出来る。

2 予測制御

このような特徴を持つ上水道システムには予測制御の適用が効果的と考えられる。インテリジェント情報処理の一つの潮流となっている予測制御は、従来の制御におけるむだ時間の問題や制御応答の遅れに関する問題、さらに操作量や制御量に制約がある場合の問題の解決にきわめて有効な技術である。

予測制御の考え方は直感的でわかりやすいものである。プロセスの予測が可能で、未来の偏差がわかるならば、被制御量が設定値に一致するように操作量を決定すればよい、ということである。例として自動車の運転を考えてみる (Fig.2) .

普通に運転が出来る人であれば、自動車を発進させ目的の場所まで移動させることは簡単な事だと思う。これは、ドライバーが自動車という装置がどの

ような動きをするものかを知っており、現在どのように動いているかを見て、自動車の、位置、方向、速度を予測して、必要があれば、ハンドル、アクセル、ブレーキなどを操作する事で、目的の場所へ移動することが出来るということである。これらの事項をプロセスの予測制御に置き換えると、プロセスのモデルが有り、システムの現在と近未来の予測が出来ているならば、操作量を決定して、目的の達成ができる、ということを示している。人間の行っている、交通、スポーツ、等の作業や動作には予測制御で説明できるものが多くある。

現在、予測制御で最も使われているものがモデル予測制御である。モデル予測制御は制御の対象をモデル化し、制御性の悪いシステムを制御する事を目的としている。ところで、上水道プロセスでは上記のような制御応答や操作量の問題があるとはいえ、プロセス自体は安定している。そのようなプロセスに予測制御を用いることの意味はどこにあるのだろうか、それは上水道システムには配水量の変動の問題があるからである。むだ時間が多く制御応答の遅い上水道システムにおいては水需要予測により配水量の変動を予測し制御を行う必要があるのである。

3 配水量

水の使用量は本来、個人レベルや家庭レベルでは束縛がない状態で使用されていると考えられる。つまり、使いたい人が、使いたい時に、使いたい量を使っていると言う状況である。しかし、水を使うと

言うことはそれぞれ何らかの理由があるはずで、これまでの研究で配水量と相関があるとされている要因は、最近の配水量、天候、気温、曜日などが挙げられる。ただし、他にも関連する要因は無数にあると考えられ、全てを説明することは不可能である。この個々の「水を使う」という状態と「水を使わない」という単純な状態量の変化が積み重なって、配水システム全体では配水量となっているわけである。このような配水量の変化はいわゆる複雑系を形成していると考えられる。複雑系の定義はまだ完全には確立されていないが、ここでの考えは方は「システムを構成する一つ一つの振る舞いは単純であるが、システム全体の振る舞いが複雑なもの」という定義¹⁾による。Fig.3に配水量決定のメカニズムを示す。

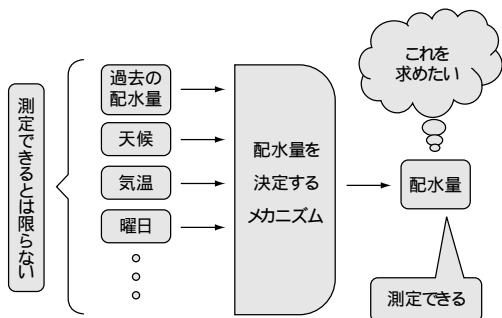


Fig.3 配水量決定のメカニズム

このようなメカニズムによって決定していると考えられる一日の配水量の変動(0時~24時)の例をグラフを示す(Fig.4)。

配水量は夜からだんだん減少し人々の寝静まる深夜から早朝に最小となる。そして朝になると流量が

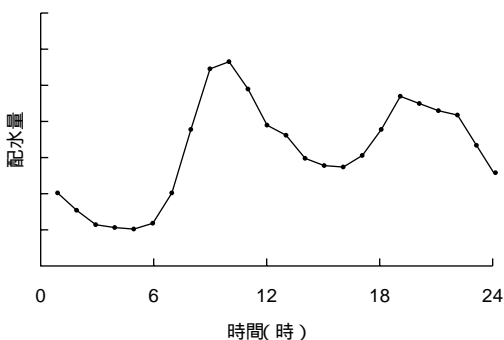


Fig.4 配水量のグラフ(1日)

急に増えて朝のピークを迎える。朝のピークのあと配水量は多少減って日中はほぼ安定した状態となり、その後再び増えて夜のピークを形成する。夜のピークのあと配水量は減っていき、次の日へと続いていく。このように配水量は一日の内にフタコブラクダの背中ような曲線を描いている、その変動の量は大きく最大流量は最小流量のおおよそ6倍にもなる。

配水量は基本的にはこのような変動をするが、実際の配水量のパターンは日によって大きく異なっている。Fig.5に7日間の配水量の変動の様子を示し、Fig.6にそれらを一日ごとに重ね描いたグラフを示す。

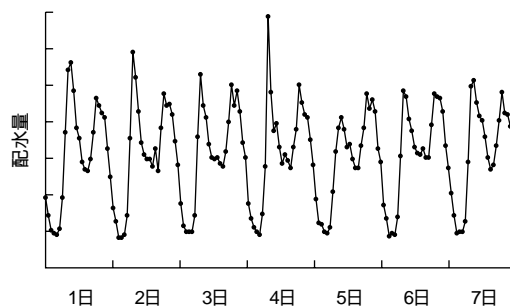


Fig.5 配水量のグラフ(7日)

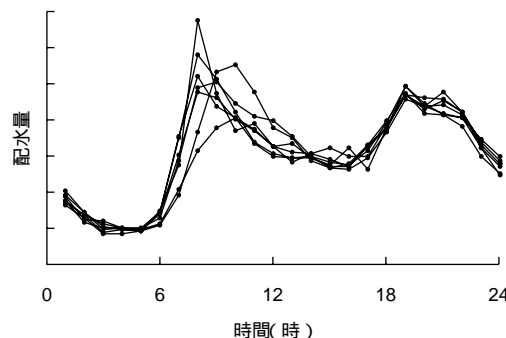


Fig.6 配水量のグラフ(7日重ね書き)

配水量のパターンが大きく変動していることがわかりいただけるであろう。

次に配水池の水位変化を示す。配水池の水位は一日の内にこのようななだらかな変化をする(Fig.7)。

配水池の水位が最大となるのは配水量が減少から増大に転ずる点でおおよそ午前5時~8時頃である。逆に配水池の水位が最小となるのは午後8時~11時頃である。どちらも配水の様子によって時間は変動

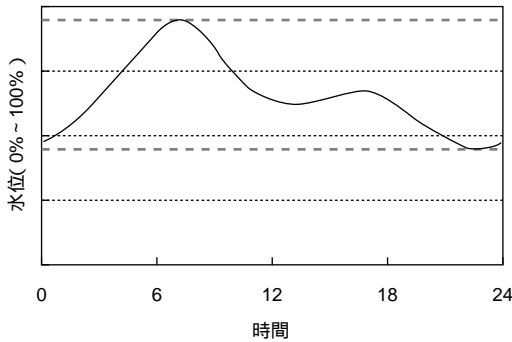


Fig.7 配水池の水位変化(1日)

する。さらに水位の変曲点が2つあるが、配水池の容量が小さい場合などはこれらも最大水位、最小水位となる場合がある。水位が最大最小となるポイントは制御上非常に重要である。これらが数時間単位で発生するため、予測制御に使う事が出来る予測方法は時間オーダーでの予測手法が必要になるのである。Fig.5 に示した配水量で送水量を一定で送水できたと仮定すると、配水池の水位変化は Fig.8 の様になる。

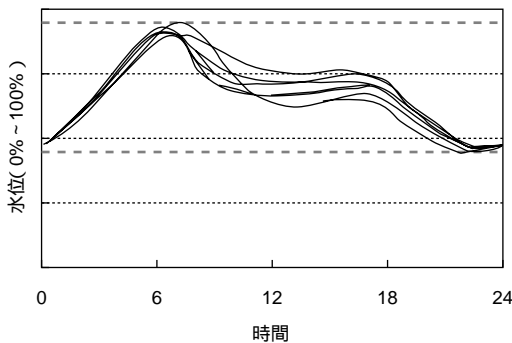


Fig.8 配水池の水位変化(7日重ね書き)

4 カオス水需要予測²⁾

配水量は複雑系を形成していると考えられることが出来るならば、複雑系のシステムのダイナミクスの推定とその予測には、カオス理論が有効である。実際の配水量が天候などの様々な要因に関連して配水されているのであれば、蓄積された過去の配水データを使うことで、カオス理論によりそれらの要因を含むシステム全体のダイナミクスを推定する事がで

き、未来の配水量を予測することが出来るのである。

カオス水需要予測の予測の手順としてはきわめてシンプルで2つのステップからなる。第一に、時間あたりの連続した配水量データを n 次元再構成状態空間に埋め込む³⁾。Fig.9 は時間あたりの配水量データを n 次元再構成状態空間へ埋め込んでいる様子を示したものである。

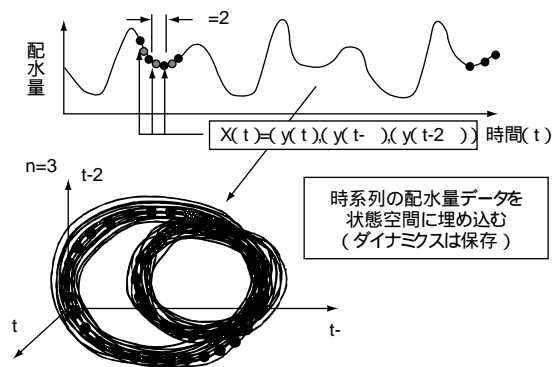


Fig.9 配水量データの埋め込みの様子

配水量データはパラメータとして次元 n 、遅れ τ を使用して、 n 次元再構成状態空間の一点 $(y(i), y(i-\tau), y(i-2\tau), \dots, y(i-(n-1)\tau))$ に埋め込まれる。同様に全てのデータを時間に沿って n 次元状態空間に埋め込む。そうして描かれたものがストレンジアトラクタである。Fig.10 は実際の配水量データを埋め込んだストレンジアトラクタの例である。

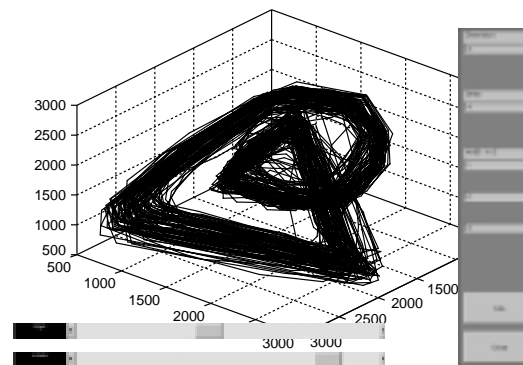


Fig.10 配水量のストレンジアトラクタ

最新の配水量データを含んだ情報を埋め込まれたストレンジアトラクタ上の一点は、その周りに多くの軌跡が描かれている。その軌跡のデータを利用し「局所ファジィ再構成法」⁴⁾を用い、未来の配水量

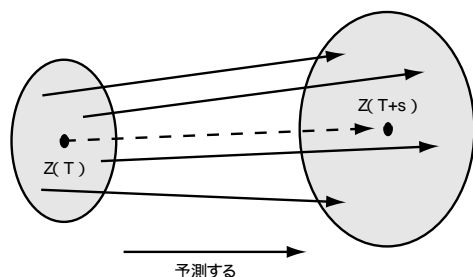


Fig.11 局所ファジィ再構成法

を予測する事が出来る．Fig.11は局所ファジィ再構成法を用いた予測計算方法の概念図である．

ストレンジアトラクタ上の $Z(T)$ の周りの軌道が1時間後に移動した動きを入力としファジィ演算を行い、未来の配水量 $Z(T+1)$ を計算している．同様に $Z(T+2)$, $Z(T+3)$ … と計算を行うことで、1時間後、2時間後、3時間後 … 10時間後、11時間後、12時間後 … と連続して予測を行うことが出来る．さらに、予測結果は最新の配水量データが出るたびに更新され、常に最新の予測を提供できるリアルタイムの需要予測システムとなっている．

このようにカオス水需要予測の計算には過去の配水量データのみを使用し、その他の、天候、気温、曜日、特異日、などの情報は一切必要としない．さらに、その配水量のデータもオンラインで収集できるため、実際の予測は操作員の入力を全く必要とせずに、予測結果だけを求め続けることが出来る．

5 カオス水需要予測制御⁵⁾

「カオス水需要予測」の技術でリアルタイムの配水量の予測が出来る．その予測結果を使用して、上下水道システムを予測制御するのが「カオス水需要予測制御」である．「カオス水需要予測制御」の制御方法をもっともシンプルに表すと次の通りである．

- ① 運用目標水位を決める．
- ② 「カオス水需要予測」により配水量を予測する．
- ③ 予測された配水量と現在の送水量から、未来の時間ごとの配水池水位を予測する．
- ④ 予測された配水池水位が運用目標水位を越えるようであれば、操作量を決定し送水量を変更する．



Fig.12 「カオス需要予測制御」の画面例

実際に制御を行っているシステムの画面を Fig.12 に示す．

この画面では、流量に関する画面と水位に関する画面を重ねて描いている．横軸は時間を示し、左側から24時間分は過去のデータであり、右側の10時間は未来のデータである．実績の配水量は棒グラフで示している．この棒グラフは実績のデータであるため現在時刻を示す縦線の右側には棒グラフは描かれていない．その棒グラフにそって描かれている折れ線グラフが、予測の配水量である．この折れ線グラフは予測のデータであるため現在時刻を示す縦線の右側にもつながって描かれている．過去の時刻に書かれているこの折れ線グラフは最後の予測データを示している．ほとんど一定で安定した値を示しているグラフが送水量のグラフである．その上になだらかな曲線を描いている折れ線グラフが配水池の水位を示すグラフである．その上と下に描かれている2本の直線が目標運用水位の範囲を示している．水位のグラフを見てみると、これまでの一日間、水位は配水量の変動をうまく吸収し緩やかに変化していることがわかる．さらに予測水位は目標運用水位の中に収まっており、現在の送水量のまま安定した送水が維持できると考えられる．

6 まとめ

水の使用量は家庭レベルでは「水を使う」、「水を使わない」という一見ランダムとも思える使われ方をしていると考えられるが、それらを空間的、時間

的にまとめた配水量の変動に規則性が現れる事は興味深い事実である。その変動する配水量を予測する需要予測の技術は、水道計画の策定の基本的情報を提供したり、浄水場の安定操業を支援する水運用システムの根幹となる技術を提供したりすることで、水道事業の発展と密接に関係し発展し続けてきた。

すでに日本の水道の普及率は96%を超えており、水の需要量も最近10年では大きな増量は見られない、さらに全国将来人口推計によると日本の人口は10年以内に減少方向へと向かうといわれている。このような社会情勢の中、昨年、水道法の改正により維持管理業務の委託が明文化され、水道業界は本格的な維持管理の時代を迎えることになった。水道維持管理指針には、科学的管理の必要性が説かれているが、維持管理業務の効率化のためには、インテリジェントな情報処理を用いた技術、とりわけ自動制御の技術が重要と考えられる。

しかし、従来の需要予測では2つの問題点があり、安定した送水を実現する自動制御を行うことは困難であった。その2つの問題点とは、①「予測を行うために、天候、気温などの予報の情報を入力する必要があり、その天気予報の精度上の限界があること」②「予測の時間が基本的に1日単位であり、自動制御を行うためには予測周期が長すぎること」である。この2つの問題点のため、従来の需要予測技術を用いた水運用システムでは上水道運用の計画を立案する事は可能であったが、自動制御を実現する事ができなかった。

これらの問題点を解決した新しい予測技術が、カオス理論を用いた「カオス水需要予測」である。配水量を左右する、天候、気温、曜日、特異日、などの要因は多数あると考えられ、それらを用いた需要予測の方法はすでに多数行われているが、一方では配水量は給水装置の開閉の操作により使用されている水が積算することで決まってくることは明らかな事実である。このような配水量の変動はまさに複雑系を形成していると考えられるのであるが、カオス理論は、複雑系の振る舞いの結果のみからその複雑系のメカニズムを割り出し、予測を行うことが出来る方法である。その原理から、複雑系である配水量の予測演算にはカオス理論を用いた「カオス水需要予測」がふさわしいと考えられる。「カオス水需要予測」の技術を、予測制御の理論と融合させたもの

が「カオス水需要予測制御」である。

「カオス水需要予測制御」を行うことにより、上水道システムは本来持っていた機能を最大限に活用することが出来るようになり、多くのメリットをもたらす事になる。配水池の貯水量はシステムのバランスを崩さない範囲で高水準を維持できるようになり、送水量・浄水量は安定する。そして浄水量の安定効果により浄水場の安定操業を支援でき、水質の安定に貢献できる。さらに、送水量の安定は流量の2乗に比例して増大する配管の送水抵抗を最小限にとどめることが出来るため省エネルギーの効果が上がる⁶⁾。省エネルギーは同時に電力消費量を抑えコストダウンにもつながるが、この制御方法ではポンプの運転台数を最小限にとどめることが出来るようになり、契約電力を低下させることでいっそう電力料金を低減することが出来る。

「カオス水需要予測」は、導入時のモデル作成などの問題が無い予測システムであり、さらに一種の自己学習機能を持つため導入後のメンテナンスも基本的に不要である。また、「カオス水需要予測制御」は、入力を一切必要としないため、配水池、浄水場の水量の運用を完全に自動化出来る技術である。今後は適用事例を増やすと共に、広域化する維持管理業務のキーテクノロジーとして有効に活用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 五百旗頭 正：“複雑系としての医療情報解析へのカオスの応用”，第48回 研究開発セミナー講演集，p.47 (2002).
- 2) 大島信夫，今井久美子，五百旗頭 正：“カオス理論による上水道需要予測システム”，明電時報，1995年6号，pp.30-34 (1995).
- 3) F. Takens: in “Dynamical Systems and Turbulence” (eds. Rand and Young)，pp.366-381, Springer, Berlin, (1981).
- 4) 五百旗頭 正，菅家正康，藤本泰成，鈴木新悟：“カオス的時系列の短期予測のための局所ファジィ再構成法”，日本ファジィ学会誌，7 (1), pp.186-194 (1995).
- 5) 大島信夫：“カオス需要予測を用いた配水池運用（高貯水率と省エネルギーの両立）”，学会誌「EICA」第1巻第3号，pp.19-26 (1997).
- 6) 今井茂樹：“水道管路システムにおける省エネルギー対策”，第2回水道管路国際シンポジウム講演集，pp.135-144 (1991).