

# 予測・最適化に基づく配水システムの運用支援フレームワーク

伊豆倉 さやか, 平野 敏弘, 西岡 到, NEC データサイエンス研究所

Operation Supporting Framework of Large-Scale Water Distribution Network based on Predictive Optimization

Sayaka IZUKURA, Toshihiro HIRANO and Itaru NISHIOKA, Data Science Research Labs., NEC Corporation

## 1.はじめに

大規模かつ複雑な水道網を管理する配水システムにおいて、種々の運用業務は浄水場や給水所などの施設ごとに分割され、各業務に関わる運用者の個別の意思決定に基づき、日々の配水運用が行われている。そのため、配水網全体として無駄な電力消費や運用上の不具合が生じている。しかし、複雑な構造を持つ配水システムにおいて、より効率的な運用を実現するためにどこをどのように改善すればよいかの方針決定は、非常に困難である。

そこで本稿では、このような複雑な配水システムにおける運用改善を支援するためのフレームワークを提案する。本手法では、システム全体の性能を低下させる要因となる「ボトルネック」の特定と解消を繰り返す「制約理論 (Theory Of Constraints: TOC)<sup>[1]</sup>」の概念を適用し、データから学習した理想的な配水運用と実運用のギャップ分析を行うことで、効率的な配水運用の実現に向けた改善活動を支援する。

## 2.TOCに基づく運用改善

TOC は、多数の意思決定者が関わる複数の業務で構成されるような事業活動の生産性を向上させるための包括的な経営哲学の概念である。TOC によれば、ボトルネックと呼ばれるシステム全体の性能を決定するごく少数の要素を見つけ出し、そこにフォーカスして問題解決にあたることで、大きな改善効果を得ることができる。あるボトルネックを解消すると、それに伴い別のボトルネックが発生するため、新たなボトルネックの特定と解消を繰り返す。このような継続的な改善活動により、システム全体の性能を最大化することができる。

## 3.配水システムへの TOC 適用

TOC が主に適用される組み立て工場等の業務は、ボトルネックとなる工程を容易に特定できるように、各工程が直線的な生産ラインとして設計されている。一方、配水システムでは、多数の運用業務が複雑に組み合わせられ構成されるため、ボトルネックとなる施設がわかりづらい。また、近接する施設の運用が互いに影響を及ぼし合うため、ボトルネックの解消方法を検討するのが難しい。より効率的な運用に近づけるためには、ボトルネックの施設だけでなく、関連する周辺施設の運用も合わせて見直す必要があるが、そのような範囲を

見極めることは、熟練運用者の知識やノウハウがあったとしても困難である。

そこで、配水システムにおいて収集された各種データに基づき、理想的な運用と実運用のギャップ分析を行うことで、ボトルネックとなる非効率な運用を行っている施設を特定する。また、ボトルネックを解消するための方針検討を支援する。これにより、TOC の概念を配水システムに適用し、効率的な配水運用の実現に向けた改善活動を実施することが可能となる。

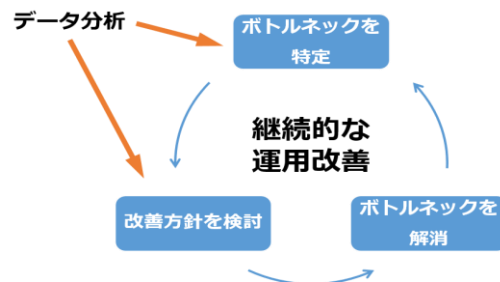


図 1: 制約理論の活用

## 3-1. 配水最適化

IoT 環境の普及によって各種センサーを介して多種多様なデータが収集されるようになり、それに伴いデータ分析技術も飛躍的に発展した。例えば配水システムにおいては、過去の水需要の実績データをもとに、天候、気温、曜日などの様々な因子を考慮して将来の水需要を高精度に予測することが可能となった。この予測結果に基づき、送配水に要する電力が最小となる配水計画を立案することができる<sup>[2][3]</sup>。具体的には、配水網の構造や各施設の設備能力、運用上の制約条件などを考慮し、予測された水需要を満たしながら送配水ポンプの消費電力を最小化する数理計画問題としてモデル化することで、最適な配水計画（一定の時間区間における各管路の流量や 1 日あたりの浄水量など）が導出される。浄水場や給水場などの各施設で最適計画に基づく運用を行うことで、消費電力を削減した効率的な配水システムを実現できる。

## 3-2. ボトルネックの特定

配水網を構成する各施設の運用を全て同時に最適計画による理想的な状態に変更することは現実的ではない。そこで、施設ごとに、配水システムで収集される運用実績データと最適解の類似度を

評価することで、ボトルネックとなる非効率な運用を行っている施設を特定する。

最適解においては、各ポンプは理想的な（最大効率の）状態で運転されていると考えられる。そのため、一定の時間区間におけるポンプの吐出水量と消費電力について、実績データと最適値をグラフ上で比較したときに、図 2（左）のように、実績値（■）が、ポンプの消費電力関数（破線で描画）上にプロットされる最適値（▲）と近い位置にプロットされれば、ポンプは効率的に稼働している。一方、図 2（右）のように実績値と最適値の距離が離れている場合、水量のわりに電力を多く消費している、非効率なポンプ運転となっている時間帯が存在していることがわかる。

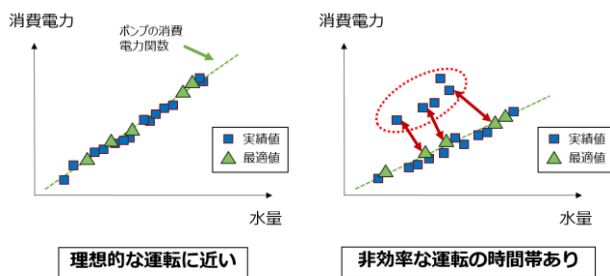


図 2：ポンプの水量と消費電力に関する実績値と最適値の比較

また、各ポンプが設置されている施設の流入・流出水量について、実績値と最適値の時系列データの類似度を評価すると、非効率な運用を行っている施設では、類似度が低くなる。そこで、そのような施設をボトルネックと見なし、類似度が高くなるように対策を行う必要がある。

### 3-3. 改善方針の検討

ボトルネックの施設が特定されたら、原因分析を行うとともに改善方針を検討する。具体的には、運用実績データから水流方向を調べることで、非効率な運用が生じている原因を推察する。

例えば図 3 のような配水網において、給水所 B がボトルネックとなっていたとき、矢印の方向に水が流れていたとすると、ポンプ B から吐出された水は需要点 b, c で引き入れられる。この送水量と引入れ水量を適切に対応させて運用を行わないと、それらの間の管路の水量が増減しポンプの運転効率が低下する可能性がある。また給水所 B は給水所 A と需要点を共有しているため、互いの運用に影響を及ぼし合うと考えられる。例えば、需要点 a への送水量を増やすためにポンプ A の設定圧力を上げると、給水所 B の周辺管路の水量も増加するため、ポンプ B から水を吐出しづらくなる。この場合、ポンプ B では逆に設定圧力を下げて無駄な電力消費を抑えるなどの対策が必要になる。

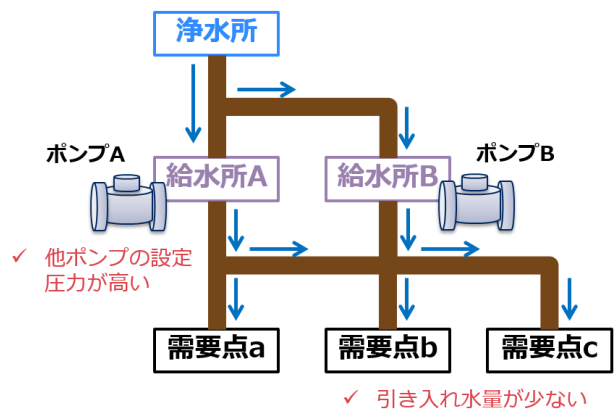


図 3：配水網の例

このように、ボトルネックとなっている施設と合わせて、関連する施設の運用方法（需要点での引き入れ水量の調整ポリシーや他のポンプの設定変更時の条件など）についても見直す必要がある。

以上のように、配水システムで収集されるデータを様々な側面から分析することで、配水運用におけるボトルネックの特定と改善方針の検討を支援することができる。

### 4. まとめと今後の課題

本稿では、データ分析に基づく配水システムの運用支援フレームワークを提案した。運用実績データと理論的な最適解の類似度を評価することで、非効率な運用となっている施設を明らかにし、効率的な配水運用の実現に向けた改善活動を支援することができる。

今後、提案手法を実際の配水システムに適用し、有効性の検証を行っていく。

### 参考文献

- [1] 中野明, エリヤフ・ゴールドラットの「制約理論」がわかる本, 秀和システム, 2006.
- [2] 荒井康裕 他, 混合整数計画モデルによる送配水システムの電力使用量の最小化, 土木学会論文集G(環境), Vol. 68, No. 6, 2012.
- [3] T. Hirano et al., Stable and Energy Efficient Operation in a Large-Scale Water Distribution Network, 2017, to be submitted.