

# 水道の効率化を支援する 情報統合型カオス需要予測

大島信夫 Nobuo Oshima

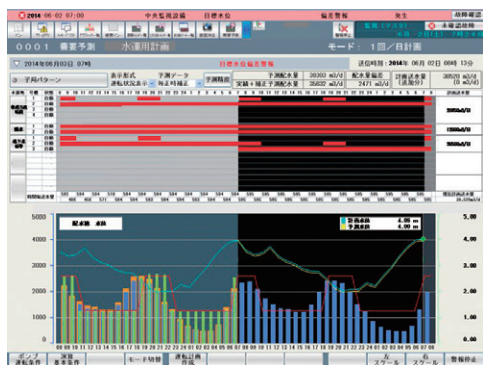
キーワード 水運用, 需要予測, 予測制御, カオス, 自動化, 自動制御, 効率化, 省エネ, 省力化, ICT, ビッグデータ

## 概要

近年、水道の効率化・省エネ化・低コスト化の要求から、水道のシステム全体を効率的に運用する、水運用の技術に注目が集まっている。当社は、独自のリアルタイム予測技術である「カオス需要予測」を組み込んだ「水運用自動化システム」で高度な水運用の要求に応えてきた。

今回、ICT (Information and Communication Technology) の進歩によって、監視装置に集められる膨大なデータを生かし、様々なデータを柔軟にカオス理論に取り込む「情報統合型カオス需要予測」を開発した。

時間単位の予測から比較的長期の日単位の予測までの精度向上を実現し、浄水場の連携やエネルギーコストの削減に貢献できる新しい水運用制御の提案を進めている。



情報統合型カオス需要予測の水運用画面

## 1 まえがき

砂漠に暮らす人々にとって、水くみは欠かせない日課であった。きれいな水場から瓶などに移された水は、重いが大切に離れた家まで運ばれる。このように大きな苦勞を伴って手に入れた水は、人々の生活を潤していた。

日本の人々にとっては、水は蛇口をひねれば、いつでも、どこでも、好きなだけ使うことができる。このサービスを提供している水道は、生活に欠かせないライフラインである。水道は既に生活の一部となっているためその恩恵を忘れがちだが、砂漠でも日本でも水の供給が大変であることに変わりはない。

きれいな水源の確保から、水の浄化処理・重量物である水の運搬・安全のための消毒・汚染を防いだ貯蔵と、長年かけて構築されてきた水道施設

があり、日々維持管理を行う人々がいて、安全で、安定した水道の供給が維持されているのである。それらを支える水運用の世界が、カオス需要予測が活躍する場である。

電機メーカーである当社は、水道の黎明期から、受変電システムやポンプを動かすモータなどの製品で水道のシステムを支えてきた。特に近年では、効率的な水道という要求に応えるため、監視制御装置と組み合わせて、水道の使用量をリアルタイムに予測する「カオス需要予測」技術と、その技術を応用した「水運用自動化システム」を提供し、多くの水道事業者でご使用いただいている。

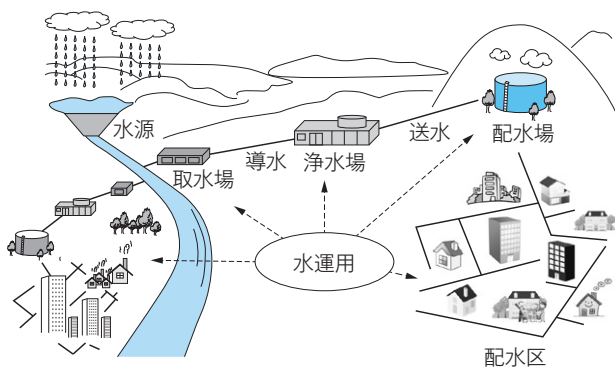
本稿では、カオス需要予測技術のステップアップとして、予測精度の向上を目指した「情報統合型カオス需要予測」の概要を紹介する。

## 2 カオス需要予測と水運用

第1図に水道のシステムと水運用の関係を示す。水は水源と呼ばれるダムや河川などから、取水場・浄水場・配水場など、水道のシステムを構成する様々な施設を経由して、きれいで安心して飲むことができる水道水となり、各家庭に供給されている。水道のシステム全体を考えて水道の各施設を制御し、水をコントロールすることを水運用という。

水道の中核となる浄水場では、化学反応や物理作用を利用して水を浄化している。その処理には数時間を要し、さらに移送のための時間が要る。特に大都市圏では水源から市街地までの距離が離れているため、より多くの時間が必要である。このように水道水は、その製造と運搬のために長い時間が必要であり、その時間は制御上の時間遅れとなる。それらを適切に制御するためには、時間遅れの影響を受けないように、今後の使用量を予測する需要予測の機能が求められる。効率的な運転や安定した制御を実現する水運用には、精度の高い需要予測の技術が欠かせない。

当社は、通称ミニコンと呼ばれたコンピュータを利用した監視制御システムの黎明期から水道のシステム構築に関わってきた。当時から水運用の需要予測は重要な機能で、計算方法は統計手法を中心としたモデルを使用し、毎朝決まった時間に1日の配水量を予測する。



第1図 水道のシステムと水運用の関係

水道システムは、水源から様々な施設を経由して水道水を供給している。水道の施設全体を制御することを水運用という。

しかし、統計手法で予測を行うためには、予測に必要な情報として天気予報・最高気温の予測などの情報をオペレータが入力する必要があった。さらに情報から予測モデルを構築するためにパラメータをチューニングする必要があり、大きな労力が必要だった。また、1日に1回の予測では、大まかな運転の支援装置としては有効であったが、リアルタイムの制御として直接組み込むには予測周期が長過ぎるという問題があった。自動制御のシステムを構築するためには、配水状況が変化した場合に遅延なく対応できるように、1時間程度の周期で予測を行うシステムが必要だった。当時の水運用はまだ自動制御ではなかったが、ベテランのオペレータを水運用支援装置がサポートして施設を制御していた。

その後、1980年代に入りタケンスなどの研究者によってカオス理論の有用性が明らかになると、当社も需要予測・故障判定などへの適用の可能性を探るためにカオス理論の研究を進めてきた。ここで紹介するカオス理論を使ったカオス水需要予測は、その研究成果によるものである。

カオス水需要予測の最大の特長は予測精度の高さであるが、ほかにも以下のようなメリットが挙げられる。

- (1) 予測は1時間周期に行い、常に最新の予測結果を提供
- (2) 天候・気温など、オペレータによる情報入力が必要
- (3) 予測アルゴリズムのチューニングが必要

カオス水需要予測では、必要な情報が監視制御装置内ですべて入手できるため、データが更新されるたびに、常に新しいデータから最新の予測が得られる。配水状況が急変した場合でも、遅延なく予測が追従するリアルタイムの予測システムを構築できる。第1表に従来からの統計的手法とカオス需要予測の比較を示す。

## 3 水道の使用量とカオス

水の使用量は本来、個人レベルや家庭レベルで

**第 1 表 カオス需要予測と従来法との比較**

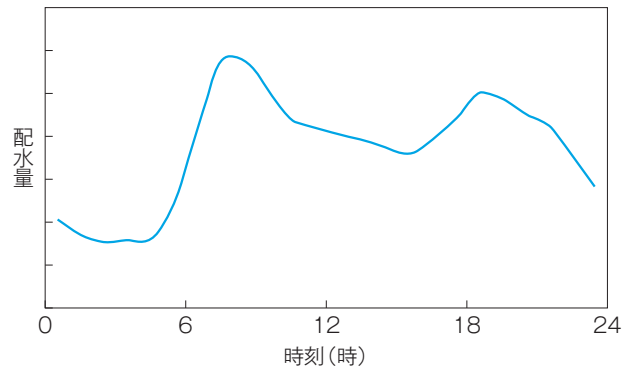
カオス水需要予測の最大の特長は予測精度の高さであるが、ほかにも入力不要・リアルタイムに対応した予測・メンテナンスが容易などの特長がある。

	カオス需要予測	従来法の予測
予測の基本原理	非線形データに対応 カオス理論で予測	線形データに対応 統計手法で予測
基本の予測時間	1時間	1日
時間予測の求め方	1時間ごとに予測	1日の予測を時間パターンに当てはめて求める
日予測の求め方	1時間の予測を24時間分積算する	1日ごとに予測
予測の調整	チューニング不要	開始時にチューニングが必要 精度が下がれば再チューニングが必要

は拘束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。しかし、水を使うという行動は、水を飲む・手を洗う・食事を作る・風呂に入るなど、その背景には水を使う何らかの理由があるはずであり、その理由に関連して、個々の「水を使う」という状態と「水を使わない」という状態の単純な変化が積み重なって、水道全体として配水量となっている。このような配水量の特性は、いわゆる複雑系を形成していると考えられる。ここでの複雑系の定義は「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であるもの」という定義による。カオスの技術はこのような複雑系の予測を得意とする技術であり、水道において高精度の予測を提供できる理由である。

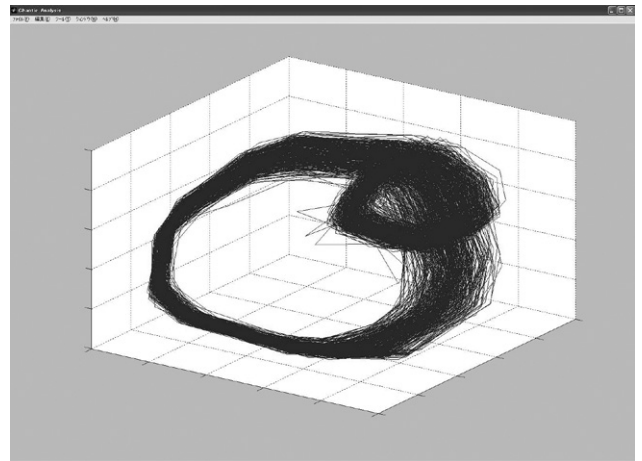
水道の使用状態を時間的・空間的に積算したものが配水量となる。水道事業者では1時間に使われた使用量を時間配水量とし、時間配水量を1日分集計した配水日報を水運用の基礎データとしている場合が多い。第2図に1日(24時間)の配水量の変化の様子を示す。1日の中で配水量は大きく変動している。配水量は変化の大きい非線形のデータである。

カオス理論による予測を行うために、実際の配水量のデータを、カオスの技術を使える状態空間



**第 2 図 1日(24時間)の配水量の変化**

配水量は1日の中で大きく変動していることが分かる。日によって異なるが、深夜から早朝にかけて最小となり、朝と夕に2つのピークを持つ曲線を描く。

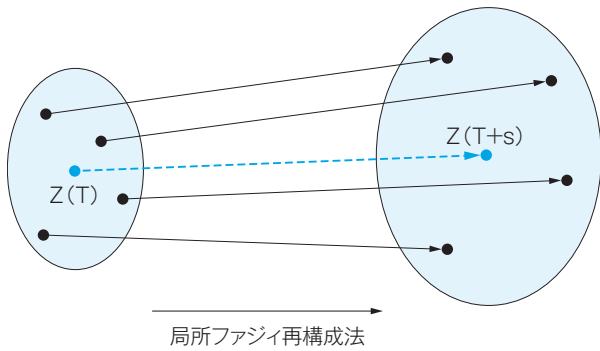


**第 3 図 埋め込まれた配水量のデータ**

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と呼ばれる特殊な図形を描いている。

上へ変換する埋め込みという操作を行う。第3図に埋め込まれた配水量のデータを示す。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と呼ばれる特殊な図形を描いている。ストレンジアトラクタはカオス性のあるデータの軌道を3次元空間で図示したものであり、その形状は複雑に線が折り重なりながら、全体としてはドーナツをひねったようにも思える独特の形状を示している。

予測の計算は、このストレンジアトラクタの持つ特徴を生かして求める。第4図に予測計算の概念図を示す。予測するということは、未来のデータを求めることになる。そこで、最新データ



第4図 予測計算の概念図

ストレンジアトラクタ上の最新データ点 $Z(T)$ に注目する。 $Z(T)$ の近傍データの軌跡から $Z(T+s)$ を求め、需要予測の計算を行う。この計算方法が局所ファジィ再構成法である。

の配水量をストレンジアトラクタ上に埋め込んだ点 $Z(T)$ に注目する。 $Z(T)$ の近傍にあるデータは実際の時間では過去のデータであり、ストレンジアトラクタ上での軌道が判明しているため、その軌道からファジィ関数で $Z(T) \rightarrow Z(T+s)$ の描く軌道を計算する。描いた軌道を実際の配水量に復元することで、需要予測の結果を求める。この方法を局所ファジィ再構成法という。

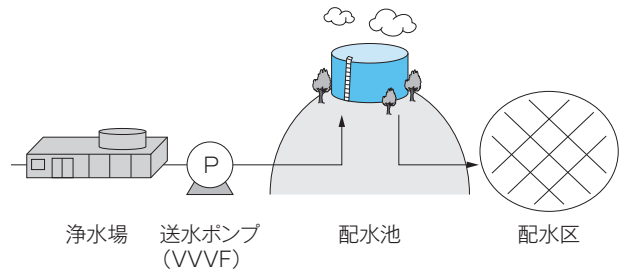
## 4 カオス水需要予測技術を使用した水運用自動化システム

入力が必要で、リアルタイムの予測が可能というカオス水需要予測技術の特長を生かし、水運用の自動制御システムを構築できる。これが水運用自動化システムである。

水運用を行っている水道システムから、一部を切り出したモデルを第5図に示し、水運用自動化システムの基本的な機能を紹介します。

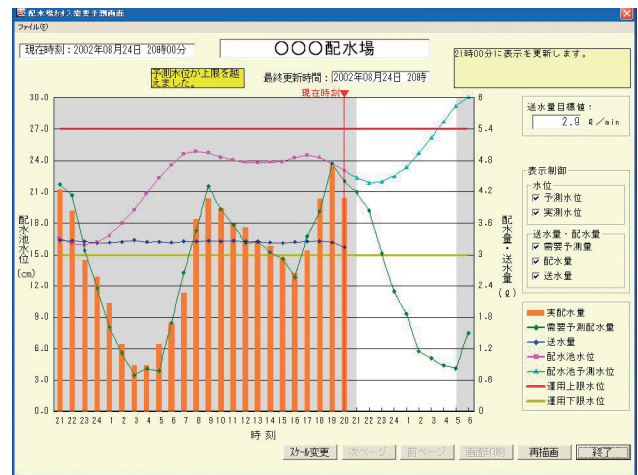
この水道モデルは最もシンプルな構成で、浄水場からは1系統の送水ポンプで高台の配水池に送水している。配水池からは自然流下で単一の配水区に配水している。送水ポンプは可変速ポンプであり流量は回転数で調整できる。流量の目標は水運用自動化システムから出力する。

第6図に水運用自動化システムの画面を示す。水運用自動化システムの運用方法は、以下のとおりきわめてシンプルである。



第5図 水道のモデル

浄水場からは可変速の送水ポンプで配水池に送水し、配水池からは自然流下で配水区に配水している。これらの水運用自動化システムで制御する。



第6図 水運用自動化システムの画面

水運用自動化システムの画面はトレンドグラフ形式を採用し、過去データ24時間と未来の予測データ10時間分構成されている。

- (1) 配水量の予測は、カオス需要予測を使い配水区ごとに行う。
- (2) 水量の変動分は、配水池水位を上下させて吸収する。
- (3) 送水・浄水・導水・取水のプロセスは、一定の水量で運転することを基本とする。

この画面では、流量に関する情報と水位に関する情報を表示できる。データは表示・非表示の切り替えが可能だが、ここでは説明のために全てのグラフを表示している。横軸は時間軸で、左側から24時間分は過去のデータを、右側の10時間分は未来のデータを示す。本装置はリアルタイムの需要予測結果から未来の水位を予測し、運用範囲を逸脱しそうな場合には送水量を変更する。

配水量の実績は棒グラフで24時間分を示す。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。さらに、ほとんど一定で安定した値を示している折れ線グラフが送水量である。画面の上方で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であり、右側は予測水位となる。水位の上下を挟む2本の直線が運用範囲を示している。水位は、配水量の変動分を吸収して緩やかに変化しながらも、運用範囲内に正しく収まっている。

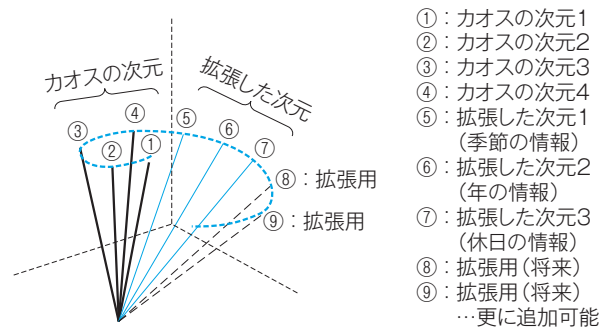
制御は予測水位が運用範囲を超えている場合に、送水量の目標を変更することで行う。今現在の水位は運用範囲内に入っているが、予測水位では8時間後に運用範囲を上方に超えている。そのため実際の水位が逸脱しないように送水量の目標を少し減らす。現時点では安定した状況と見える場合でも、予測配水量・予測水位を利用することで、未来に起こる状況を予見して対応できる。その結果、水量の変動を極力抑え穏やかで安定した制御を実現することができる。

## 5 情報統合型カオス需要予測技術の開発

ここで紹介したカオス水需要予測技術とその技術を展開した水運用自動化システムを多くの水道事業体に納入し、水運用の支援や自動制御装置として、省エネルギー・電力料金の削減・省力化などの面で成果を上げてきた。

今後、より一層の貢献を果たすためには、予測精度の向上が重要である。特に、水道の広域化に伴う浄水場間の連携を行う場合や、太陽光発電やマイクログリッドなどの供給能力に制限のあるシステムとの連携を進める場合などでは、1日24時間の運転計画が重要となってくる。カオス需要予測が元々備えている高精度の時間予測に加えて、1日24時間の予測精度を高める方法を検討した。

近年の情報通信技術（ICT）の進歩で監視制御装置の機能が向上し、様々な情報をリアルタイムで収集可能となっている。それら膨大な情報いわゆるビッグデータの中から有用な情報を引き出し、カオス理論と連携することで精度向上の実現を図る。



第7図 カオス次元の拡張イメージ

配水量を埋め込んだカオスの次元に、季節の情報・年の情報・休日の情報を加え、予測に使用する次元を拡張している。

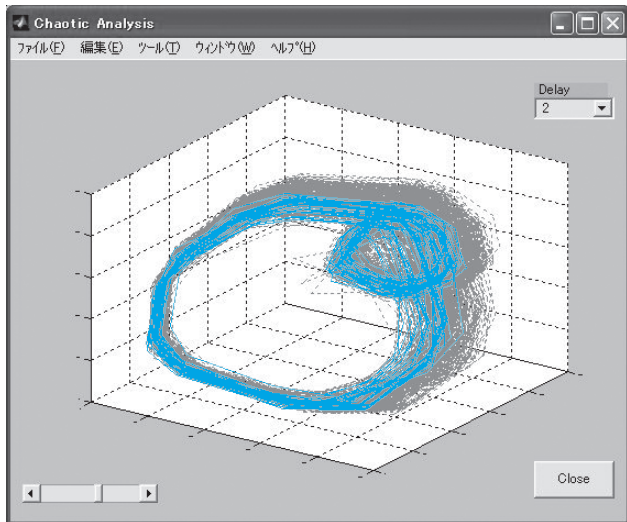
開発のコンセプトは、以下のとおりである。

- (1) 開発目標は予測精度の向上、特に1日24時間の精度向上を目指す。
- (2) カオス需要予測の持つ、入力不要・自動制御可能などの特長はそのまま生かす。
- (3) 監視制御装置に集まるデータを活用し、カオス技術との連携を図る。

次に情報統合型カオス需要予測技術の概要を示す。開発における最大のポイントは、カオス次元の拡張にある。第7図にカオス次元の拡張イメージを示す。様々な情報をカオス技術と融合させるためにカオスの次元を拡張した。ここでは基本となる4つのカオス次元に3つの情報、例えば、季節の情報・年の情報・休日の情報を加え、合計で7次元とした拡張イメージを示している。

元のカオス次元とともに拡張した次元も使い、ストレンジアトラクタを生成する。配水量を埋め込んだカオスの次元に、3つの情報の次元を加え、全体のストレンジアトラクタから、選択するストレンジアトラクタを分離した。この方法によって分離したストレンジアトラクタのイメージを第8図に示す。データの全体集合の中から近傍データを選択する場合に、拡張された次元で分離したストレンジアトラクタの選択確率を高めることで、予測精度の向上を図る。

基本形のカオス需要予測でも、元々ダイナミクスに含まれる、季節・年・休日などの情報を反映した選択がなされている。しかし、比較的長時間の予測を行う場合にはストレンジアトラクタから



第8図 次元拡張により分離されたストレンジアトラクタ

拡張した次元を使用し、全体のストレンジアトラクタから選択するストレンジアトラクタを分離している。

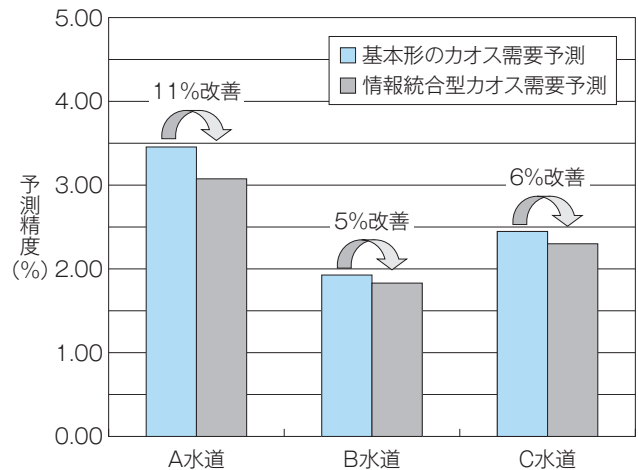
の選択機能が十分でない場合があり、誤差が大きくなることがある。その解決策として、必要な情報を拡張次元として組み込み、予測精度の向上を実現した。

実際の選択では、ファジィ関数を用いた柔軟な計算を行っている。そのため、分離されるデータ間の境界はなだらかであり、ここに図示しているように明確に分離されているわけではない。ストレンジアトラクタから適切なデータを選択するというアルゴリズムの良さは生かしたままで、より最適な選択となるように情報を反映させている。

情報統合型カオス需要予測の機能を確認するために、実際の配水量で予測精度を検証した。対照には基本形のカオス需要予測を使用し、1日24時間の合計配水量で評価した。配水量のデータは3つの水道事業体の配水量データ、それぞれ期間は異なるが約3年間のデータでストレンジアトラクタを生成し、その後の1年間のデータで評価した。各日の予測精度は以下に示す式で計算した。日の予測精度の絶対値を1年間平均し、年間の予測精度として検証した。

$$(\text{実配水量} - \text{予測配水量}) / \text{実配水量} \times 100 (\%)$$

第9図に情報統合型カオス需要予測を使った場合の予測精度改善効果を示す。予測精度は3つ



第9図 情報統合型カオス需要予測を使った予測精度の改善

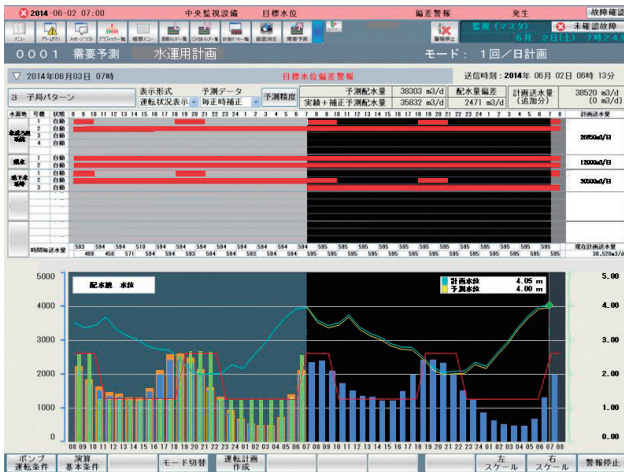
実際の配水量データを使用し、情報統合型カオス需要予測の予測精度改善効果を確認した。改善の度合いは5～11%で全ての事例で効果があった。

のケース全てで改善し、改善の比率は5～11%であった。この数値は小さいようにも見えるが、ここでは3つの情報を加えただけで、すでに効果があることを示している。さらに、基本形のカオス需要予測が既に高い精度を出している状況をベースとしており、今回開発した情報統合型カオス需要予測によって、更に精度が向上したことが分かる。

情報統合型カオス需要予測の水運用での効果を検討するために、シミュレーションを行った。水道のモデルは、第5図に示したシンプルな水道モデルを使用し、ポンプは固定速として台数で制御した。効果は制御の安定性で評価し、ポンプの起動回数が少ない方を有効な予測方法と判定した。同時に、水位の逸脱など他の問題がないことも確認し、トータルで予測制御の有効性を検証した。

1年間のポンプ起動回数では、情報統合型カオス需要予測が408回、基本形が459回となり、起動回数が11%削減された。どちらの場合も水位の逸脱などの水運用の問題は発生しなかった。情報統合型カオス需要予測による精度の向上は、制御の安定性を高め、水運用自動化システムの機能を向上できることを確認した。

第10図に情報統合型カオス需要予測による水運用計画画面の例を示す。1日24時間の予測精度が向上したため、標準として予測時間を2倍強の



第10図 情報統合型カオス需要予測による水運用計画画面

情報統合型カオス需要予測を生かした水運用計画画面の例を示す。短期から長期までの予測精度が向上したため、標準設定で未来の予測データを24時間に拡張している。

24時間に延長した。併せて制御の機能も改良し、送水量の目標を出力するだけでなく、ポンプのスケジュールなどの運転計画機能に対応した。近年の広域化される水道に必要な長期の計画立案が容易となるため、より広い範囲で多くの施設と協調した運転計画が立てやすくなる。施設単独や系統単位の効率的運用から、連携する水道システム全体の効率的運用にレベルアップすることができる。

## 6 むすび

水道のシステムを効率的に運用するための水運用の高度化を目指した情報統合型カオス需要予測の開発について紹介した。監視装置に集まる膨大な情報に着目し、配水量に関連するデータをカオス理論に柔軟に取り込み、予測精度の向上を実現した。

本稿では、情報統合型カオス需要予測で3つの情報を加えることで予測精度の改善を確認した。開発の成果として、省力化を実現する安定した制御、機器寿命を延ばす制御回数の削減、運転コストを削減する効率的運用方法などが実現できることを示した。

今回、3つの水道事業者のデータに共通の情報を加えた結果を示したが、水道は本来、地域の特色・気候・地勢、また生活習慣などの条件で配水状況が変化していると考えられる。水道事業者ごとに必要な情報を統合した予測システムを実現することで、更に高精度の予測が可能となる。各事業体に合わせたテーラーメイドの水運用自動化システムとして、今後一層の水運用技術の向上を目指していく。

日本の水道は、安定した給水とそのまま飲用できる水質に代表されるように、世界のトップレベルを維持しているが、未来に向かい多くの課題もある。例えば、人口減少に伴う問題や更新時期を迎えた設備の機能確保、ベテラン職員の引退に伴う技術継承、そして災害対策などである。どれも安全で安心できる水道を供給し続けるためには大きなハードルではあるが、当社が培ってきた電気設備・監視制御・維持管理分野を中心とする多くの経験を財産として、新しくなった水運用自動化システムにあらゆる情報を統合し、より良い水道システムを実現することに貢献していく。

進歩を続けるカオスの技術であるが、初期の納入時にはカオスという単語をはじめとして、まだ一般的とは言えない技術であった。難解とも思える説明をご理解いただいた上で水運用自動化システムとしてご採用いただき、日々の水運用としてご使用いただいている水道事業者の方々に、この紙面を借りて感謝の意を表す次第である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

### 《執筆者紹介》



大島 信夫  
Nobuo Oshima

水・環境事業部技術部  
上下水道システムの企画・開発・設計に従事