

## 〈研究発表〉

# 用水供給事業・末端給水事業の連携促進のための マクロ水運用シミュレーションの基礎検討

藤井健司<sup>1)</sup>、小泉賢司<sup>2)</sup>、小熊基朗<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (株)日立製作所 研究開発本部  
(〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地 E-mail: kenji.fujii.zg@hitachi.com)

<sup>2)</sup> (株)日立製作所 研究開発本部  
(〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地 E-mail: kenji.koizumi.cg@hitachi.com)

<sup>3)</sup> (株)日立製作所 社会ビジネスユニット  
(〒319-1293 茨城県日立市大みか町5-2-1 E-mail: motoaki.oguma.ec@hitachi.com)

### 概要

国内の水道事業では、水需要の減少に伴う料金収入の減少や施設稼働率の低下、老朽化施設の更新などの課題に直面しており、水道事業の経営基盤の強化を図るための有効な手段の1つとして水道広域化が期待されている。本報告では、用水供給事業と末端給水事業による水運用に関する広域連携に着目し、詳細な管網データ等を必要とせずオープンデータ等から容易に構築可能であり、上記広域連携の実現可能性やその効果などの評価が可能なマクロな水運用計画シミュレーション方式とその可視化ツールを開発したため、その概要について報告する。

キーワード：水道広域化、水運用計画、数理最適化、自己水量平準化、シミュレーション

原稿受付 2023.7.7

EICA: 28(2・3) 140-143

## 1. はじめに

国内の水道事業では、水需要の減少に伴う料金収入の減少や施設稼働率の低下、老朽化施設の更新などの課題に直面しており、水道事業の経営基盤の強化を図るための有効な手段の1つとして水道広域化が期待されている。2018年の水道法改正では「広域連携の推進」が盛り込まれ、また2023年4月には都道府県において策定された「水道広域化推進プラン」の推進が厚生労働省より提言されている<sup>1)</sup>。水道広域化としては主に用水供給事業と末端給水事業の統合（垂直統合）と複数の水道事業の統合（水平統合）の形態がある。多くの水道事業体が広域化の必要性を認識し、広域化に向けた取組みを進めているが、一方で事業体間格差や広域化のメリットが不明等の理由により広域化が進まないケースも見られる。そのため水道事業者間の広域連携の実現可能性やそのメリットを定量的に示し、広域化の促進を図ることが重要と考える。

本報告では、垂直統合等の広域化の促進を図るために、用水供給事業者と末端給水事業者を対象とし、オープンデータ等から容易に構築可能な水系モデルにて水運用計画シミュレーションを行い、シミュレーション結果を表示する可視化ツールの開発を行った。これにより広域水系における上記広域連携の実現可能性やその効果のラフな評価が可能となる。以下、本開発の水運用計画シミュレーション方式及び、可視化

ツールを用いた広域連携の評価について述べる。

## 2. 水運用計画シミュレーション方式

水運用計画シミュレーションでは給水先の水需要を満足させるために浄水場の造水能力と水道を貯水する配水池の貯水能力をもとに浄水場や各送水管の送水量のシミュレーションを行う。例えば文献2)では、用水供給事業者や各末端給水事業者の浄水場や管路等の詳細データを入力して対象広域水系の水運用計画モデル構築とそのシミュレーション評価を行っている。

通常、広域化を目的としてシミュレーションを行う場合は広域水系全域のモデル構築する必要があるが、その構築にはデータ入手も含めて非常に大きな時間が必要となる。そのため本報告では、詳細な管路データ等を必要とせずオープンデータ等から容易に構築可能なマクロなモデルを用いて広域連携に関するラフな水運用計画シミュレーションを行うことを目的とした。本方式では、用水供給のための対象広域水系を複数のブロックに分割してブロック毎の接続を表したマクロ水系構造モデルを作成し、この水系構造モデルに対して、送水量や貯水量等の上下限などの制約条件、および管路流量平準化などの目的関数からなる水運用計画問題を定式化し（水運用計画モデル）、上記制約条件を満たし、かつ上記目的関数を最適化する解を算出するための水運用計画シミュレーションを行った。

また、多くの用水供給事業者では末端給水事業者に対して一定量の用水供給を行っていることが多く、広域連携により垂直統合が行われる場合は一定量の供給から需要に応じて変動する方式に変更することも考えられる。さらに、末端給水事業者が自己水を運用している場合、末端給水事業者への用水供給量（受水量）の調整を行うことで、末端給水事業者の自己水取水量の変動を抑制し、自己水設備のダウンサイジング、すなわち広域水系全域における水道施設規模の最適化（施設稼働率の維持）を図ることができる。これらの末端給水事業者と連携した用水供給の実現可能性やその効果を評価できるようにシミュレーション方式を構築した。

マクロ水系構造モデルを用いた水運用計画シミュレーションにおけるそれぞれの処理の概要を以下に示す。

### 2.1 マクロ水系構造モデルの作成

マクロ水系構造モデルの作成手順について述べる。まず、用水供給を含む対象の広域水系を複数のブロックに分割する。水収支は市町村単位で管理されていることから、市町村単位でまとめたブロックに分割する。ブロック化によっては、一つのブロック内に末端給水事業者浄水場と配水場が複数含まれることになる。次に用水供給事業者の浄水場から各ブロック内の配水場へ送水される送水管路の接続関係等に基づいて、マクロ水系構造モデルを作成する。マクロ水系構造モデルは各ブロックを基本的に一つの仮想的な浄水場と配水場が在るとみなし、ブロック内の末端給水事業者の浄水場と配水場をそれぞれ集約したものとして表現する。送水管についてはブロック内の管路は省略し、用水供給事業者の各浄水場から各ブロックへの用水の送水状況に合わせて仮想的な管路で表す。このとき、ブロック内の各配水場に複数の浄水場から用水が供給され、かつ分割が容易にできる場合は、用水の流れをより正確に再現するために小さなブロックに分割してもよい。ブロック内の浄水場は末端給水事業者が自己水により運用する施設であり、配水場に接続するように表すこととした。

マクロ水系構造モデルの作成例を示す。Fig. 1 に示す対象水系からマクロ水系構造モデルを作成した場合、Fig. 2 に示すように表現される。各ブロックに仮想的な浄水場と配水場を設置し、用水供給の状態から送水管を作成する。各ブロックの浄水場は配水場と一体化した表現として省略した。ここで、Fig. 1 に示すブロック4は、送水元の用水供給事業者の浄水場が明確に分かれているため、小ブロック (Fig. 2 に示すブロック4, 5) に分割した。

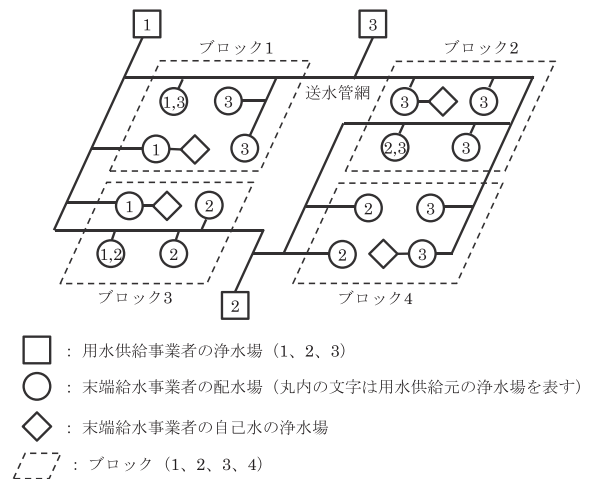


Fig. 1 An example of target water supply system

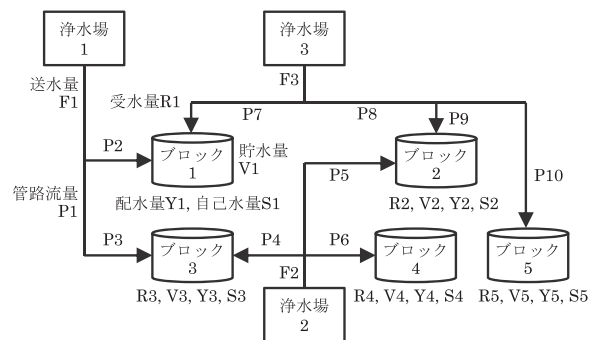


Fig. 2 An example of a macro water system structural model

### 2.2 水運用計画モデルの定式化

シミュレーションを行うために上記作成したマクロ水系構造モデルを対象として、制約条件、目的関数からなる水運用計画モデルを定式化する。ここでは、Fig. 2 のマクロ水系構造モデルを例に説明する。用水供給事業者の浄水場  $i$  ( $i=1, \dots, 3$ ) からの送水量を  $F_i(t)$  ( $t$ : 時刻,  $t=1, \dots, n$ ), 管路  $j$  ( $j=1, \dots, 10$ ) の流量を  $P_j(t)$ , ブロック  $k$  ( $k=1, \dots, 5$ ) のブロック受水量を  $R_k(t)$ , ブロック  $k$  の貯水量を  $V_k(t)$ , ブロック  $k$  からのブロック配水量を  $Y_k(t)$ , ブロック  $k$  内の浄水場の送水量 (自己水量) を  $S_k(t)$  と表す。ここで、ブロック  $k$  の貯水量  $V_k(t)$  は、ブロック内の水収支関係に基づいて以下の式で表される。

$$V_k(t) = V_k(t-1) + R_k(t) + S_k(t) - Y_k(t)$$

これらのデータには以下の制約条件がある。

$$F_{i, \min}(t) \leq F_i(t) \leq F_{i, \max}(t)$$

( $F_{i, \max}(t), F_{i, \min}(t)$ : 浄水場  $i$  からの送水量  $F_i(t)$  の上限値と下限値)

$$R_{k, \min}(t) \leq R_k(t) \leq R_{k, \max}(t)$$

( $R_{k, \max}(t), R_{k, \min}(t)$ : ブロック  $k$  からの受水量  $R_k(t)$  の上限値と下限値)

$$V_{k, \min}(t) \leq V_k(t) \leq V_{k, \max}(t)$$

( $V_{k, \max}(t)$ ,  $V_{k, \min}(t)$ ): ブロック  $k$  の貯水量  $V_k(t)$  の上限値と下限値)

水運用計画シミュレーションではブロック配水量  $Y_k(t)$  と自己水量  $S_k(t)$  を設定値とし、上記の制約条件を満たす管路流量  $P_j(t)$  を求める ( $F_i(t)$  と  $R_k(t)$  は  $P_j(t)$  の合計値として算出される)。水運用計画シミュレーションを行う上で広域連携の最適化を目的とし目的関数 (i, ii, iii) を設定した。

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^n |P_j(t) - P_{j, \text{const}}| \right\} \quad (\text{i})$$

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^{n-1} |P_j(t+1) - P_j(t)| \right\} \quad (\text{ii})$$

$$\max \left[ \min_t \{V_k(t) / V_{k, \max}(t)\} \right] \quad (\text{iii})$$

数式 (i) は管路  $j$  の流量を時刻  $t$  の範囲においてできる限り固定にすることを示す ( $P_{j, \text{const}}$  は一定にしたい流量)。数式 (ii) は管路  $j$  の流量の変動をできる限り抑制することを示す。また数式 (iii) はブロック  $k$  の時刻  $t$  の範囲における貯水量を最大化することを示す。

各目的関数は管路  $j$ , ブロック  $k$  ごとに重みパラメータ ( $\alpha_j, \beta_j, \gamma_k$ ) を用いて線形結合して単一目的化することで最適化を行うこととした。

#### 【目的関数 $J$ 】

$$\begin{aligned} \min J = & \sum_{j=1}^{10} \alpha_j \sum_{t=1}^n |P_j(t) - P_{j, \text{const}}| \\ & + \sum_{j=1}^{10} \beta_j \sum_{t=1}^{n-1} |P_j(t+1) - P_j(t)| \\ & - \sum_{k=1}^4 \gamma_k \cdot \min_t \{V_k(t) / V_{k, \max}(t)\} \end{aligned}$$

### 2.3 水運用計画シミュレーションの可視化ツール

上記定式化した水運用計画モデルに対して、最適化計算を汎用的な数理計算ソフトウェアである MATLAB を用いて求解シミュレーションツールを作成した。またシミュレーション結果を可視化し、広域連携の実現可能性や効果の評価を支援するための可視化ツールの作成を行った。

作成した可視化ツールは、①シミュレーション条件データ (ブロック配水量, ブロック自己水量等), モデルパラメータ (各種上下限制約, 目的関数の重み等) の設定, ②受水量の一定/変動に対応した水運用計画シミュレーション, ③シミュレーション結果のグラフ表示・ファイル出力, 等の機能から構成される。可視化ツールの画面例を Fig. 3 に示す。

また、ブロックの受水量が一定の場合と比較することを可能とした。

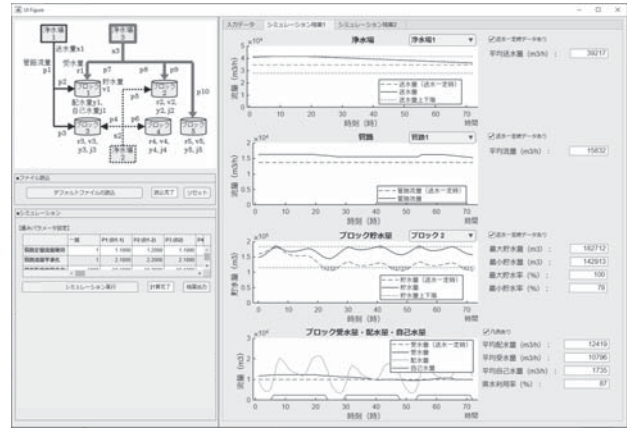


Fig. 3 An example of a visualization demo prototype screen

### 3. 可視化ツールによる広域連携の評価

上記の可視化ツールでは、入力データや設定を変更しシミュレーションを行うことで、用水供給事業者と末端給水事業者の広域連携の実現可能性やその効果など導入に向けた評価が可能となる。以下、可視化ツールを用いた代表的な評価の例を示す。

#### (1) 自己水設備ダウンサイジングの評価

所定ブロックにおいてブロック自己水量を削減してシミュレーションを行うことにより、所定ブロックの末端給水事業者の自己水設備をどの程度ダウンサイジングできるかどうかの評価を可能とした。この際にブロック配水量を増減させて評価することもできる。

例として、所定ブロックにおいて配水量を現在の平均配水量の 1.2 倍に増加させ、ブロック自己水量を現在の 2/3 倍に減少させたときのシミュレーション結果を Fig. 4 に示す。ブロック受水量が一定の場合、ブロック貯水量がその下限値を下回るが、ブロック受水量変動ありの場合、ブロック配水量に応じたブロック受水量によりブロック貯水量を上下限内に維持できており、配水量が現在の配水量の 1.2 倍であってもブ

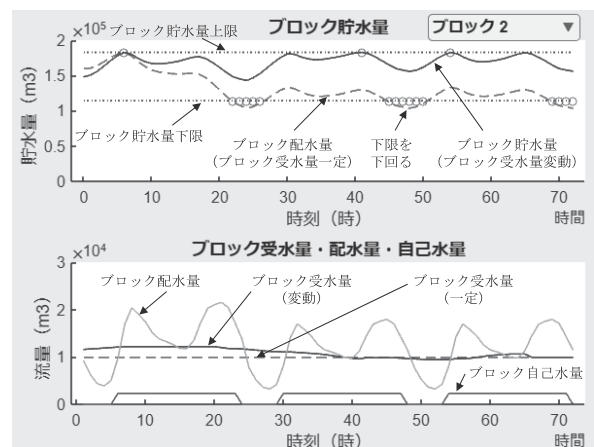


Fig. 4 An example of simulation results with and without wide area management for water utilities

ロック内の自己水設備を2/3の規模までダウンサイジング可能であるといった判断ができる。

#### (2) 配水場貯水率の増加可能性の評価

2.2で示した水運用計画モデルの目的関数の各目的項の重みパラメータ値をそれぞれ変更してシミュレーションを行うことで、ブロック受水量変動により管路流量をどの程度平準化できるか、受水量一定時の管路流量をどの程度維持できるか、また所定ブロックの最低貯水率をどの程度まで高めることができるかを評価可能とした。

#### (3) ブロック間の水融通可能性の評価

所定ブロックにおいて増量したブロック配水量を入力してシミュレーションを行うことにより、所定ブロックに対して近隣ブロックから水を融通することで所定ブロックにおいてどの程度の配水量増加に対応できるか評価可能とした。

## 4. お わ り に

広域水系全域として用水供給事業と末端給水事業(市町村等)による水運用に関する広域連携に着目し、広域連携を導入したときの効果を評価することを目的に開発したブロック単位のマクロな水運用計画シミュレーション方式とその可視化ツールについて示した。入力データや設定条件を変えて様々なシミュレーションを行うことにより、自己水設備ダウンサイジングの効果やブロック間の水融通の可能性などを評価でき、広域連携の導入・促進に寄与できるようになると考える。今後、実際の水系を対象とした本方式の有効性の検証や水道事業者のニーズを取り入れたモデルの改良など実用化に向けた検討を行う。

#### 参 考 文 献

- 1) 厚生労働省ホームページ,  
[https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000087512\\_00001.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000087512_00001.html) (2023年6月23日確認)
- 2) 藤井ほか: 水道用水の変動供給に関する一考察, 学会誌「EICA」, 第27巻, 第2・3号, pp.80-84 (2022)