

〈研究発表〉

環境負荷と安定性に配慮した水運用計画システムの開発

足立 進吾¹⁾, 今井 美希²⁾, 田所 秀之²⁾

¹⁾ (株)日立製作所 システム開発研究所 (〒244-0817 横浜市戸塚区吉田町 292, E-mail: shingo.adachi.fc@hitachi.com)

²⁾ (株)日立製作所 情報制御システム社 (〒319-1293 日立市大みか町 5-2-1,

E-mail: miki.imai.zs@hitachi.com, hideyuki.tadokoro.dw@hitachi.com)

概要

水道事業による環境負荷では送水ポンプ消費エネルギーなど水輸送に関わる負荷が大きな割合を占める。そこで水運用計画システムによる環境負荷の考慮を検討してきた。環境負荷の低減策は安定的な施設運転とトレードオフの関係にあるため、双方に配慮したシステムを考案し、中核ソフトウェアを開発した。特長として、環境負荷の観点から立案した計画を評価・分析する機能と、安定性に配慮しつつ環境負荷の最小化を支援する機能とを備える。水輸送に関わる環境負荷について把握・分析から運用の最適化まで活用できる構成となっている。

キーワード: 水運用計画, 環境負荷, 省エネルギー, 評価・分析, トレードオフ

1. はじめに

気候変動などの環境問題が近年注目を集め、温室効果ガスの削減を中心とした環境配慮が喫緊の課題となってきた。水道事業においても計画的な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)¹⁾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、の事業体で実施されている。

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。この報告では、水運用計画システムによる環境負荷の考慮の検討を述べ、開発したシステムの中核ソフトウェアについて紹介する。

2. はじめに

2.1 水運用計画システム

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浄水場、取水所、ポンプ施設、配水池、主要な送水路などの施設を管理対象とし、各施設から流量や水位などの計測情報を収集し、逆に各施設へと制御の目標値を送信する (Fig.1)。

運用計画とは主要な導・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。日に数回の頻度等で定期的に、

立案時点から先数日分にわ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。

2.2 環境負荷を考慮した水運用計画システム

水運用計画システムによる考慮の対象として、導送水に要する消費エネルギーがある。また、降雨による

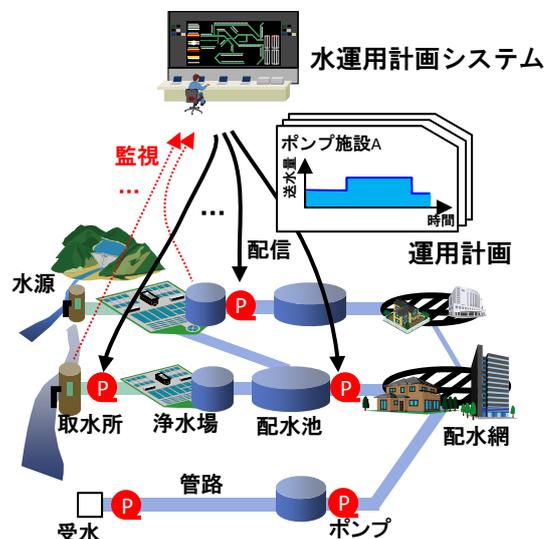


Fig.1: A water distribution scheduling system and water works facilities

河川原水の濁度上昇時に取水を抑える高濁時ピークカットを考慮することで、浄水汚泥の発生量削減へも寄与出来る。

環境負荷の考慮として、次の2段階があると考えられる。

- ① 各施設で効率的な運転が可能な計画を立案する。例えば、ポンプ施設で定格流量による台数運転など効率の高い運転条件となるようにする。
- ② 相対的に効率の高い施設の稼働率を上げた計画を立案する。例えば自然流下で送水出来る高標高の浄水場を優先的に用いる。

上記の①の段階は各施設の制御量を適切に選択することに帰着する。一方、②の段階には、次の2つ課題がある。課題1に各施設の効率を把握した上でどのような運用が効率的か比較できることが前提となる。また課題2に環境負荷の低減が安定的な施設運用と相反する側面を持ち、トレードオフ調整の手段が必要である。

以上を踏まえて、環境負荷と安定性に配慮した水運用計画システムを考案し、中核ソフトウェアを開発した。次項より、開発システムの概要と、特徴的な機能について順に報告する。

2.3 開発システムの概要

水運用計画システムによる環境負荷の考慮には、先に2.2目で述べた通りいくつかの段階や課題がある。そこで段階的な利用を想定して以下に述べるように機能を区分したソフトウェアを開発することとした。

- i. 配分計画の基本機能にて、各施設での効率的な運転を考慮する（段階①）
- ii. 環境負荷の評価機能として、立案した計画での運転の環境負荷量を見積り、評価分析する（段階②の課題1）
- iii. 配分計画の拡張機能として、基本機能に加えて環境負荷の低減と安定的な施設運用とのトレードオフ調整を支援する（段階②の課題2）

上記区分に基づいた開発システム中核ソフトウェアの機能構成をFig.2に示す。区分に基づく3つの機能と、計画立案の前提となる需要の予測機能からなる。

次項以降にて、区分で挙げた3つの機能について順に取り上げて説明する。

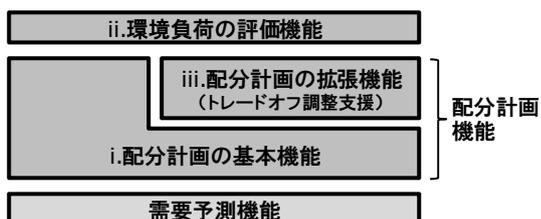


Fig.2: Diagram of functional blocks of the developed software

3. 配分計画の基本機能

3.1 概要

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。基本機能では、需要予測や計画時点の運転情報、操作者の指示に基づいて運用可能な計画を計算する。

立案の際、2.2目の段階①で述べたように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こ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した。

以下、2つの運用調整の計算手法について説明する。

3.2 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量を選択することである。例えば、流出量（需要量）の時間変動を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い流入量とする。

配水池からの見積り流出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、あるいは下限で運用するの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）を考えると傾きが流入量、傾きの変化が流入量の切替えに対応する。QRS (Quasi-optimal Routing System)と呼んでいる手法では、準最適な折れ線の選択を行うことで、施設運転に適した流入量とする。概念図をFig.3に示す。

3.3 大域的な運用調整

目的は、導送水系全体を考慮して施設の間でのバランスをとることである。調整の例として、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ある。

計算には多層ネットワークモデルを用いた最適化手法²⁾を用いる。配水池の貯水量（水位）を仮想的に次

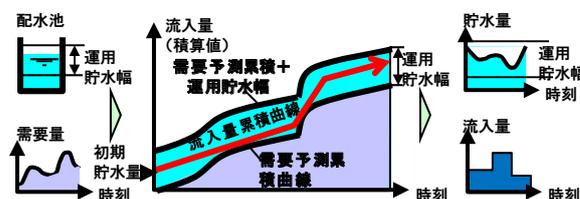


Fig.3: Scheduling process for reservoirs (QRS: Quasi-optimal Routing System)

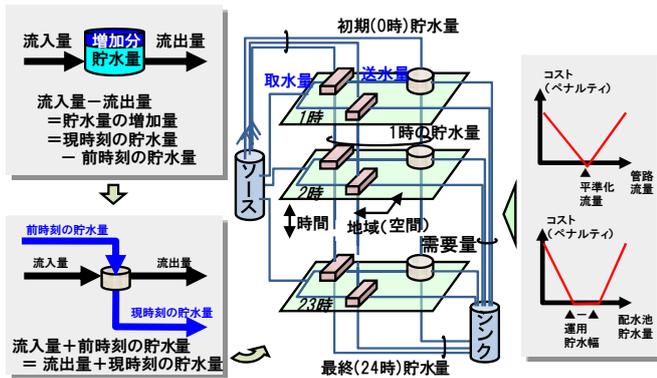


Fig.4: Scheduling process for global adjustment (Multilayer network model)

時刻への流量と見立て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水位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。

4. 環境負荷の評価機能

4.1 概要

評価機能では、配分計画機能(3項および5項)で立案した計画に対して、その環境負荷量を見積り、環境負荷の観点から計画の評価を支援する。環境負荷量の見積りを提示することにより、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。

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(原単位)に当てはめることで、運用計画値より運転の消費エネルギーを見積る。前提とする関係(原単位)は、収集・蓄積された運転実績からの推定やポンプの性能データ等からの見積りを用いる。消費エネルギー量のCO₂発生量への換算も可能である。

上記の集計に留まらないやや詳細な分析として、配水区ごとの消費エネルギー分析の機能を備えている。次目で詳細を説明する。

4.2 配水区ごとの消費エネルギー分析

事業体の総電力量を配水量で除した「配水量 1m³当たり消費エネルギー」は、環境に関する業務指標として広く利用されている。より水輸送、特に運用計画の策定に用途を絞った指標として、配水区ごとの単位水量当たり消費エネルギーを算出する。

これは配水区ごとに、水の輸送に要した消費エネルギーを単位水量当たりで換算した指標である。高低差など地域特性によるエネルギー消費特性の把握につながる。高所の配水池を経由した輸送経路など、エネルギー消費の多い運用箇所を把握することで、改善策の立案に役立てられる。

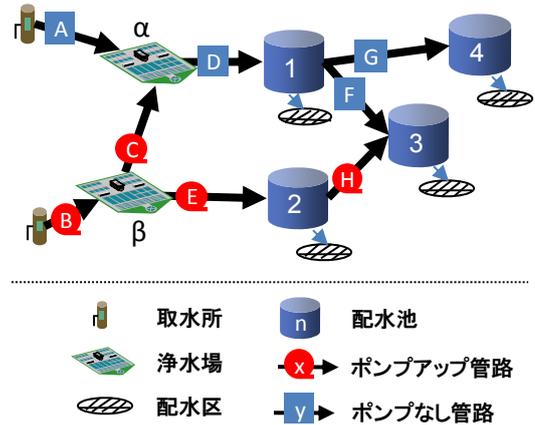


Fig.5: An example of water supply network

4.3 適用例

模擬的に設定した水系(Fig.5)への本機能の適用例を示す。導送水で自然流下が可能な水源と、ポンプアップを要する水源を持つ。浄水場αは両方の水源からの水を送水できる。また配水池3へは浄水場αとβの双方から送水可能である。ポンプアップ管路の管路B、C、E、Hでは単位水量 1m³の導送水に要する消費エネルギーとしてそれぞれ 0.1、0.2、0.05、0.05 kWhを設定した。

水源間の融通となる管路C、Hの水量を変化させた2つのケースでの評価の例をFig.6に示す。水源間の取水量バランスは同じだが、ケース1は管路C、ケース2は管路Hでの融通をそれぞれ優先している。配水池3に注目すると、ケース2ではポンプアップ管路B、E、Hを経由するため消費エネルギーがケース1に比べ多い。しかし配水区1、4への効率が改善するため、水系全体ではケース2のエネルギー効率が高いことが分かる。

5. 配分計画の拡張機能(トレードオフ調整)

5.1 概要

拡張機能では、環境負荷の低減と安定的な施設運用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性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、供給安定性の観点から特定の水源に偏らない

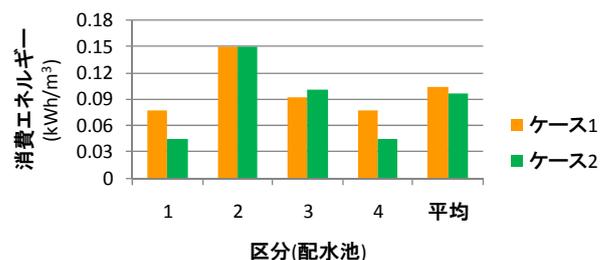


Fig.6: Evaluation of energy consumed for distribution to reservoirs

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。

一方で、ポンプ消費エネルギーの削減や高濁時ピークカットによる環境負荷の低減策は、この安定性と相反する側面を持つ。ポンプ消費エネルギーを削減するよう高標高の浄水場の稼働率を上げることは、特定の水源に頼った運転を意味する。同様に高濁時ピークカットでは原水の濁度に応じて取水量を変化させることになり、浄水設備の運転平準化という指針に反する。

このように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。そこで安定運用と環境負荷低減(消費エネルギー削減、高濁時ピークカット)にそれぞれ指標を設定し、それら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³⁾。このアプローチにより「Pareto最適」と呼ばれる適切な候補のみを操作者に提示し、その候補の中で対話的な操作形式による選択の支援が実現できる。Pareto最適な候補の例をFig.7に示す。

5.2 基本機能との関係

拡張機能の多目的最適化問題としての定式化では、主要管路の流量の時間的な平均値や、大まかな配水池の活用方法など、運用計画の概略を出力する。この概略を調整パラメータへと変換することで、3項で述べた基本機能によって運用計画を作成する。

5.3 適用例

環境負荷の考慮対象として高濁時ピークカットにしぼったデモシステムの画面例をFig.8に示す。画面中段に操作者が調整の際に意思を入力するスライダがあり、画面下段左右にはそれぞれ高濁回避と安定運用について得られた運用計画の指標値を確認する部分がある。画面上段左右は運用計画の詳細と計画対象の導送水ネットワークを表示している。

対話的な立案過程の例は次の3ステップのようにな

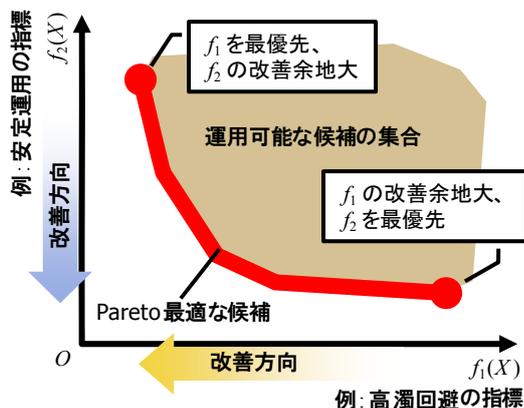


Fig.7: Pareto optimum candidates for trade-offs between stability of operations and environmental load reduction

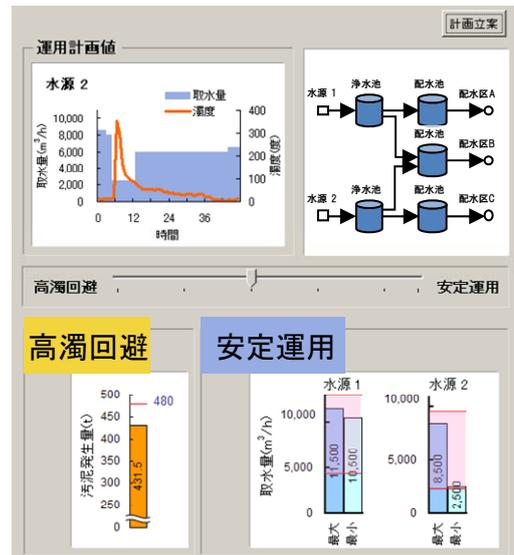


Fig.8: Screenshot of the prototype program for trade-off analysis

り、スライダによる操作で候補を探索できる。(1) 始めに初期化として安定運用を最優先した運用計画を立案する。浄水汚泥の削減はこの計画案が基準となる。(2) 高濁回避を追求するため、スライダを左端まで動かして計画案を算出させる。浄水汚泥は基準から約33%削減可能と見積もられた。(3) 得られた計画では取水量の変化が大きすぎると判断し、スライダを右に動かして計算を行う。計画を確認しつつ両目標のバランスを判断した結果、浄水汚泥の削減量が基準の20%となる計画案を採用する。

6. おわりに

環境負荷と安定性の双方に配慮した水運用計画システムを考案し、その中核ソフトウェアを開発した。水運用計画システムでの環境負荷の考慮に伴う段階や課題に対応した機能構成とした。配分計画を基本機能と拡張機能に分割し、また運用計画の立案時に環境負荷を評価分析する機能を備えた。

今後、導入サイトにて実績を収集し、有効性を検証していく。

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) 足立進吾,田所秀之:環境負荷低減を考慮した水運用システム,電気学会研究会資料,公共施設研究会(2010/5/31),pp.17-20(2010)