

## 〈研究発表〉

### 環境負荷低減型水運用計画システムの開発

廣政 透<sup>1)</sup>, 今井 美希<sup>2)</sup>, 田所 秀之<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(株)日立製作所 インフラシステム社 社会システム事業部 (〒101-8608 東京都千代田区外神田 1-18-13,  
E-mail: toru.hiromasa.ad@hitachi.com)

<sup>2)</sup>(株)日立製作所 インフラシステム社 情報制御システム事業部 (〒319-1293 茨城県日立市大みか町 5-2-1,  
E-mail: miki.imai.zs@hitachi.com, hideyuki.tadokoro.dw@hitachi.com)

#### 概要

近年、環境問題への関心の高まりから、水道事業者においても水の安定供給を満たしつつ、環境負荷を低減することが求められている。水の安定供給と環境負荷低減策はトレードオフの関係になり得るといふ難しさがある。この解決策として、本開発ではトレードオフ関係にある水の安定供給と環境負荷低減のバランスを調整することで、水の安定供給を満たしつつ環境負荷を実現する環境負荷低減型水運用計画システムを開発した。そして、本システムを大規模な仮想水系への適用実験を行い、その有用性を示唆した。

キーワード: 水運用、環境負荷、省エネルギー、トレードオフ

#### 1. はじめに

近年、環境問題への関心が高まっており、温室効果ガスの削減など環境配慮が喫緊の課題となっている。水道事業者も例外ではなく、環境負荷の低減が求められている。水道事業は水輸送でのポンプ動力などエネルギー消費も多く、電力使用量は全国の総電力使用量の0.86% (2006年度)<sup>1)</sup>を占めている。そのため、高効率機器や新エネルギーの導入などのエネルギー対策が多くの水道事業者で実施されている。

上記のような機器単位での取り組みに加えて、水道施設の連携を考慮した体系的なアプローチも省エネルギーに有効である。そのアプローチの1つである、水輸送を統合的に管理する水運用計画システムは、需要予測に基づく過不足ない量の浄水・輸送や、需要の時間変動を吸収するバッファとしての配水池の活用等により従来から効率的な運転に貢献してきた。

環境負荷低減を考慮した水運用を実現するには、水の安定供給と環境負荷低減がトレードオフになり得るといふ難しさがある。本報告では、トレードオフの関係にある水の安定供給と環境負荷低減のバランス調整を可能にした環境負荷低減型水運用計画システムの開発について述べる。

#### 2. 従来型水運用計画システム

水運用計画システムの目的は水道施設全体として安定的、効率的な水のコントロールを行うことである。広域の監視制御システムとして取水所、浄水場、ポン

プ施設、配水池、主要な送水路の施設を管理対象とし、各施設から流量や水位の計測情報を監視し、また逆に各施設へと制御の目標値を配信する(Fig.1)。

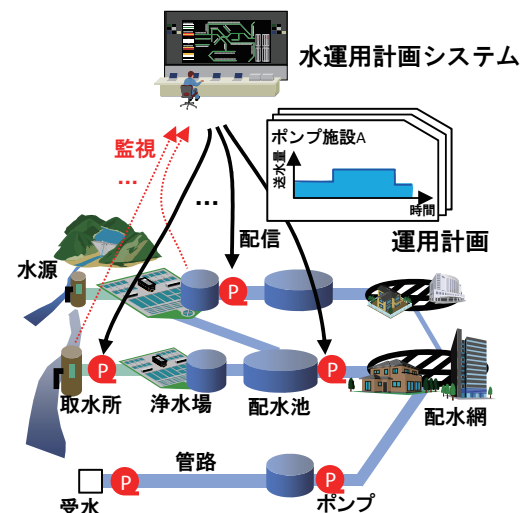


Fig.1: A water supply scheduling system and waterworks facilities

運用計画とは導・送水路の取水量・送水量、配水池の水位、ポンプの運転パターン等からなる全施設の運転計画である。日に数回程度の頻度で定期的に、立案時点から先数日分にあたる計画を運転前に予め立案する。各施設へは運用計画のうち当該施設に関する制御量の目標値が送信され、施設運転の指針となる。

運用計画の立案では、天候等の情報から配水区ごとの需要量を予測し、施設能力や各種運用方針に基づいて需要を満足するよう水の配分を計画して運用計画とする。

水運用計画システムでは、各種施設の連携を考慮し

た計画を立案できる。このため個々の施設、設備の効率向上に加えて、施設の適切な連携運用によって全体として効率化を図るシステム的なアプローチをとることができる。

### 3. 環境負荷低減型水運用計画システム

#### 3.1 環境負荷低減型水運用計画システムの開発背景

水運用計画システムにおいて考慮する環境負荷として、導送配水ポンプの消費エネルギーが挙げられる。水運用の観点から導送配水ポンプの消費エネルギー量を削減するためには、導送配水に要するエネルギーが大きい経路をできるだけ回避することが重要となる。しかしながら、水の安定供給という観点から、各水源からの取水量バランスを保たなければならないという制約がある。このため、省エネルギーを実現するために、単にエネルギー消費の大きい経路を回避すれば良いというわけにはいかず、水の安定供給を保つことを考慮した上で省エネルギー化を図る必要がある。このとき、省エネルギーと水の安定供給がトレードオフの関係になり得るといふ難しさがある。

上記を踏まえて、省エネルギーと水の安定供給のバランスを調整することが可能な環境負荷低減型水運用計画システムを開発した。本システムの機能構成を Fig.2 に示す。

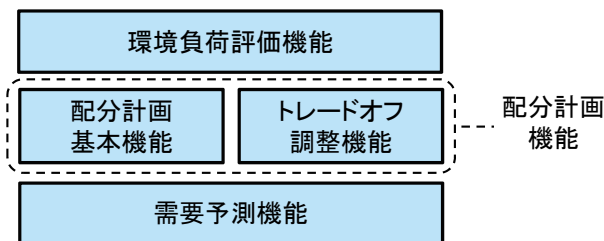


Fig.2: Diagram of functional blocks of the environmental load-reducing water supply scheduling system

#### 3.2 環境負荷低減型水運用計画システムの機能

##### 3.2.1 配分計画機能

###### 3.2.1.1 配分計画基本機能

配分計画では、需要予測に基づき、配水池のバッファ能力を活用して適切な運用計画を立案することを目的として、需要予測や計画時点の運転情報に基づいて運用可能な計画を計算する。

立案の際、ポンプ施設などの効率的な運転を考慮した計画を選ぶ計算を行う。ただ、運用計画は全施設の連携による運転を定めるものであり、個々の施設の事情、効率化に注力しすぎるとは他の施設の運転に無理を生じさせる。例えば、末端の配水池運用を効率化しすぎると浄水場の運用に支障をきたす計画となる可能性もある。そこで個々の施設の運用調整と、導送水

系全体の大域的な運用調整を行う計算手法を組み合わせることで、双方のバランスをとる計算プロセスとなっている。以下、2つの運用調整の計算手法について説明する。

##### 3.2.1.2 個々の施設の運用調整

目的は、配水池バッファ能力を活用し、個々の施設の運転に適した流入出力を選択することである。

例えば、配水池への流入量は、流出量（需要量）の時間変動を配水池の水位変動として吸収し、ポンプ効率が良く、かつ施設負荷となる切替え回数が少なくなるよう選択されることが望ましい。

QRS (Quasi-optimal Routing System : 準最適化法) では、準最適な折れ線を選択を行うことで、施設運転に適した流入量を算出する。概念図を Fig.3 に示す。

配水池からの見積み流出量(需要量)を計画時点からの累計に換算する。すると常に水位を上限、あるいは下限での運用に要する累積流入量を算出できる。両者の作るバンド内（運用貯水幅）を通る累積流入量を選べば、水位が上下限を守る運用となる。バンド内の折れ線（累積流入量）の傾きが流入量、傾きの変化が流入量の切替えに対応する。

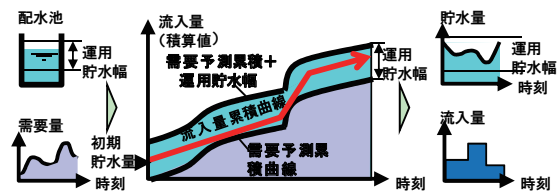


Fig.3: Scheduling process for reservoirs (QRS: Quasi-optimal Routing System)

##### 3.2.1.3 大域的な運用調整

目的は、導送水系全体を考えて施設間でのバランスをとることである。大域的な運用調整が必要となる例として、あるポンプ場で運転効率化を図ったために、上流配水池で水位の上下限違反が生じた場合などが挙げられる。

従来の水運用計画システムでは、多層ネットワークモデルを用いた最適化手法<sup>2)</sup>を用いて大域的な運用調整を行っている。この手法について説明する。前時刻の配水池の貯水量に流入量と流出量の差が反映されたものが現時刻の貯水量となる関係を用いて、計画期間の導送水系の流れを一つのネットワークとしてモデル化する。管路の流量や配水池貯水量の上下限違反に対してペナルティを設定し、その総和が最小となる流れを算出して調整の結果とする。概念図を Fig.4 に示す。

今回開発の環境負荷低減型水運用計画システムでは、環境負荷を考慮するため、従来の多層ネットワークモデルによって設定した変数に対し、水系全体での総消費エネルギー量を代表とする複数の目的関数を設定し、流量を決定関数とした多目的最適化計算を行う。

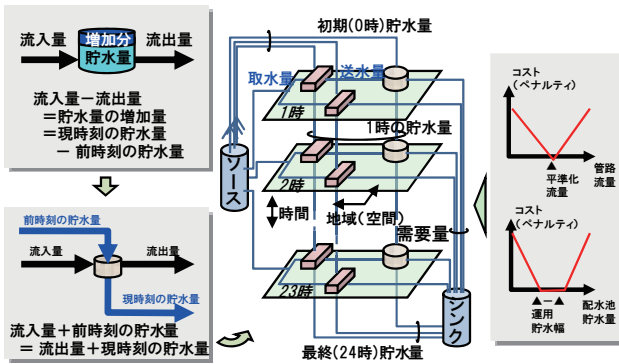


Fig. 4: Scheduling process for global adjustment (Multilayer network model)

3.2.1.2 トレードオフ調整機能 (多目的最適化計算)

トレードオフ調整機能では、環境負荷低減と安定的な施設運用 (安定性) とのトレードオフ調整の支援を行う。

水運用計画における安定的な施設運用には次の観点が挙げられる。複数の水源がある場合、水利権や受水契約を遵守しつつ、水の安定供給の観点から特定の水源に偏らない取水・受水が求められる。また、需要量の時間変化を配水池のバッファ能力で吸収し、浄水や導送水に関わる設備で運転状態をなるべく一定に保つこと (平準化) も重要である。

この安定的な施設運用とポンプ消費エネルギー量の削減による環境負荷低減策は、相反する関係になり得るケースがある。例えば、ポンプ消費エネルギー量を削減するために、自然流下水源からの取水割合を大きくすることは、特定の水源に頼った運転を意味する。

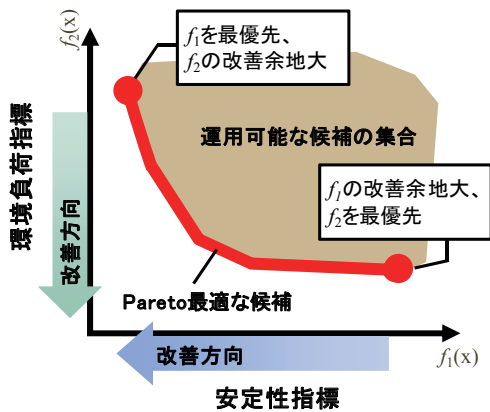


Fig. 5: Pareto optimum candidates for trade-offs between stability of operations and environmental load reduction

そのため、環境負荷低減策を実現するには安定的な施設運用とのバランスを考慮する必要がある。相反する目標のバランス調整には、改善余地の見落としや意思反映の困難さが付きまとう。そこで、安定的な施設運用を表す指標を安定性指標、水系全体での総ポンプ消費エネルギー量を環境負荷指標とし、それぞれの

指標を目的関数として同時に最小化する多目的最適化問題として定式化を行った。このアプローチにより「Pareto 最適」と呼ばれる適切な候補 (これ以上同時に最小化できない解の候補) のみを操作者に提示し、その候補の中から対話的な操作形式によって、その候補の中から計画値の選択の支援を実現した。Pareto 最適な候補の例を Fig.5 に示す。

3.2.2 環境負荷評価機能

3.2.2.1 概要

環境負荷評価機能では、配分計画機能で立案した計画に対して、環境負荷量を見積り、環境負荷の観点から計画を支援する。環境負荷量の見積りを提示することにより、操作者にとって、環境負荷の観点からの運用の効率性を計画立案フェーズで比較出来るというメリットがある。

評価の手法としては、各施設における導送水量と消費エネルギー量の関係 (ポンプ消費エネルギー特性) に、導送水量の運用計画値を当てはめることで、消費エネルギー量を見積もる。なお、消費エネルギー量のCO<sub>2</sub>発生量への変換も可能である。消費エネルギー量を見積もる際に必要となる導送水量と消費エネルギー量の関係は、収集・蓄積された運転実績から作成 (モデル化) する。詳細については 3.2.2.2 に記載する。

3.2.2.2 ポンプ消費エネルギー特性モデル化

ポンプ消費エネルギー特性には、非線形性や台数切換時のヒステリシス性という特徴がある。これに対して、環境負荷評価機能においては、ポンプ消費エネルギー特性を凸区分線形関数で表現したモデルを用いる。凸区分線形関数で表現したモデルの例を Fig.6 に示す。ポンプ消費エネルギー特性を凸区分線形関数で表現したモデルを利用する理由は、線形計画問題として扱うことにより、高速に計算結果を算出することができるからである。

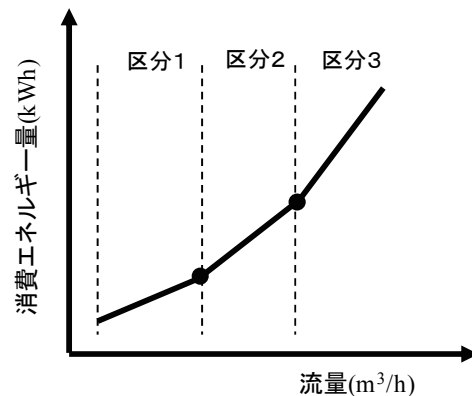


Fig. 6: Convex division linear function of relation between pump consumption energy and flow

また、ポンプ消費エネルギー特性は、ポンプの経年

劣化により変化する。そのため、時間が経つにつれてモデルの精度が低下することから、最新の運用実績値を用いてモデルの更新をする必要がある。今回開発の環境負荷低減型水運用計画システムでは、実績値とモデルの誤差率を把握可能とし、モデルの更新を可能とした。モデル更新のタイミングは、ある一定期間毎あるいはある一定の誤差率を超えた際に自動で行うことが可能である。

#### 4. 仮想水系への適用

今回開発した水運用計画システムを用いて、仮想的なケースへの適用実験を行った。これまでの報告<sup>3)</sup>では、仮想水系として小規模な水系を用い、安定性指標及び環境負荷指標を各々1つずつとしたケースのものであった。本報告では、仮想水系として大規模な水系を用い、安定性指標を2つ、環境負荷指標を1つとして、適用実験を行った。

仮想水系の施設数は以下の表1の通りとした。5つの水源を、仮にA、B、C、D、Eとすると、それらのうちAは受水量一定の制約がある水源、Bは取水にポンプを必要とする水源、C、D、Eはそれらの条件のない水源とした。

表1 仮想水系の施設数

水源	配水池	管路
5	27	120(3)

管路の0内はポンプを有する管路数で内数

適用実験において、環境負荷指標を水系全体での消費エネルギー量とした。安定性指標は2つ設定し、ひとつは特定水源からの積算取水量、もうひとつは、配水池へ流入する特定管路の積算流量とした。なお、特定水源は、取水にポンプを必要としない3つの水源のC、D、Eのうち可能取水量が最も多い水源とし、特定管路は、ポンプありの流入管路とポンプなしの流入管路を有する配水池の内、ポンプがない流入管路とした。

適用実験の結果を Fig.7 に示す。縦軸を環境負荷指標である水系全体での消費エネルギー量、横軸を2つの安定性指標のうちの1つである特定水源からの積算取水量とし、もう1つの安定性指標の特定管路の積算流量については、プロットの形によって区別した。Fig.7 の結果は、水系全体での消費エネルギー量に対して、安定性指標の特定水源からの積算取水量と特定管路の積算取水量が、それぞれトレードオフの関係になっていることが確認できる。このことから、適用実験によって得られた複数の解は Pareto 最適解とな

っている。操作者は、これら複数の解から運用条件に合わせて運用計画値を選択することが可能である。

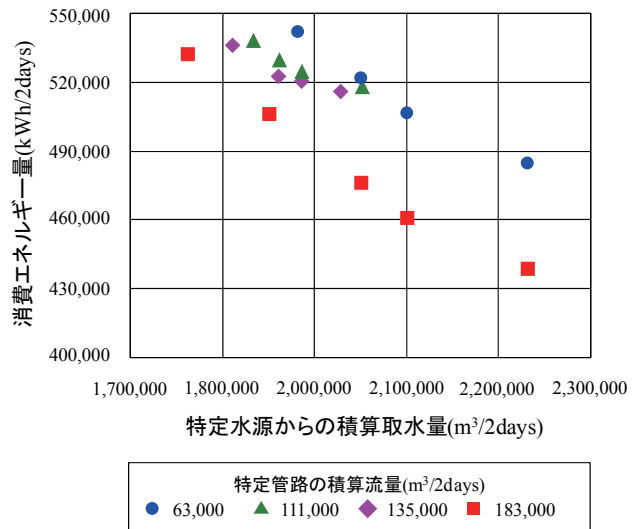


Fig.7: Convex division linear function of energy consumption property against flow

#### 5 おわりに

本報告では、今回開発した、トレードオフ関係にある水の安定供給という安定性と省エネルギーのバランスを調整する機能を持つ環境負荷低減型水運用計画システムを紹介した。本システムは、従来の水運用計画システムにトレードオフ調整機能と環境負荷評価機能を追加することで実現した。環境負荷評価機能では、ポンプ消費エネルギー量を見積もる際に必要となるポンプ消費エネルギー特性のモデルを作成する機能も実装した。

本システムを仮想水系に適用した結果から、環境負荷指標と安定性指標の組み合わせを複数設定した際にも有効であることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課：水道事業における環境対策の手引書（改訂版）（2009）
- 2) 栗栖宏充、西谷卓史、舘仁平、安達弘：数理計画法とヒューリスティック法を組み合わせた動的配分計画技法の上水道運用計画問題への適用，計測自動制御学会，第30巻，2号，pp.198-307（1994）
- 3) 河原林雅、足立進吾、高橋信補、田所秀之：ポンプエネルギー特性を考慮した環境負荷低減型水運用計画の立案，第62回水道研究発表会（2011）