

## 〈研究発表〉

## 水道用水の変動供給に関する一考察

藤井 健 司<sup>1)</sup>, 小泉 賢 司<sup>2)</sup>, 小熊 基 朗<sup>3)</sup>  
百海 学<sup>4)</sup>, 山内 康 正<sup>4)</sup>, 三澤 庄 吾<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> (株)日立製作所 研究開発本部  
(〒244-0817 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 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 日立市大みか町5-2-1 E-mail: motoaki.oguma.ec@hitachi.com)

<sup>4)</sup> 埼玉県 企業局  
(〒330-0063 さいたま市浦和区高砂3-14-21 E-mail: a7050-08@pref.saitama.lg.jp)

## 概 要

将来の人口減少に伴う水需要の減少が見込まれる埼玉県では、県全体での水道施設規模の最適化（ダウンサイジング）が課題であり、浄水処理への影響は最小化しつつ既存の送水施設を効率的に運用する変動供給制度の検討を進めている。本報告では、変動供給時の県浄水場からの送水量や受水団体浄配水場の自己水量、受水量等を計画する水運用計画技術をベースとする用水変動供給方式を示し、本方式を埼玉県実証地域に適用したときの変動供給の実現可能性、ダウンサイジング効果、およびシミュレーション評価結果について述べる。

キーワード：用水変動供給，水運用計画，水需要予測，数理最適化，自己水量平準化

原稿受付 2022.6.28

EICA: 27(2・3) 80-84

## 1. はじめに

埼玉県では、高度経済成長期以降の急激な人口の増加と生活水準の向上に伴う水需要の増加に対応するため、河川表流水を浄水処理し市町村等の水道事業者へ送水する水道用水供給事業（県営水道）を行っている。埼玉県においても今後は人口減少に伴う水需要の減少が見込まれており、水道事業、用水供給事業が連携して水道施設の有効活用を図り県全体での施設規模の最適化（ダウンサイジング）および水資源の効率的活用を進めていくことが課題となっている。県営水道は県全体給水量の約8割を占めており、市町等受水団体に対する現行の定量供給体制からできる限り柔軟な変動供給に変更することが、県全体の施設規模の最適化に有効であると考えている。そこで数理最適化、統計解析等の技術を活用し、浄水処理への影響は最小化しつつ既存の送水施設を効率的に運用する用水変動供給制度<sup>1)</sup>の可能性調査を行った。用水変動供給の可能性調査においては、受水団体の水需要を満たすかどうかの水量の評価、受水団体浄配水場まで用水が届くかどうかの圧力の評価、および十分な残塩濃度が確保できる

かどうかの水質の評価などが必要になるが、本報告では特に重要な水量管理について検討を行った。

用水変動供給による受水団体浄配水場の自己水量（地下水取水量）、受水量等の変化イメージを **Fig. 1** に示す。現在の受水団体浄配水場では、県営水道からの受水量が月毎に定量であるため、日々変動する水需要量（配水量）に合わせて自己水取水量の調整を行っている。用水変動供給では、受水団体の配水池をバッファとして、県営水道からの各受水団体浄配水場への受水量の調整を行うことにより自己水取水量の変動を抑え、自己水取水設備の最適化を図ろうとするものである。受水団体としても更新を迎える自己水取水設備のダウンサイジングが可能となり、投資コストや維持管理コストの削減が可能となる。本報告では、変動供給時の県浄水場からの送水量や受水団体浄配水場の自己水量、受水量等を計画する用水変動供給方式を示し、本方式を埼玉県実証地域に適用したときの変動供給の実現可能性、自己水取水設備のダウンサイジング効果、および変動供給時の県水送水量、受水量等のシミュレーション評価結果について述べる。

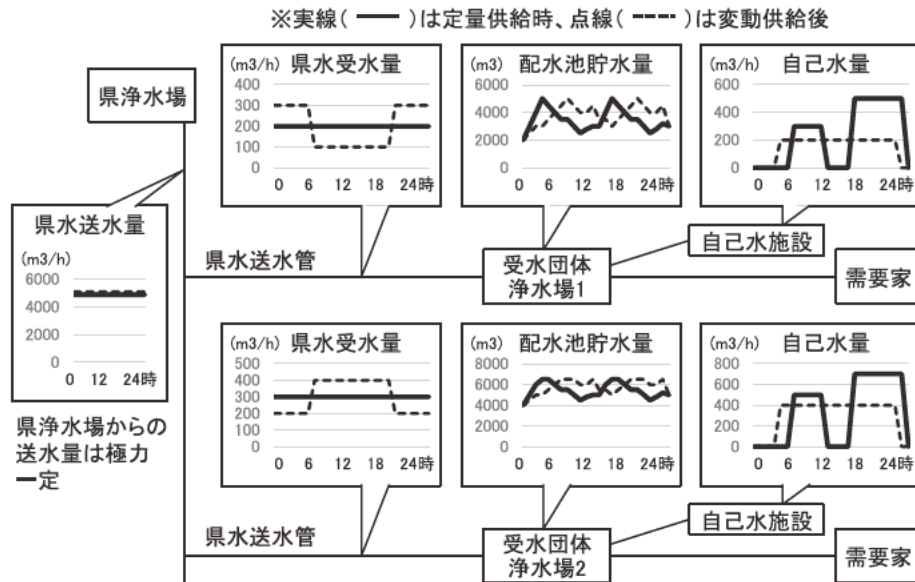


Fig. 1 Changes in various water flow rates and amounts due to water fluctuation supply

## 2. 用水変動供給方式

本用水変動供給方式では水運用計画技術<sup>2)</sup>をベースとし、3日先(72時間先)までの時間単位の県浄水場からの送水量や受水団体浄配水場の自己水量、受水量等の変動供給計画の立案を行う。本方式の処理手順をFig. 2に示す。本方式では、オフライン処理として、各受水団体浄配水場の水需要予測モデル、自己水量平準化パターン、および対象水系の水運用計画モデルを事前に構築しておく。計画立案時にオンライン処理として、各受水団体浄配水場の配水区の水需要予測、および水運用計画モデルの求解計算を行う。各処理の概要を以下に示す。

### 2.1 水需要予測モデル構築

各受水団体浄配水場の配水区の3日先までの時間配水量の予測を行う水需要予測モデルを構築する。ここでは、直近1週間の配水量実績より算出した配水量予測値に対して、予測対象日の曜日情報、天気概況・気温(予報値)等に応じた補正を行うことにより時間配水量の予測を行う統計解析ベースの水需要予測モデル

を用いるものとし、過去数か月の曜日情報、気象実績、および配水量実績を学習用データとして予測誤差が最小となるようモデルの構築(補正パラメータの同定)を行う。

### 2.2 自己水量平準化パターン作成

受水団体浄水場の自己水取水設備の最適化を考慮し、各受水団体浄水場の自己水量ピークを削減した自己水量平準化パターンを作成する。自己水取水運用の容易化のため自己水量平準化パターンは所定期間ごとの固定パターンとするが、現状の県営水道の用水供給量が月ごとの固定値であることから、自己水量平準化パターンも月ごとの固定パターンとする。自己水量平準化パターンの作成においては、はじめに月別の1日の取水すべき自己水量をその月の日平均自己水量実績値を用いて決定し、次に上記日自己水量を、小規模かつ少ない台数の同一取水ポンプを職員が対応しにくい深夜時間帯を除いて効率的に運転するようにして月別の各自己水量平準化パターンを作成するものとした。これにより日々異なる自己水取水量に対して、自己水取水ポンプの運転台数を最小にするような自己水量の平準化が可能となる。また月単位で見れば、自己水量、および県営水道の用水供給量は、それぞれ平準化の前後で同じ量になる。

### 2.3 水運用計画モデル構築

県浄水場、送水管路、受水団体浄配水場を対象とする水運用計画モデル(制約条件、目的関数からなる数理最適化モデル)を構築する。ここでは県浄水場の送水量、管路流量、受水団体浄配水場の受水量、配水池貯水量を決定変数とし、各管路節点および各配水池で

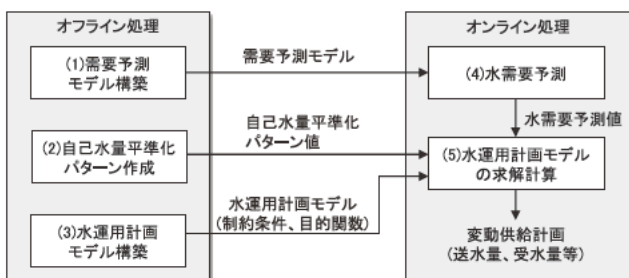


Fig. 2 Processing procedure of water fluctuation supply method

成り立つ水収支式や各種流量の上下限等を制約条件とし、配水池最低貯水量最大化、受水量変更回数低減、送水管流量平準化、等を目的関数とする多目的最適化問題として水運用計画モデルを定式化した。このとき上記3種類の各目的を総合的に判断して計画の良し悪しを評価できるよう、上記各目的を重みパラメータで線形結合して単一目的化した。

モデル構築においては、配管で繋がっている対象エリア外にある県営浄水場や、受水団体浄配水場の配水池や配水管も対象とすべきではあるが、多くの過去実績データや配水エリア間の水運用実績データを元に複雑な制約条件を課す必要が生じることや、受水団体の運用の独自性が失われることにもなるため、エリア外の県営浄水場からの給水量は定量とし、受水団体の浄配水場の複数配水池を1つの仮想的な配水池に統合するなど概略的なモデルとした。

## 2.4 水需要予測

2.1節で構築した水需要予測モデルに基づき、予測対象期間、対象配水区における曜日情報、気象予報値、直近配水量実績等を入力として、予測開始日（計画立案開始日）から3日までの各受水団体浄配水場の配水区の時間配水量を予測する。

## 2.5 水運用計画モデルの求解計算

2.3節で構築した水運用計画モデルに基づき、上記算出した需要予測結果、および2.2節で作成した自己水量平準化パターン値等を入力データとして、汎用的

な数値計算ソフトウェアを用いて水運用計画モデルの求解シミュレーション計算（変動供給シミュレーション）を行う。その結果、計画立案開始日から3日先（72時間先）までの変動供給計画の立案、すなわち県浄水場の送水量、管路流量、受水団体浄配水場の受水量、配水池貯水量などの時間計画値が算出される。

## 3. 実証地域における変動供給シミュレーション

2つの県浄水場、11の受水団体浄配水場（変動供給対象）からなる実証地域を対象として、前節で述べた変動供給方式に従って、実証地域全域の水運用計画モデルの構築を行った。実証地域における水系構造モデルを Fig. 3 に示す。Fig. 3 において、施設 A, B は県水の送水を行っている県浄水場、施設 a, c, g, h, i, j は自己水取水を行っている受水団体浄水場、施設 b, d, e, f, j, k は自己水取水を行っていない受水団体配水場である。決定変数である県浄水場の送水量  $x$ 、送水管流量  $p$ 、受水団体浄配水場の受水量  $r$ 、貯水量  $V$  の上下制限約は、これまでの供給実績および経験（管内流速範囲）を基に安全側（厳しめ）に設定した。また目的関数は、前節で述べたように配水池最低貯水量最大化、管路流量平準化、受水量変更回数低減の3種類の目的項からなる目的関数を設定し、重みパラメータにより各目的項の優先度を変更できるようにした。

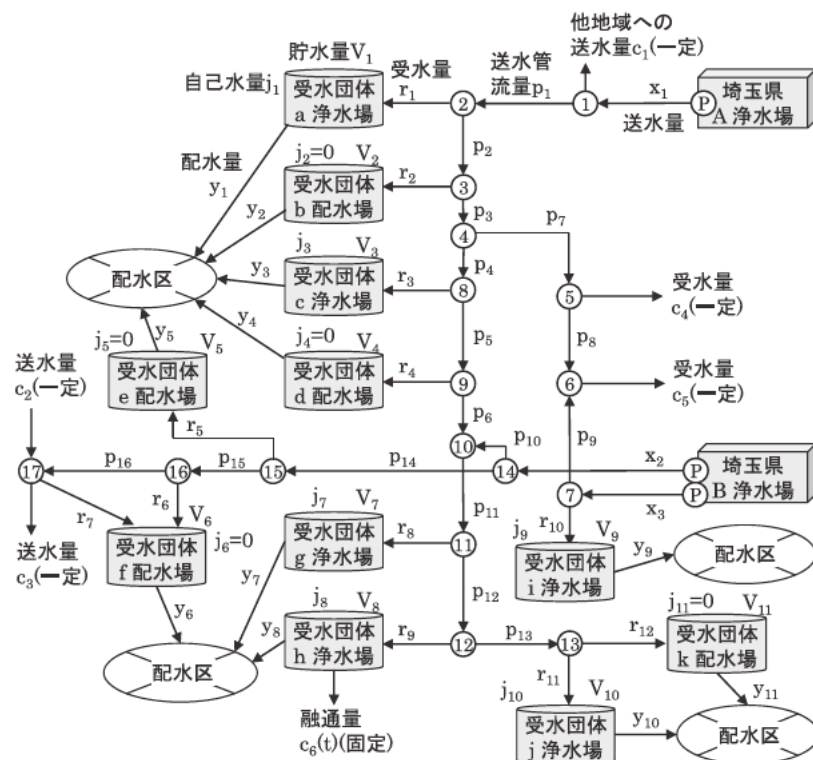


Fig. 3 Water supply system structure in the demonstration area

### 3.1 実証地域における自己水取水ポンプのダウンサイジング効果

2019年度の自己水量実績データを用いて各受水団体浄水場の月別の自己水量平準化パターンの作成を行った。その一例として、受水団体a浄水場における4月の自己水量平準化パターンの作成結果をFig.4に示す。a浄水場では、年間の多くの日において容量の異なる4台の自己水取水ポンプP1, P2, P3, P4による運転が行われているが、各月の自己水量平準化パターンは2台のポンプP1, P4のみを用いるように作成した。実証地域における各受水団体浄水場の自己水ポンプ台数と自己水量平準化パターンに用いるポンプ台数の一覧をTable1に示す。実証地域内の受水団体浄水場では、現在合計30台の取水ポンプによる運転が行われているが、今回取水ポンプ台数を計14台まで減らすようパターンを作成した。

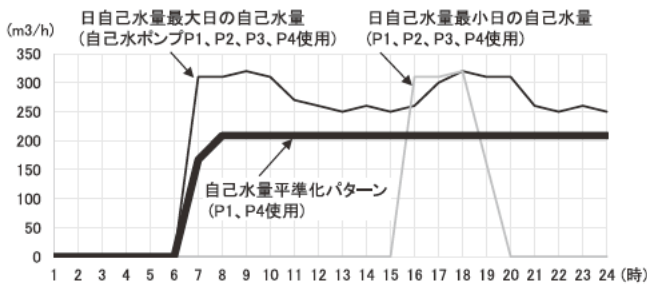


Fig. 4 Self-water flow rate smoothing pattern for April at water purification plant a of water receiving organization

Table 1 Reduction effect of the number of self-water intake pumps in the demonstration area

受水団体浄水場	全自己水ポンプ台数(台)	自己水量平準化パターンに用いる自己水ポンプ台数(台)
a	4	2
c	6	3
g	6	2
h	3	2
i	4	3
j	7	2
合計	30	14

### 3.2 実証地域における用水変動供給の実現可能性

上記作成した自己水量平準化パターン値と2019年度の各月の需要最大および最小となる期間(計24期間)の配水量実績データを用いて、上記水運用計画モデルに基づいて変動供給シミュレーション(求解計算)を実施した。シミュレーションにおいて実行可能解が得られなかった場合は実行可能解が得られるまで制約条件を徐々に緩和してシミュレーションを行い、実行可能解が得られるために満たすべき制約条件の導出を行った。これをTable2に示す。全24期間のシミュレーションにおいて変動供給が実現可能となるためにはTable2に示すように受水量の上下限値の一

部で更なる緩和が必要となった(他の各種水量の上下限制約の緩和不要)。2019年度の他期間の受水実績から鑑みれば、受水量の上下限制約を緩和でき、実証地域における用水変動供給の実現可能性はあると考えるが、違う年度の受水実績や今回一定とした受水地点の受水量等への影響なども考慮した上で慎重に検討する必要がある。

Table 2 Constraints that must be met for the simulations to be feasible

受水量	下限 (m³/h)	上限 (m³/h)
r1	200	1600
r2	200	600
r3	200⇒150に緩和	500⇒560に緩和
r4	100	600
r5	200	1800
r6	300	1000
r7	200	500
r8	200	900⇒940に緩和
r9	300	900
r10	200	1600⇒1620に緩和
r11	200	800
r12	100	350

### 3.3 変動供給シミュレーション結果の評価

上記水運用計画モデルの目的関数の各目的項に対応する重みパラメータを変更して変動供給シミュレーションを実施した。2019年7月の需要最大となる期間の配水量実績データを用いて、水供給の安定性(配水池最低貯水量最大化)または運用維持管理の効率性(受水量変更回数低減, 送水管流量平準化)をそれぞれ優先するようパラメータ設定したときのシミュレーション結果(変動供給計画案)をそれぞれFig.5, Fig.6に示す。Fig.5, Fig.6より、受水団体浄配水場において自己水量が平準化されていても水需要(配水量)を満たしかつ貯水量がその上下限に収まるよう用水の変動供給(変動受水)が行われていることが確認できる。

また目的関数の各目的項に対応する受水団体浄配水場の「総貯水量最低貯水率」、「総受水量変更回数」、および「全送水管流量平均変化率」等の指標値を用いて各シミュレーション結果を評価したときの結果をTable3に示す。ケース1に示すように配水池最低貯水量最大化に対応する重みw1を大きく設定した場合、受水団体浄配水場の貯水率を高めるよう頻繁な受水量, 送水管流量の変更が行われ、水供給の安定性を優先した用水供給計画案が立案できていることが確認できた。またケース2に示すように受水量変更回数低減, 送水管流量平準化に対応する重みw2, w3をw1と同程度に大きく設定した場合、受水量の変更回数, および送水管流量の平均変化率が減少し、運用維持管理の効率

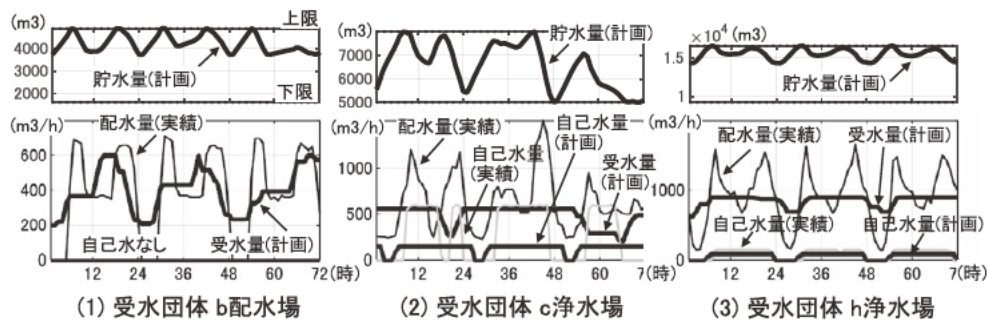


Fig. 5 Simulation results when prioritizing the stability of water supply

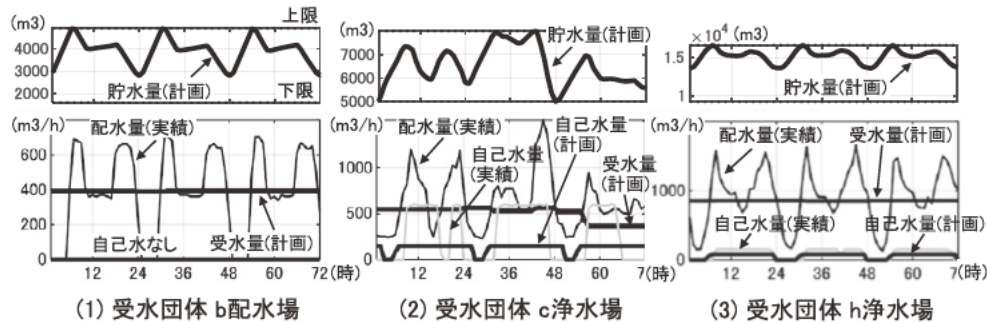


Fig. 6 Simulation results when prioritizing the efficiency of operation and maintenance

Table 3 Evaluation for simulation results

ケース	重みパラメータ			シミュレーション結果に対する指標値		
	w1	w2	w3	総貯水量最低貯水率 (%)	総受水量変更回数 (回)	全送水管流量平均変化率 (%)
ケース 1 (水供給の安定性優先)	1000	1	1	59.2	228	34.3
ケース 2 (運用維持管理の効率性優先)	2	1	3	54.7	56	1.1

※ここに、w1, w2, w3 は、目的関数の目的項である配水池最低貯水量最大化、受水量変更回数低減、送水管流量平準化にそれぞれ対応する重みパラメータである。

性を優先した用水供給計画案が立案できていることが確認できた。一方、本シミュレーション結果からどのような目的を優先させても各受水地点毎の変動幅や変動割合にはばらつきが生じることが示唆され、自己水の有無にかかわらず受水地点一律に変動幅や変動率を設定し運用することの難しさが確認できた。

#### 4. おわりに

用水変動供給における重要な観点である水量管理に着目し、受水団体の水需要を満足するための用水変動供給方式について示した。実証地域におけるシミュレーション評価により、受水量の制約条件緩和の可否について慎重に検討する必要があるものの、本方式により用水変動供給時の各種制約を満たす水量管理を実現でき、用水供給事業における自己水取水設備の最適化に適用できる可能性があることを確認した。今後、管網解析シミュレーションに基づく用水変動供給時の

圧力や水質に関する評価、変動供給に耐える配管能力や制御方法の検討、および対象地域を県全域に拡大したときの評価、受水団体との合意形成など実用化に向けた検討が必要である。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、データご提供いただいた埼玉県内受水団体の方々に深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 埼玉県ホームページ、〈<https://www.pref.saitama.lg.jp/c1304/90d00-01yousui/kyodochosa.html>〉(2022年6月11日参照)
- 2) 高橋信補, 足立進吾, 藤井健司: 水運用と電力調整を併用した水道送配水システムの電力平準化に関する一考察, 電気学会論文誌C, Vol. 134, No. 7, pp. 956-963 (2014)