

## 〈特集〉

## 水とエネルギーの最適化を図る“カオス水需要予測”制御

大島 信夫<sup>1)</sup>, 鮫島 正一<sup>2)</sup><sup>1)</sup> ㈱明電舎 水・環境事業部 営業技術部 企画開発課  
(〒141-8616 東京都品川区大崎5-5-5 E-mail: ooshima-n@mb.meidensha.co.jp)<sup>2)</sup> ㈱明電舎 水・環境事業部 営業技術部 企画開発課  
(〒141-8616 東京都品川区大崎5-5-5 E-mail: sameshima-s@mb.meidensha.co.jp)

## 概要

我々は、水道施設の制御方法を検討する中で、リアルタイムの水需要予測システムである“カオス水需要予測”を開発した。配水池等の貯水能力を生かして緊急時に対応できる安全・安心な水運用と、送水量の変動を抑えて安定した運転を行う水運用を、連続して予測制御を行うことで両立可能であることを示した。さらに、多くの水道施設で使われているON-OFFで運転するポンプのよ

うに、最適化が難しい離散的な設備についても、混合整数計画法とカオス水需要予測を組み合わせることにより、水とエネルギーの最適化を図ることが可能となった。

キーワード：上水道，自動制御，省エネルギー，需要予測，最適化

原稿受付 2012.5.29

EICA: 17(1) 17-21

## 1. はじめに

市民生活を支える代表的インフラとして、すぐに思い浮かぶのは、電気、ガス、水道、下水道、そして通信などであろう。日々の快適な生活を行うためにはどれも欠かすことのできない施設であるが、生命をささえる“水”を供給している水道施設は特に重要である。

水道は、河川などから取り入れた原水を浄化し、消毒処理を行って安全で安心な水を作っている。また、遠く離れたダムや河川等の水を各家庭まで運ぶという役目も重要で、取水から、導水・浄水・送水・配水・給水と様々な施設を有機的につなげることで、浄水を供給するという機能を果たしている。水道システム全体の水を中心とした制御のことを水運用と言い、監視制御装置によって各施設の協調が取れた運転となるように制御している。

この様な水道施設を全体として効率的に運用するためには数時間から1日程度先までの需要量を推測することが重要である。浄水処理には時間がかかるため、前もって取水量や浄水量を計画しておく必要があるからである。また、水量の調整機能として12時間程度の貯水能力を持つ配水池が設けられているが、その機能を最大限に生かすためにも有効である。

我々は、水道施設の効率的運用と自動制御を行うための需要予測として、1時間周期で予測できるカオス水需要予測システムを開発し、様々な水道施設で運用を行ってきた<sup>1,2)</sup>。

本研究では、自動制御の基本となる連続的な制御に

加え、ポンプのON-OFFなどの離散的な制御も考慮に入れ、水道施設における水とエネルギーの最適化を実現するための制御を検討したので報告する。

## 2. カオス水需要予測

リアルタイムに計算が可能なカオス水需要予測システムを開発した。その特徴は次の通りである。

- ・水道の需要量を時間単位に連続して予測する  
(以下、需要予測とする)
  - ・予測に使用する情報は過去の配水量データのみ
  - ・天候、気温など、オペレータによる入力が必要
- カオス水需要予測に必要な配水量データは、監視制御装置内ですべて入手できるため継続的に最新データを用いて計算することができる。

カオス水需要予測の概要を Fig. 1 に示す。使用する時間単位の配水量は一般に次のように変化する。早

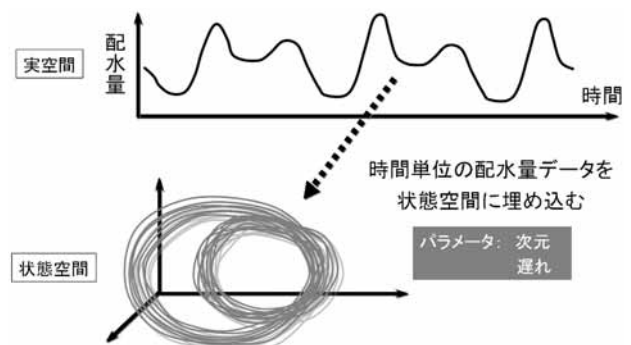


Fig. 1 Embedding of Water Supply Data

朝の配水量が最小で、人々の生活がスタートすると共に急激に増加する。朝のピークを過ぎると昼間は安定した配水量で経過し、夕方に向かうとまた配水量は増加する。夕方のピークは朝方よりも時間が長く緩やかな山を形成する。その後深夜から早朝にかけて配水量は減少して、また早朝に最小となる。

このように時間単位の配水量は大きく変化する非線形性の強いデータである。そのため、カルマンフィルタなど線形データを扱う理論では予測する事が困難である。一方、カオスは元々が非線形のデータを扱う理論であり、時間単位の配水量とのマッチングが良い。

時間単位の配水量データは、そのままではカオスの理論を適用できないため、状態空間へ埋め込む変換を行う。この変換はターケンスの埋め込み理論に基づいており<sup>3)</sup>、配水量のデータを、次元・遅れなどのパラメータを使用し、現実の空間から状態空間へ埋め込む変換を行う。

状態空間に埋め込まれた配水量はカオスの特徴であるストレンジアトラクタを描いている (Fig. 2)。元の配水量の持つ特徴は、埋め込まれたストレンジアトラクタに含まれるという性質があり、それを利用して需要量を予測する。最新のデータの近傍で計算に使用するデータを抽出して予測計算を行い、続いてカオスの世界から現実の世界に復元することで配水量の需要量を予測する<sup>4)</sup>。

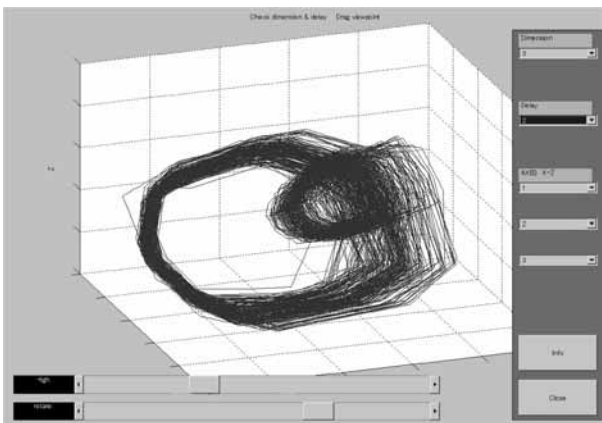


Fig. 2 Strange Attractor of Water Supply

### 3. カオス水需要予測制御

#### 3.1 水運用制御

カオス水需要予測のリアルタイムの特徴を生かして、水運用の自動化システムを構築できる<sup>5)</sup>。ここでは最もシンプルなモデルとして、高台に設置された配水池に対して、浄水場から VVVF ポンプで送水するモデルを考える (Fig. 3)。

配水池の全貯留量のうち半分の 50% を緊急時対策

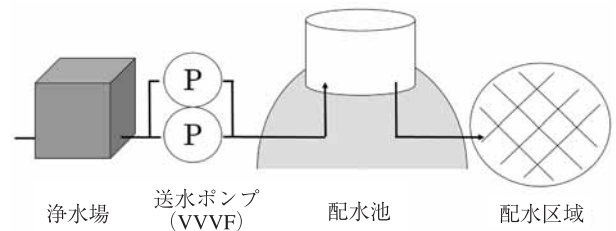


Fig. 3 A Simple Water Distribution Model

の貯留量とし、50% から 90% の間を水運用の調整で使う範囲とする。配水池の水位は、送水量が一定の場合、流出側となる需要量が増えれば低下し減れば上昇する。一方、需要量が同じ場合、送水量を増やせば水位は上昇し、減らせば低下する。制御画面を Fig. 4 に示す。

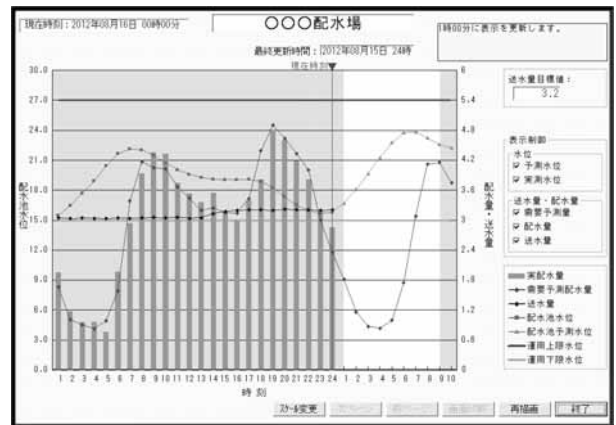


Fig. 4 Control Interface with Water Demand Forecast System

配水池は連続で運用されており、あわせて本システムの制御も連続で行う。制御の画面は連続したデータをとらえやすいトレンドグラフの形式を採用している。現在の時刻を挟み左側に 24 時間分の実績データ、右側に 10 時間分の予測データを表示する。予測・制御の周期は帳票の更新周期に合わせて 1 時間毎とする。

送水量設定値は、需要予測データから計算した予測水位で変更するか否かを判定する。ここでは 8 時間に設定した判定時間の中で、水位が運用範囲をはずれると予測される場合に送水量を変更している。予測水位が下方にはずれる場合には送水量を増やし、上方にはずれる場合には送水量を減らす。予測を使うことで、制御時点での水位が運用範囲からはずれていない早い段階で送水量の変更が可能であり、時間に余裕が生まれる。設定値は変更したい水量を時間で割ったものとなるため、流量の変動が最小限の安定した制御を実現できる。安定した送水量は供給元である浄水量・取水量の安定をもたらし、水道施設設計指針に示されてい

るような、浄水量一定を基本とする設計に合致した制御を実現できる<sup>6)</sup>。

ここでは配水池が1つのシンプルな事例を示したが、配水池が複数ある場合、配水池が高区・低区に分かれている場合や、数珠つなぎに配置されている場合など、様々な施設でも問題なく制御可能である。それぞれの配水池を生かし送水量を安定化させれば、それらの合計となる浄水量も必然的に安定させることができる。

このような方法で昼夜を通じて送水量がほぼ一定となる運用を実現できる。電力会社の料金プランで比較すると、24時間一定に電気を使用する場合は、標準のプランよりも時間帯別のプランを選んだ方が料金は安くなる。つまり、電力の平準化に貢献しているということになる。さらに積極的に夜間電力を使用する方法も考えられるが、その場合については次項で説明する最適化手法を組み合わせることで実現可能である。

### 3.2 水道システムの最適化計画

多くの水道施設ではポンプの運転を ON-OFF による制御で行っている。操作は直感的で分かりやすいが、台数が増えると最適な運転方法を見つけることが難しくなる。さらに施設の規模が大きくなると、様々な機械の組み合わせにより効率が変わってくるため、最適化がより困難となる。

このような複雑な施設について、カオス水需要予測と共に混合整数計画法を使用し、水とエネルギーを最適化する方法を検討した。計画は1日分の要素を全て含む24時間単位の計画とし、計画の開始時間は運用が行いやすい朝の8時に設定した。

カオスの需要予測により24時間先までの需要量を予測し、配水池の運用水位を逸脱しないよう、送水ポンプの運転計画（以下、送水計画とする）を策定することが可能である。送水ポンプには、送水量を自由に設定でき送水量が連続値を取りうる可変速ポンプと運転台数により送水量が決まり送水量が離散値となる固定速ポンプがあり、これらを組み合わせて使用する。

送水計画策定の目的は、最も効率が良いか、コストが最小とすることである。効率が良いとは、動力が少なく、できるだけ運転変更回数が少なくなるように固定速ポンプを運用し、できるだけ安定した送水量で可変速ポンプを運用することと同義である。また、コストを最小とすることは、電気料金の契約が季節別時間帯別料金を採用する場合、最も安価な価格で満足する送水条件を見つけることである。コストを最小にする場合には、固定速ポンプの運転台数を変数とし、コストを最小化する混合整数計画問題に置き換えて解くことで最も安価な送水計画を策定することが可能である。目的関数Cは、以下の通り定義できる。

$$C = \min \left( \sum_i E_{Fi} \left( \sum_{t=1}^{24} P(t) n_i \right) + \sum_j \left( \sum_{t=1}^{24} P(t) E_{Vj}(t) \right) \right)$$

- C : 目的関数 (コスト)
- i : 固定速ポンプの台数
- $n_i(t)$  : 固定速ポンプの運転台数
- j : 可変速ポンプの台数
- $E_F$  : 固定速ポンプ運転時の動力 (固定値)
- $E_V$  : 可変速ポンプ運転時の動力 (送水量の関数)
- $P(t)$  : 重量料金

できるだけ安定した送水量とするためには、次の時刻に運転台数が変わるとコストにペナルティを加えることで、結果としてペナルティが小さくなる方策をとることができる。目的関数の特性として、均一料金時には動力が必ず最小となるが、季節別時間帯別料金を採用してコスト最小化を行う場合には、動力が必ずしも最小とはならないことに留意する必要がある。

制約条件としては、上述の配水池の運用水位の逸脱以外にも、以下の例に示す様な制約条件が存在する。

- ・送水先の配水池水位により固定速ポンプの送水量が変化する
- ・固定速ポンプの一日の運転変更回数の上限值
- ・可変速ポンプの送水量の変更量の上限值
- ・計画策定時の水位と24時間先の水位が等しい

例題として、Fig. 5 に示す3箇所の送水系 A, B, C から配水される配水区域の送水計画を策定した例を示す。A系は1台又は2台の固定速ポンプで配水池を経由して配水区域に給水する。B系は0台又は1台の固定速ポンプで配水池を経由して配水区域に給水する。C系は1台の可変速ポンプで配水池を経由して配水区域に給水する。各ポンプによる動力は Fig. 5 内に示す。

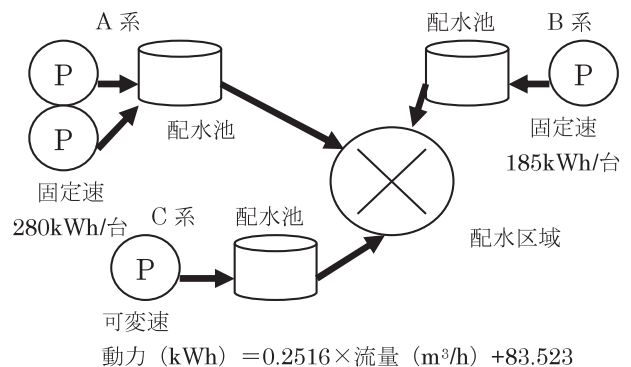


Fig. 5 Schematic Flow of Water Distribution System

均一料金と季節別時間帯別料金とでは、ともに配水池 (Fig. 6 では A 系の例を示す) の水位制約を満足しているものの、策定された送水計画が異なっていることが分かる。A系に着目すると、季節別時間帯別



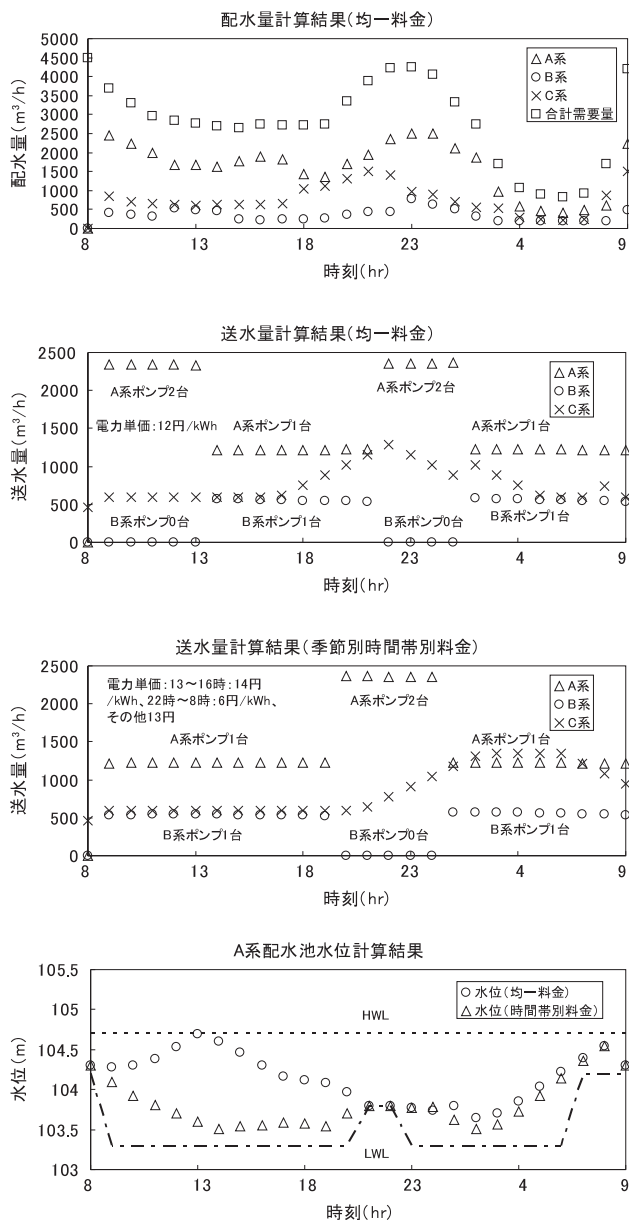


Fig. 6 Simulation Results of Cost Minimization Applied to Unit Price Varying by Time and Energy Minimization Applied to Unit Price without Dependence on Time

料金体系では、電力単価が高価な13時から16時には1台運転となり配水池の水位が低下している。一方、均一料金体系ののでは2台運転となっている。季節別時間帯別料金でA系送水量が少ない分は、単価が安いB系送水ポンプの1台運転時間を長くすることで補っている。

このように、混合整数計画問題を応用したポンプ運転最適化では、制約条件を満たした上で固定速ポンプや可変速ポンプを含んだ系において、コストや動力(つまりエネルギー)を最小化することができる。カオス水需要予測を組み込んだ高精度な需要予測と組み合わせることで、送水計画の精度も上がり安定した水運用系の構築が期待できる。

需要予測の精度が高い場合には計画通りの運用が可

能であるが、天候など外部環境の変化により、需要予測と実際の配水量との間に差が生じる場合がありうる。

その様な場合でも、カオス水需要予測では1時間毎に最新の需要予測を行い、計画時の予測と比較して必要に応じて運転計画を修正する。現場の運用に合わせたリアルタイムの予測が可能であるため、実際の配水量が予測値と大きく乖離する前に運転計画を修正することができる。それにより変動の少ないスムーズな制御を実現可能であり、運用上のリネットとなる。

#### 4. ま と め

カオス水需要予測のリアルタイム性を生かして水道システムが連続的に安定して運用できることを示した。さらに、ポンプのON-OFF運転がある施設や、複数の水源を持つ複雑な施設でも混合整数計画法と組み合わせることで予測制御を使った最適化が図れることがわかった。これにより、小規模から大規模まで様々な水道施設にカオス水需要予測を用いた水運用制御を適応することが可能となり、導入の効果が期待できる。

水道事業は重要なインフラとしての水道の提供者であると同時に、全国の電力の約0.9%を消費しているエネルギー消費産業の側面を持つ<sup>7)</sup>。消費されるエネルギーのほとんどは水道設備で使用され、最も多くの電力を消費するのはポンプである<sup>8)</sup>。水運用の目標は水とエネルギーの最適化であり、水資源とエネルギー資源を大切にすると同時に、エネルギーコストの最小化を図る運転を実現する事にある。最適化の適用事例を増やすことで、それぞれの水道事業の運営には電力料金の削減というメリットがあり、さらには日本全体の電力使用量の削減にも貢献できる可能性を示している。

厚生労働省において「世界のトップランナーを目指してチャレンジし続ける水道」を基本理念とした、水道ビジョンが制定されている<sup>9)</sup>。その重点項目として、ここに示したような環境やエネルギー対策が重視されている上に、水道の国際貢献についても提案されている。カオス水需要予測はその原理から、日本とは生活習慣が異なる海外でも、特にアレンジすることなく需要予測を行うことが可能である。今後は、日本の高度な水道技術の海外展開に際して、水運用と効率化の面から後押し出来たら幸いと考えている。

#### 参 考 文 献

- 1) 大島信夫, 小須田徹夫: カオス需要予測を用いた配水池運用——配水池容量と可変速ポンプの有効活用——, 第48回全国水道研究発表会講演要旨集, pp.316-317 (1997)
- 2) 大島信夫, 関 竜也, 平松正宣: 笹川浄水場におけるカオス需

- 要予測を用いた水運用の自動化, 第55回全国水道研究発表会講演要旨集, pp. 358-359 (2003)
- 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: カオスの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: カオス水需要予測制御による水運用の自動化, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 7, No. 3, pp. 30-35 (2002)
  - 6) 水道施設設計指針, 日本水道協会, pp. 438-439 (2000)
  - 7) 田中宏明: 地球温暖化に備え世界に貢献するコンソーシアムを目指して, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 15, No. 1, pp. 2-6 (2010)
  - 8) 厚生労働省: 水道事業における環境対策の手引書 (改訂版) (2009)  
<http://www.mhlw.go.jp/za/0723/c02/c02-02.html>
  - 9) 厚生労働省: 水道ビジョン (改訂版) (2008)  
<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/vision2/>