



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	完全自動運転を実現する「カオス需要予測を用いた水運用システム」
Author(s)	大島, 信夫; 小西, 隆裕
Description	第8回衛生工学シンポジウム (平成12年11月16日 (木) -17日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 6 水施設計画 . 6-3
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 8, 247-252
Issue Date	2000-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7244">https://hdl.handle.net/2115/7244</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	8-6-3_p247-252.pdf



6-3

完全自動運転を実現する「カオス需要予測を用いた水運用システム」

大島 信夫 (株式会社明電舎)、小西 隆裕 (株式会社明電舎)

1. まえがき

水道施設とは、貯水、取水、導水、浄水、送水、配水の各施設及び給水装置から構成されるシステムであると同時に、土木、建築、機械、電気、計装等の各分野にわたっており、これらが一体となって機能を発揮するものである。これらのプロセスで作られる水の需要量は、人々の生活する様子を反映してある程度の周期的要素と天候などの要素で変動している。対して浄水量は、浄水施設の特徴から時間にかかわらず一定に作られる。

この時間変動する需要量と、一定に作られる浄水量の間を調整する機能を求められる施設が配水池である。従って配水池は、需要量の変動によって貯水量を変化させながら送水することになる。ところで、配水池にはもう一つ大きな機能が求められる。それは、配水池より上流側の事故発生時などにも、所定の水量・水圧を維持できる機能である。この機能を最大限に発揮するために、配水池は高い貯水率を保つ事を要求される。実際の水運用システムを考えてみると、これら2つの求められる機能をバランスよく満足させ、過剰でない設備を用いて、かつ最小のコストで運用することが望まれる。表1に配水池の運転方法と水位・送水の関係をまとめた。

本報告では、新しい需要予測の手法である「カオス需要予測」を用いて送水ポンプの完全自動制御を実現し、同時に送水量を安定させることにより配水池と浄水場の安定した運用方法の実現をはかる方法について検討したものである。

運転方法	水量調節機能を優先	高貯水率を優先
水位の変化	大きい	小さい
送水量の変化	小さい	大きい

表1 水運用システムの方法と水位・送水の関係

2. 技術的背景

1997年12月気候変動枠組条約第3回締結国会議(地球温暖化防止京都会議)で、議長国である日本は、CO<sub>2</sub>などの地球温暖化排出ガスに関して2008年~2012年で1990年比で6%の削減を約束した。日本政府はこの約束を果たすために1998年6月に「地球温暖化防止推進大綱」を発表し、1999年4月には「エネルギーの使用と合理化に関する法律」(改正省エネ法)を施行した。改正省エネ法ではこれまでの「エネルギー管理指定工場」に相当する「第一種エネルギー管理指定工場」に加え、「第二種エネルギー管理指定工場」を新設した。年間消費電力が600万kWhを越える水道施設は「第二種エネルギー管理指定工場」となり、法律に規定される様々な義務を負うこととなる。このことは社会インフラの重要な部分をしめる水道事業も例外ではないということを示している。しかし、「第二種エネルギー管理指定工場(事業場)」に指定されるかどうかに関わらず、今後地球温暖化排出ガスの削減を

行うためには水道事業において省エネルギーに努めなければならないことは当然である。

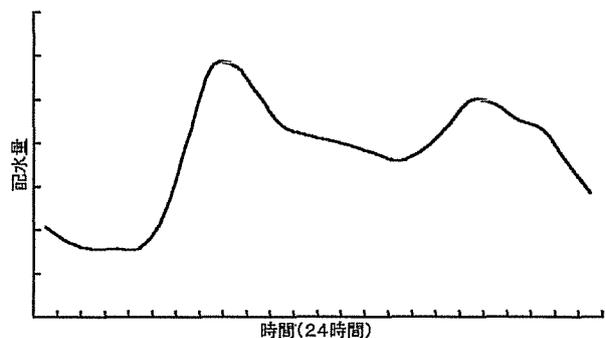
水道施設全体の消費するエネルギー量は日本全国の消費エネルギー量の1%弱で、原子力発電所1基の発電量に相当すると言われている<sup>(1)</sup>。さらに広義に考えイニシャルエネルギーを見ると、浄水場や送配水システムの資機材などを製造・加工・運搬・敷設する過程で消費されるエネルギー量は膨大であり、中でも貯水量の大きい配水池の施設の建設に関わるエネルギー量は大きい。ランニングエネルギーに話を戻すと、水道施設におけるランニングエネルギーの最大部分を占めるのはポンプであり、その電力消費量は、水道施設全体の55%~70%に達すると報告されている<sup>(1)</sup>。ポンプは水道施設として必要な水を輸送するために使われているわけであるから、省エネルギーを実現するために水量を大きく減らすことは難しい。そのため省エネルギーを実現するためには、日々の運用で送水の効率を上げることが最良の方法である。

### 3. 水運用とポンプの運転

ポンプの運用上の効率を下げている最大の要因は、管路損失などの送水に対する抵抗であり、その理由は抵抗が流量の2乗に比例するためである。そのため、この抵抗をトータルに減らすためにはポンプの安定稼働による一定送水が必要である<sup>(2)</sup>。一定送水という省エネルギーを考えたポンプの運転目標は、同時に水道システム全体で見たときにもメリットのある運転である。浄水場はじめ水道の施設を有効に利用するためには、その施設の能力に見合った水量を一定に送水することが望ましい。それゆえ、水道施設の有効利用とポンプの一定な運転による省エネルギーな運転は同時に達成できる目標となり得る。

ポンプの一定送水を実現させるためには上手な水運用が必要である。上手な水運用を達成するためには有機的に接続する水道施設の特性を把握した上での運用が必要になってくる。しかし、有機的に接続する水道施設の特性を把握すれば上手な水運用が行えるかという点、一つ大きな問題がある。それは需要量の変動である。特に一日の中の需要量の変動は大きく、この需要量の変動を加味した水道施設の運用が求められる。

ここで1日の需要量の変動を見てみよう。第1図に代表的1日の需要量の様子を示す。需要量は人々の寝静まる深夜に最小となり、時間の経過と共に上昇し朝のピークを迎える。需要量の朝のピークは1時間あたりでは1日の最大の需要量となることが多く、その後ピークを過ぎた需要量は日中に向かって穏やかに減少していく。夕方になるにつれ需要量は再び上昇し夜のピークを迎える。夜のピークは最近増加傾向にあるが朝のピークに対して緩やかなピークである。夜のピークの後需要量は穏やかに減少し深夜に最小となる。



第1図 一日の配水量の変化の様子

それでは次に1週間連続の配水量のデータを第2図に示す。1日の需要量の変化パターンには規則性が見られるが、朝や夕の需要量のピークの高さやなどを比べてみると、実際の需要量

は変化に富んでいることがわかる。続けて、この1週間のデータを1日単位で重ねたグラフを第3図に示す。1日単位で配水量を重ねてみると、朝の配水量のピークは高さだけでなくピークの時間も違っていることがわかる。

この変化に富んだ需要量が、上手な水運用を難しくしているものに他ならない。これまでは、ベテランの操作員が天候や気温、曜日や特異日などの情報を勘案し、うまく水運用を行ってきた。しかし今後ベテランの操作員の不足や、小規模配水池の無人化という流れに対して対応する必要性がある。さらに大きなシステムとして見ると、より大きく複雑に結合する水道施設の高度な水運用を成し遂げるためには、需要量の変化を自動的に予測する技術が必要であることは間違いない。

上水道運用の分野においてはこれまでも需要予測は行われてきていたが、これまでの需要予測は主に浄水場の運転支援を中心に考えた日単位の需要予測であった。時間単位の需要予測を行う場合は、いったん日単位の配水量を予測し時間パターンを当てはめることによって時間量を予測してきた。

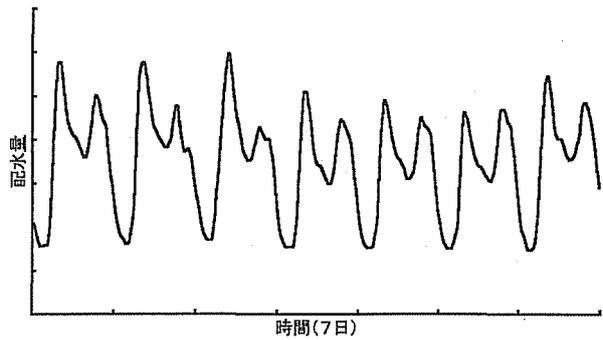
我々はよりよい水運用の確立のために、全く新しい時間単位の需要予測手法であるカオス需要予測を開発した。カオス需要予測は、これまでの日予測→時間パターンによる時間量への変換という手順を踏まず、過去の時間単位の需要量のデータから、直接時間単位の需要量を予測するシステムである。これにより、各時間ごとに最新の需要予測の結果が得られるという、リアルタイムの需要予測システムを構築することができる。配水池の管理をはじめとし、高度な水運用を行うためには、この時間単位でリアルタイムな需要予測を行えるカオス需要予測は非常に有用であると考えられる。

#### 4. カオス需要予測

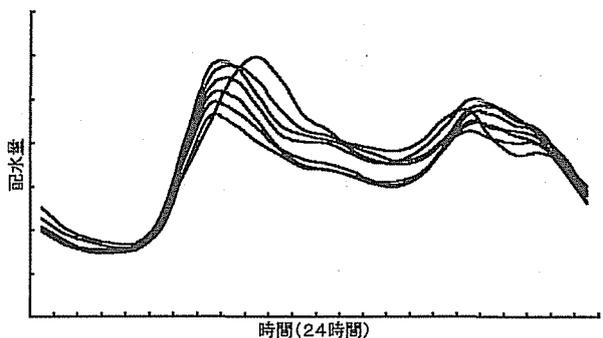
水道施設を有効に効率良く運用するためには、時間単位の変動をリアルタイムに予測できる需要予測が必要と考え、新しいカオス需要予測の手法の開発を行った。カオス需要予測の具体的な予測の手順としては2つのステップからなる。①時間あたりの連続した配水量データをタケンスの埋め込み理論により再構成空間に埋め込む。②埋め込まれた時間あたりの連続した配水量データ（ストレンジアトラクタを描いている）から局所ファジィ再構成法を用いて、将来の需要量を予測する。

##### 4.1 埋め込み（タケンスの埋め込み理論）

時間ごとの配水量データ  $y(t)$  から遅れ時間  $\tau$  ずつ間隔をあけて次元の数だけデータをと



第2図 一週間の配水量の変化の様子



第3図 重ね描いた一週間の配水量

ベクトル  $(y(t), y(t-\tau), y(t-2\tau), \dots, y(t-(n-1)\tau))$  をつくる ( $\tau$  は遅れ時間)。このベクトルは  $n$  次元再構成状態空間  $\mathbb{R}^n$  の 1 点を示すことになる。このベクトルの時間  $t$  を変化させると、この  $n$  次元再構成状態空間に軌道が描ける<sup>(3)</sup>。  $n$  次元再構成状態空間への埋め込みの様子を第 4 図し、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を第 5 図に示す。

#### 4. 2 予測

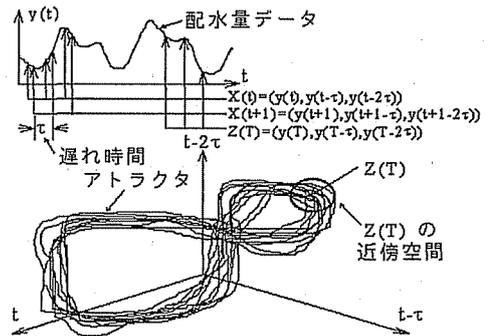
第 5 図に示した様に、配水量のデータは非常にはっきりとカオスの特徴であるストレンジアトラクタを描いている。ストレンジアトラクタに描かれたデータの特徴は近傍のデータは同様の動きをしていることである。この特徴を利用して予測を行う。いま、最新の時間の配水量データによって得られたデータがストレンジアトラクタ上の 1 点に存在する。その一点の周辺には、多数の近傍データが存在する（時間的には過去のデータとなる）。その近傍データの内から最も近いもの数点をピックアップし、その数点のデータが次のステップでどこに行ったかを調べ、その行った先のデータを利用して自分のデータの行く先（予測データ）を求める。第 6 図この近傍データのデータ処理をファジィ技術を用いて行う方法が「局所ファジィ再構成法 (Local Fuzzy Reconstruction)」である<sup>(4)</sup>。

#### 4. 3 カオス需要予測による予測結果

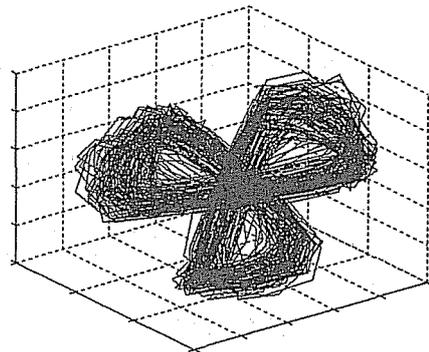
カオス需要予測に使用する需要量 (= 配水量) は、ある配水池で実際に配水された 1 時間単位の 3 ヶ月のデータ 2208 個を使用した。データの前半 1104 個を既知のデータとして、前述した埋め込み方法で、埋め込み次元 ( $n$ ) を 7 とし、遅れ時間 ( $\tau$ ) を 2 として状態空間においてアトラクタの再構成を行った。予測は最新の時間までの配水量データをアトラクタに埋め込み、「局所ファジィ再構成法」により、その時点からの未来の需要量 (1 時間後, 2 時間後, 3 時間後, ...) を予測している。また「カオス需要予測」の特徴であるリアルタイムの予測の特徴を生かして、時間が 1 時間経過するたびに、最新の配水量データを既知情報に加え、再び「局所ファジィ再構成法」により未来の需要量を予測することができる。このようにして予測された需要量は 1 時間ごとに最新の予測値に更新される。

#### 5. カオス需要予測を用いた水運用システム

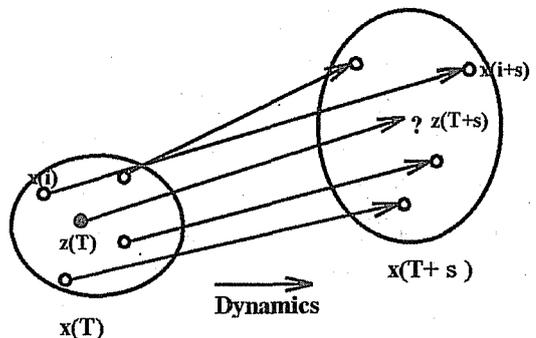
「カオス需要予測を用いた水運用システム」の有用性を検討するために、水運用システムのシミュレーションを行った。



第 4 図  $n$  次元状態空間への配水量の埋め込み



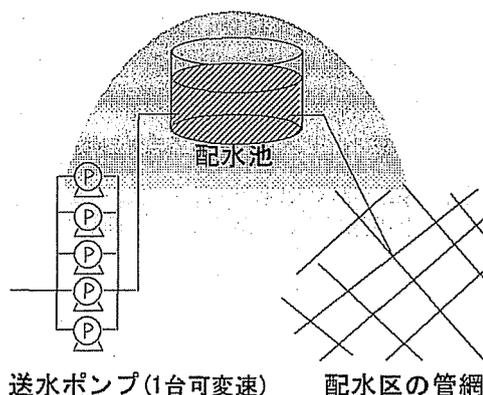
第 5 図 配水量を埋め込んだアトラクタ



第 6 図 予測の様子

### 5.1 水運用システムモデル

低所にある貯水施設から、ポンプによって高所にある配水池に送水し、その配水池から自然流下により配水するモデルを用いた。モデルの構成を第7図に示す。送水ポンプの特性と台数による吐出量の変化を第8図に示す。ポンプの吐出量は、低所にある貯水施設の水位と高所にある配水池の水位の差(=実揚程)と、ポンプ台数によって、第8図に示すように1点に決まる。配水池容量は実際の配水池の容量と計画1日最大給水量の関係から算出して8時間配水量に設定し、水位は貯水率が直感的に判定できる0m~10mとした。配水量は、前出の実際の配水池で配水された1時間単位の3ヶ月のデータを使用した。



第7図 配水池運用モデル

### 5.2 制御方法

配水池に送水するポンプの台数制御に、カオス需要予測を用いた新たな配水池の水位制御方法を考えた。

#### ○ 配水池の制御方法

① HWL、LWLを決める。今回は実配水池の運用データを参考に、

HWL=9m、LWL=6mとした。(貯水率60%~90%に相当)

② 「カオス需要予測」により需要量を予測する。

③ 予測された需要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LWL、HWLを越えたらポンプを増台及び減台する。

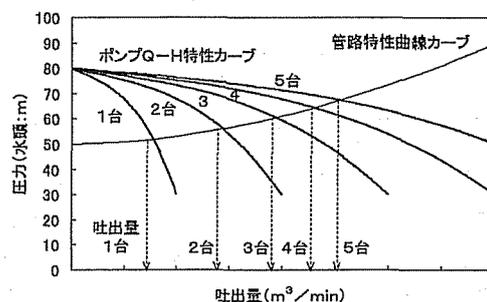
(ここでは3時間分を採用)

1時間ごとの新たな需要量データが得られるたびに、「カオス需要予測」により新しい予測値を求め制御に利用した。「カオス需要予測」による制御周期は予測周期に合わせて1時間周期とした。

### 5.3 水運用システムのシミュレーション結果

水運用システムのシミュレーション結果を第9図に示す。第9図は、ある1日の運転データである。この日は、ポンプの起動が16時(矢印)におきて、ポンプは2台から3台運転に変わっている。ポンプ起動時の水位の予測グラフを第10図に示す。第9図の16時の時点で水位は目標範囲内にあるが、第10図の予測水位が目標範囲を下回っているため、16時の時点でポンプが1台起動している。1週間の連続したシミュレーションの結果を第11図に示す。ポンプは2台運転と3台運転を繰り返し、ポンプの起動頻度は7日間で5回であった。水位は、ほぼ目標水位バンド内で運転されていた。水位は朝の需要のピークの前に自然に高くなるという、時間ごとの必要貯水量を考えても合理的な運用パターンとなった。

## 6. 考察



第8図 ポンプ吐出量の変化の様子

「カオス需要予測を用いた水運用システム」を行うことにより、ポンプの起動頻度を抑えて送水量を均等化することができる。第 8 図のポンプ台数と流量の関係に示されているように、ポンプの起動頻度を抑えて送水量を均等化することは、流量の2乗に比例する管路損失を少なくする点で、省エネルギー対策になる<sup>(2)</sup>。

また、第 9 図、第 11 図に示されているように、朝の配水量のピークの直前に配水池水位が高く(=貯水率が大きく)運転されており、配水池より上流側の事故発生時などにも、配水池の持つ貯水量を最大限に生かす運転になっていることがわかる。

このように、「カオス需要予測」は時間ごとに最新の予測が行えるため、自動制御に向けた予測手法と言える。しかも、この「カオス需要予測」は、これまでの需要予測手法のように、天気・最高気温等の入力をする必要がなく、配水量を自動で記録し続けるだけで最新の予測が可能であるという実運用上のメリットも合わせ持っている。過去の配水量データだけで予測可能であるという考え方は、天気や最高気温そして曜日などの配水量に関連する要素はすでに過去の配水量データに反映されているという考え方をとるためである。

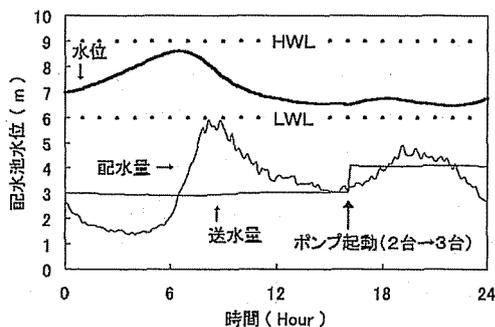
### 7. まとめ

このように「カオス需要予測を用いた水運用システム」を行うことにより、

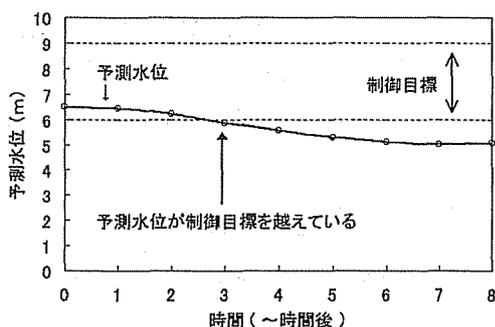
- ① ポンプの起動停止の回数を減らし、
- ② 配水池の水量調節機能を生かし、
- ③ 需要パターンに合った高貯水率で、
- ④ 送水量の変化を最小限にし、自動で安定に運用できることがわかった。

### 8. 参考文献

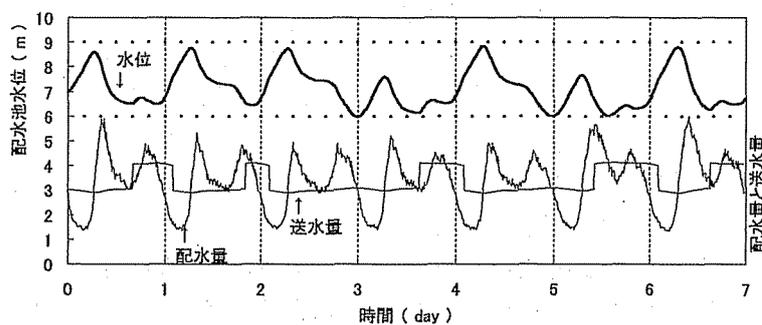
- (1) (財) 水道管理情報センター: “水道システムの省エネルギー対策 (基礎調査) - 地球環境問題から水道を考える -”
- (2) 今井 茂樹: “水道管路システムにおける省エネルギー対策”, 第2回水道管路国際シンポジウム講演集, 135-144(1991).
- (3) F.Takens: in “Dynamical Systems and Turbulence” (eds. Rand and Young), 366-381, Springer, Berlin, (1981)
- (4) 五百旗頭 正, 菅家 正康, 藤本 泰成, 鈴木 新悟: “カオス的時系列の短期予測のための局所ファジィ再構成法”, 日本ファジィ学会誌, 7(1), 186-194(1995).



第 9 図 配水池シミュレーションの結果



第 10 図 予測水位の変化の様子



第 11 図 シミュレーションの結果 (1週間)