送水システムの性能分析および最適運用計画*

横山良平^{*1}, 鮫島正一^{*2}, 伊東弘一^{*3}Performance Analysis and Optimal Operational Planning
of Water Supply SystemsRyohei YOKOYAMA^{*4}, Shoichi SAMEISHIMA and Koichi ITO^{**} Department of Mechanical Engineering, Osaka Prefecture University,
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai-shi, Osaka, 599-8531 Japan

From the viewpoints of energy and cost savings, it is important to rationally operate water supply systems composed of pumps, piping, and reservoirs. However, it is very difficult, because nonlinear performance characteristics of pumps and piping, discrete performance characteristics due to the combination for on/off status of pumps, and daily operational strategies of reservoirs must be considered. In this paper, a two-stage approach to the performance analysis and optimal operational planning of a water supply system is proposed. At the first stage, the performance characteristics of pumps and piping are analyzed by the Newton-Raphson method, and are optimized with respect to the combination for on/off status and revolution speed ratios of pumps by the enumeration and nonlinear programming methods, respectively. At the second stage, the daily operational strategy of the system is optimized with respect to the storage level of a reservoir by the dynamic programming method. A case study is conducted to show the effectiveness of this approach.

Key Words: Systems Engineering, Water Supply Systems, Performance Analysis, Optimal Operation, Energy Saving, Cost Saving, Dynamic Programming

1. 緒 言

近年, 各種のエネルギー供給システムにおいて, 省エネルギーおよび省コスト化が強く求められるようになってきている。上水道の送水システムにおいても同様であり, インバータ技術の発達とともに可変速ポンプが採用されるようになり, 設備の面から省エネルギーおよび省コスト化が進展している。それに加えて, システムの設計および運用を合理的に行うことによって, さらに省エネルギーおよび省コスト化が達成されるものと期待される。

本研究では, 送水システムが設置された後に, 省エネルギーおよび省コスト化を目的とした運用計画の最適化について検討する。そのための課題として, 次の

ような項目が挙げられる。

- (1) システムの主要な構成要素であるポンプおよび配管の性能特性として, 流量と圧力の間の非線形関係を考慮する必要がある。
- (2) 複数のポンプを含むシステムにおいては, 運転・停止に関する運用方策の代替性を考慮する必要がある。
- (3) 複数の可変速ポンプを含むシステムにおいては, 運転・停止だけではなく, 運転の場合には回転数に関する運用方策の代替性も考慮する必要がある。
- (4) 水の安定供給のためにシステムには配水池が設置されるが, そのため配水需要量の時間変化における一つの周期を単位として運用計画を行う必要がある。

これらの課題によって, 送水システムの最適運用計画問題は大規模であり, 非線形および組合せ的性質を持つ複雑な最適化問題として考慮する必要がある, 解の導出が極めて困難になる。

送水システムの最適運用計画については, 以前から多くの研究が行われている。しかしながら, システムの性能特性について簡易化されたモデルが適用された

* 原稿受付 2005年12月8日。

^{*1} 正員, 大阪府立大学大学院工学研究科(☎599-8531 堺市中央区学園町1-1)。^{*2} (株)明電舎環境・社会事業部(☎103-8515 東京都中央区日本橋箱崎町36-2)。^{*3} 正員, フェロー, 早稲田大学理工学術院総合研究所(☎169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)。

E-mail: yokoyama@ese.me.osakafu-u.ac.jp

り、最適化の目的関数について間接的なものが採用されている^{(1)~(5)}。そのため、性能特性が異なる複数のポンプを含むシステムを対象とする場合、ならびに夜間の安価な電力を利用する場合など、性能特性や目的関数などの様々な条件の下での上述の課題を考慮した最適運用計画については十分に検討されていない。

本研究では、送水システムが最終的に一系統になり、終端に配水池が設置されている送水システムについて、上述の課題を総合的に考慮しながら、性能分析と最適運用計画を行うための一方法を提案するとともに、一つの適用事例によってその有効性について検討する。

2. 性能分析および最適運用計画の概要

2.1 送水システム 図1は本研究の対象とする送水システムの機器構成を示したものである。ここでは、複数の取水地点に設置された複数の固定速ポンプ(PC)および可変速ポンプ(PV)、ならびに配管(PP)および配管分岐・合流点(JT)によって最終的に一系統に送水するとともに、終端に設置された一つの配水池(RS)に水を貯え、時間的に変化する必要な流量の水を配水池から配水するものとする。

2.2 2段階アプローチ 前述のように、最適運用計画問題は大規模で複雑なものとなるため、通常最適手法では、大域的最適解を導出することが困難となる。また、大域的最適解を導出することができない場合には、最適運用計画における検討条件の変更に伴う最適解の変化を合理的に評価できないことになる。本研究では、最適運用計画問題の一解法として、図2に示す2段階アプローチを提案する。このアプローチでは、後述のように配水池の流入出力および貯水量を離散的にしか扱えないという制限があるが、その制限の下で大域的最適解を導出することができる。また、その結果、最適運用計画における検討条件の変更に伴

う最適解の変化を合理的に評価することができる。特に、第1段階でシステム性能の非線形性を考慮する必要がある性能分析を行うことによって、第2段階では後述するように動的計画法を適用し、比較的容易に大域的最適解を導出できるようにする。

2段階アプローチの各段階における具体的な手順は以下の通りである。

2.2.1 第1段階 配水池を除外し、ポンプ、配管、および配管分岐・合流点から構成されるシステムについて、配水池への流量を離散値を取るパラメータとして考慮し、各離散値に対してシステム性能を分析し、配水池への流量と電力消費量の関係を求める。その際に、ポンプの運転・停止および可変速ポンプの回転数については、代替性が存在するため、電力消費量を最小化するように決定する。

2.2.2 第2段階 配水池を含め、すべての機器から構成されるシステムについて、与えられた一日の配水需要量、第1段階で求められた配水池を除外したシステムの性能特性としての配水池への流量と最小電力消費量の関係、および配水池の水量バランスを満足するように、一日を周期とした最適運用計画を行う。

3. 性能分析の詳細

3.1 機器性能特性のモデル化 配水池を除外したシステムを構成する各機器について、水の流量 G および圧力 p を変数として考慮し、流量および圧力バランスを定式化し、性能特性のモデル化を行う。また、ポンプについては、電力消費量 E を評価するための関係式も考慮する。さらに、可変速ポンプについては、定格回転数を基準とする回転数 R も変数として考慮する。

以下に各機器について具体的に定式化を行う。各機器に関する物理量には下付添字として機器記号を付し、機器の入口および出口における物理量には、それぞれ下付添字 i および o を付加する。

3.1.1 固定速ポンプ 運転時における性能特性を

Fig. 1 Configuration of water supply system

Fig. 2 Two-stage approach to performance analysis and optimal operational planning

次式のように表す.

$$\left. \begin{aligned} G_{PCi} - G_{PC0} &= 0 \\ P_{PCi} - P_{PC0} + f_{PC}(G_{PCi}) &= 0 \\ E_{PC} &= q_{PC}(G_{PCi}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで, f はポンプの性能特性を表す関数であり, 流量の関数として表現する. また, q は電力消費量を表す関数であり, 同様に流量の関数として表現する.

3.1.2 可変速ポンプ 運転時における性能特性を次式のように表す.

$$\left. \begin{aligned} G_{PVi} - G_{PV0} &= 0 \\ P_{PVi} - P_{PV0} + g_{PV}(G_{PVi}, R_{PV}) &= 0 \\ E_{PV} &= s_{PV}(G_{PVi}, R_{PV}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで, g はポンプの性能特性を表す関数であり, 流量および回転数比の関数として表現する. また, s は電力消費量を表す関数であり, 同様に流量および回転数比の関数として表現する.

3.1.3 配管 配管の性能特性を次式のように表す.

$$\left. \begin{aligned} G_{PPi} - G_{PP0} &= 0 \\ P_{PPi} - P_{PP0} - h_{PP}(G_{PPi}) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, h は配管の圧力損失を表す関数であり, 流量の関数として表現する.

3.1.4 配管分岐・合流点 M 本の配管から N 本の配管への分岐・合流点において, 次式を考慮する.

$$\left. \begin{aligned} \sum_{m=1}^M G_{JTmi} - \sum_{n=1}^N G_{JTno} &= 0 \\ P_{JTli} - P_{JTmi} &= 0 \quad (m = 2, 3, \dots, M) \\ P_{JTli} - P_{JTno} &= 0 \quad (n = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここでは, 配管が十分に長く, 分岐・合流点の圧力損失が配管の圧力損失と比較して十分に小さいものと仮定し, 分岐・合流点の圧力損失を無視する.

3.2 接続および境界条件 上記の機器の性能特性に加えて, 機器間の流量および圧力バランスを表す接続条件, ならびにシステムの境界における流量および圧力に関する境界条件を考慮する. 具体的な境界条件として, 各ポンプ入口における圧力, ならびに配水池入口における圧力および流量を与える.

3.3 性能分析手法 性能分析の手順を図3に示す. 2.2.1項で述べたように, 配水池への流量の各離散値に対してシステム性能を分析し, 配水池への流量と最小電力消費量の関係を求める. その際に, 複数のポンプの運転・停止によってシステム性能が不連続に変化するため, 列挙法によって最適なポンプの運転・停止を決定する. すなわち, 配水池への流量を満足するポンプの運転・停止のすべての組合せについてシステム性能を分析し, 電力消費量を比較することによってそれを最小化する運転・停止の組合せを選択す

る. また, ポンプの運転・停止の各組合せにおいて, 運転するポンプに複数の可変速ポンプが含まれる場合には, 配水池への流量を満足する回転数比の組合せに代替性が存在するため, 非線形計画法によって電力消費量を最小化する回転数比の組合せを決定する. そのために, 大域的準最適解を導出することができるモードトリミング法を適用する⁽⁶⁾. さらに, ポンプの運転・停止および回転数比の各組合せについて, 3.1および3.2節で述べた流量および圧力バランスから成る非線形代数方程式を解き, すべての点の流量および圧力, ならびに電力消費量を決定する. そのために, ニュートン-ラフソン法を適用する.

性能分析のためのモデル化をビルディングブロック方式によって行う⁽⁷⁾. すなわち, 各機器の性能特性を表す要素モデルを独立に定義し, システムモデルを要素モデル, 接続条件, および境界条件から構成する. これによって, システム全体のモデル化を柔軟かつ容易に行うことができる.

4. 最適運用計画の詳細

4.1 配水池性能特性のモデル化 配水池を含むシステムについて一日を周期とした最適運用計画を行うために, 3章の性能分析で除外した配水池について性能特性のモデル化を行う. ここでは, 一日を K 個のサンプリング時間間隔 Δt に離散化し, 各サンプリング時間について運用方策を決定する. このとき, 配水池の水量バランスは, 次式のように表される.

$$\left. \begin{aligned} \{V_{RS}(k) - V_{RS}(k-1)\} / \Delta t &= G_{RSi}(k) - G_{RS0}(k) \\ V_{RS} &\leq \bar{V}_{RS}(k) \leq \bar{V}_{RS} \\ (k &= 1, 2, \dots, K) \\ V_{RS}(0) &= V_{RS}(K) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, V_{RS} は貯水量, $\bar{V}_{RS}$ および $\underline{V}_{RS}$ はそれぞれ V_{RS} の上・下限値である. また, (k) は各サンプリング時間を表す指標である.

4.2 最適運用計画手法 配水池を除外したシステ

Fig. 3 Procedure for performance analysis and optimization

ムについて、3章の性能分析によって配水池への流量 G_{RSi} と最小電力消費量 E^* の関係が次式のように求められているものとする。

$$E^*(k) = z(G_{RSi}(k)) \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (6)$$

ここで、 z は最小電力消費量の配水池への流量に関する関数である。ただし、配水池への流量は離散値のみを取るものと仮定し、次のように表す。

$$G_{RSi}(k) \in \{0, \Delta G, 2\Delta G, \dots, I\Delta G\} \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (7)$$

ここで、 ΔG は流量の離散化幅、および I は整数である。同様に、配水池からの流量、すなわち配水需要量も離散値のみを取るものと仮定し、次のように表す。

$$G_{RSO}(k) \in \{0, \Delta G, 2\Delta G, \dots, J\Delta G\} \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (8)$$

ここで、 J は整数である。その結果、貯水量も次のように離散値のみを取る。

$$V_{RS}(k) \in \{V_{RS}, \dots, (j-1)\Delta G\Delta t, j\Delta G\Delta t, (j+1)\Delta G\Delta t, \dots, V_{RS}\} \quad (k = 0, 1, \dots, K) \quad (9)$$

ここで、 j は整数である。

省エネルギーおよび省コストの観点から、最小化すべき目的関数としてそれぞれ一日の電力消費量 $\mathcal{E}$ および電力従量料金 $\mathcal{R}$ を採用し、次式のように表す。

$$\mathcal{E} = \sum_{k=1}^K E^*(k)\Delta t \quad (10)$$

$$\mathcal{R} = \sum_{k=1}^K r(k)E^*(k)\Delta t \quad (11)$$

ここで、 r は電力従量料金単価である。

上記の最適運用計画問題は、図4に示すように、配水池への流量 G_{RSi} を決定変数、貯水量 V_{RS} を状態変数、および電力消費量 E^* あるいは電力従量料金 rE^* を利得とする多段決定過程として表すことができる。また、この問題は、決定および状態変数、ならびに段を離散的に扱う動的計画法によって解くことができる。ただし、式(5)に示すように、貯水量の一日の初期値と終端値が等しいという周期条件を考慮しながら解く必要がある。

Fig. 4 Multistage decision process

5. 適用事例

5.1 対象システム 適用事例として、図5に示す送水システムについて検討する。取水場としてAおよびBの2箇所があり、Aには同種の固定速ポンプ3台PC1～3が設置され、Bには同種の変速ポンプ2台PV1、2が設置されている。また、2箇所の取水場から配管PP1～3および配管分岐・合流点JT1～3を通じて、終端に設置された配水池RSに送水を行う。さらに、配水池から需要量に合わせて配水を行う。

5.2 検討条件

5.2.1 基本条件 最適運用計画における配水池への流量 G_{RSi} の離散化幅 $\Delta G = 300 \text{ m}^3/\text{h}$ とする。また、サンプリング時間数を $K = 24$ 、およびサンプリング時間間隔を $\Delta t = 1 \text{ h}$ とする。

5.2.2 性能特性値 固定速ポンプPC1～3の性能特性および電力消費量を表す関数を、次式のようにそれぞれ流量の二次および一次関数によって表現する。

$$f_{PC}(G_{PCi}) = a_{PC} - b_{PC}G_{PCi}^2 \quad (12)$$

$$q_{PC}(G_{PCi}) = c_{PC} + d_{PC}G_{PCi} \quad (13)$$

ここで、 $a \sim d$ は定数である。

可変速ポンプPV1、2の性能特性および電力消費量を表す関数を、同様にそれぞれ流量の二次および一次関数によって表現する。ただし、流量、圧力、および電力消費量がそれぞれ回転数の一乗、二乗、および三乗に比例することに基づき、性能特性および電力消費量を表す関数を、回転数比による依存性を考慮し、次式のように表現する。

$$g_{PV}(G_{PVi}, R_{PV}) = a_{PV}R_{PV}^2 - b_{PV}G_{PVi}^2 \quad (14)$$

$$s_{PV}(G_{PVi}, R_{PV}) = c_{PV}R_{PV}^3 + d_{PV}R_{PV}^2G_{PVi}^2 \quad (15)$$

配管の圧力損失を表す関数を、Hazen-Williamsの式⁽⁸⁾に基づき、次式のように表現する。

$$h_{PP}(G_{PPi}) = e_{PP}G_{PPi}^{1.85}L_{PP}/D_{PP}^{4.87} + H_{PP} \quad (16)$$

Fig. 5 Example configuration of water supply system

ここで、 L は配管長、 D は配管直径、 H は配管出入口の高低差による圧力ヘッド差、および e は定数である。

配水池については、配水需要量の急激な変化を考慮し、貯水量下限値 V_{RS} として必要最小限の値を与える必要があるが、最適運用計画には影響を与えないため、ここでは $V_{RS} = 0 \text{ m}^3$ とする。一方、貯水量上限値 $\bar{V}_{RS}$ はパラメータとして変化させ、これが最適運用計画に与える影響を調べる。

式(12)～(16)の各関数に含まれる定数の値を表1のように設定する。

5.2.3 電力従量料金 電力従量料金については、一定および時間帯別料金を採用する。なお、一日の電力消費量を最小化する場合には、最適運用計画が電力従量料金に依存しないため、一定および時間帯別料金を採用する場合の解は一致する。また、一定料金を採用する場合には、電力従量料金が電力消費量に比例するため、一日の電力消費量および電力従量料金を最小化する場合の解は一致する。したがって、ここでは一定および時間帯別料金を採用し、一日の電力従量料金を最小化する。電力従量料金単価を表2のように設定する。

5.2.4 配水需要量 配水池からの配水需要量の時間変化を、図6に示すように与える。配水需要量の平

均値は $6.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ である。

5.3 検討結果および考察

5.3.1 性能分析 ポンプの運転・停止のすべての組合せについて性能分析を行い、それによって得られた配水池への流量と電力消費量の関係を図7に示す。ここで、固定速ポンプのみを運転する場合のポンプの運転・停止の各組合せについては、条件として与えられた流量を満たすことができないので、図には含まれていない。また、可変速ポンプの運転台数が1台の場合のポンプの運転・停止の各組合せについては、流量および圧力バランスから成る非線形代数方程式を解いている。さらに、可変速ポンプの運転台数が複数の場合のポンプの運転・停止の各組合せについては、上記の非線形代数方程式を解きながら、可変速ポンプの回

Fig. 6 Water demand

Table 1 Performance characteristic values

Equipment	Value
PC1~3	$a_{PC} = 40.0$ mAq
	$b_{PC} = 3.083 \times 10^{-6}$ mAq/(m³/h)²
	$c_{PC} = 150.0$ kW
	$d_{PC} = 19.45 \times 10^{-3}$ kW/(m³/h)
PV1, 2	$a_{PV} = 50.0$ mAq
	$b_{PV} = 3.472 \times 10^{-6}$ mAq/(m³/h)²
	$c_{PV} = 180.0$ kW
	$d_{PV} = 16.67 \times 10^{-3}$ kW/(m³/h)
PP1~3	$e_{PP} = 470.2 \times 10^{-12}$
PP1	$L_{PP} = 1000$ m
	$D_{PP} = 0.8$ m
	$H_{PP} = 0.0$ mAq
PP2	$L_{PP} = 1000$ m
	$D_{PP} = 0.8$ m
	$H_{PP} = 0.0$ mAq
PP3	$L_{PP} = 1000$ m
	$D_{PP} = 1.2$ m
	$H_{PP} = 15.0$ mAq

Table 2 Electricity rates

Structure	Rate
Flat	$r(k) = 10.47 \text{ yen/kWh} \quad (k = 1, \dots, 24)$
Time-of-use	$r(k) = \begin{cases} 6.05 \text{ yen/kWh} & (k = 1, \dots, 8, 23, 24) \\ 13.50 \text{ yen/kWh} & (k = 9, \dots, 13, 17, \dots, 22) \\ 14.60 \text{ yen/kWh} & (k = 14, \dots, 16) \end{cases}$

Fig. 7 Performance of pumps and piping

転数比を変数として電力消費量の最小化を行っている。

ポンプの運転・停止の各組合せにおいて、流量と電力消費量の関係は放物線状に変化している。その結果、単位電力消費量当たりの流量の値（ここでは効率と呼ぶ）が変化し、中流量で高く、小および大流量で低くなる。最下の曲線群が、電力消費量を最小化するポンプの運転・停止の組合せに対応する配水池への流量と電力消費量の関係、すなわち式(6)の関係を与える。この曲線群においても、流量と電力消費量の関係が全体的に放物線状に変化している。また、ポンプの運転・停止の各組合せにおいて、効率が高くなる範囲の曲線が選択されている。

5.3.2 一定料金下の最適運用計画 電力従量料金として一定料金を採用した場合に、配水池の貯水量上限値 $\bar{V}_{RS}$ をパラメータとして、一日の電力従量料金を最小化するように最適運用計画を行い、それによって得られた結果を図8に示す。(a)～(c)は、それぞれ $\bar{V}_{RS} \geq 13.8 \times 10^3 \text{ m}^3$ の場合のポンプの運転・停止、配水池への流量、および貯水量の時間変化を示す。この結果は、一日の電力消費量を最小化することによって得られる結果と一致する。

配水池への流量の時間変化によれば、 $\bar{V}_{RS} = 0 \text{ m}^3$ の場合には、当然配水池への流量は配水需要量に一致する。 $\bar{V}_{RS}$ の増大に伴って、配水池への流量の時間変化が小さくなる。すなわち、配水池を有効に利用し、一日の配水需要量を満足する範囲内で、効率の高い点でポンプが運転されるようになる。例えば、 $\bar{V}_{RS} \geq 13.8 \times 10^3 \text{ m}^3$ の場合には、 $G_{RSi} = 6.3 \times 10^3$ および $7.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ の効率の高い点を中心にポンプが運転されている。

貯水量の時間変化によれば、一般的には、配水需要量が増大する直前に貯水量が増大している。その結果、一日に2回の貯水および放水のサイクルが繰り返されており、配水池の容量が小さいことが配水池を有効に利用することによって補われている。ただし、 $\bar{V}_{RS}$ が大きい場合には、効率の高い点を中心にポンプが運転されるために、一日に貯水および放水のサイクルが1回だけになる傾向がある。

なお、 $\bar{V}_{RS} = 3 \times 10^3$ と $6 \times 10^3 \text{ m}^3$ の場合における24:00(0:00)の配水池への流量および貯水量の逆転は、最適解の唯一性が保証されていないためと考えられる。すなわち、図6によると、23:00～2:00の配水需要量が同じであるため、この間の3つのサンプリング時間において最適運用方策に代替性が生じるためと考えられる。 $\bar{V}_{RS} = 3 \times 10^3 \text{ m}^3$ の場合には、配水池への流量が23:00～24:00に増大し、0:00～2:00に減少しているが、それぞれのサンプリング時間を変更しても目的関数の値は変

化しない。一方、 $\bar{V}_{RS} = 6 \times 10^3 \text{ m}^3$ の場合には、配水池への流量が23:00～24:00に減少し、0:00～2:00に増大しているが、それぞれのサンプリング時間を変更しても目的関数の値は変化しない。

5.3.3 時間帯別料金下の最適運用計画 電力従量料金として時間帯別料金を採用した場合に、配水池の

(a) On/off status of pumps ($\bar{V}_{RS} \geq 13.8 \times 10^3 \text{ m}^3$)

(b) Flow rate

(c) Storage level

Fig. 8 Optimal operational strategy of case with flat rate

貯水量上限値 $\bar{V}_{RS}$ をパラメータとして、一日の電力従量料金を最小化するように最適運用計画を行い、それによって得られた結果を図9に示す。(a) ~ (c) は、それぞれ $\bar{V}_{RS} \geq 43.2 \times 10^3 \text{ m}^3$ の場合のポンプの運転・停止、配水池への流量、および貯水量の時間変化を示す。

配水池への流量の時間変化によれば、電力従量料金

(a) On/off status of pumps ($\bar{V}_{RS} \geq 43.2 \times 10^3 \text{ m}^3$)

(b) Flow rate

(c) Storage level

Fig. 9 Optimal operational strategy of case with time-of-use rate

が夜間に安価で、昼間に高価であるため、 $\bar{V}_{RS}$ の増大に伴って配水池への流量が夜間に増大し、昼間に減少するようになる。例えば、 $\bar{V}_{RS} \geq 43.2 \times 10^3 \text{ m}^3$ の場合には、夜間に $G_{RSi} = 9.9 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ の最大流量の効率の低い点で、昼間に $G_{RSi} = 3.0 \times 10^3$ および $5.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ の効率の高い点を中心にポンプが運転されている。特に、電力従量料金が高価となる時間帯には、 $G_{RSi} = 3.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ の効率が高く、電力消費量が小さくなる点でポンプが運転されている。

貯水量の時間変化によれば、 $\bar{V}_{RS}$ が小さい場合には、配水池の容量が小さいことを配水池を有効に利用することによって補うために、一日に2回の貯水および放水のサイクルが繰り返される傾向がある。しかしながら、一般的には、一日に貯水および放水のサイクルが1回だけになる。これは、夜間の安価な電力従量料金を有効に利用するために、夜間に配水池への流量を増大させるためである。

5.3.4 電力消費量および電力従量料金の比較 図10は、電力従量料金として一定および時間帯別料金を採用した場合に、一日の電力従量料金の最小化によって得られる一日の電力消費量と貯水量上限値 $\bar{V}_{RS}$ の関係を示したものである。

一定料金を採用した場合には、 $\bar{V}_{RS}$ の増大に伴って電力消費量が減少し、 $\bar{V}_{RS} = 13.8 \times 10^3 \text{ m}^3$ で最小値に達する。一方、時間帯別料金を採用した場合には、電力消費量は最小値よりは大きい、 $18.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ までは $\bar{V}_{RS}$ の増大に伴って減少する。しかしながら、 $\bar{V}_{RS}$ が $18.0 \times 10^3 \text{ m}^3$ より大きくなると、電力消費量は増大するようになる。これは、前述のように夜間に効率の低い

Fig. 10 Comparison of power consumption between cases with flat and time-of-use rates

Fig. 11 Comparison of electricity cost between cases with flat and time-of-use rates

点でポンプが運転されるようになるためである。

図11は、図10に対応して、電力従量料金として一定および時間帯別料金を採用した場合に、一日の電力従量料金の最小化によって得られる一日の電力従量料金と貯水量上限値 $\bar{V}_{RS}$ の関係を示したものである。

一定料金を採用した場合には、電力従量料金は電力消費量に比例するため、 $\bar{V}_{RS}$ の増大に伴って電力従量料金が減少し、 $\bar{V}_{RS} = 13.8 \times 10^3$ m³で最小値に達する。一方、時間帯別料金を採用した場合には、 $\bar{V}_{RS}$ の増大に伴って夜間の安価な電力従量料金を有効に利用することができるようになり、電力従量料金は大幅に減少する。

6. 結 言

本研究では、送水系統が最終的に一系統になり、終端に配水池が設置されている送水システムについて、ポンプおよび配管の性能特性の非線形性、複数のポンプの運転・停止および回転数に関する運用方策の代替性、ならびに配水池の一日の運用方策を総合的に考慮しながら、最適運用計画を行うための一方法を提案した。大規模で複雑な最適運用計画問題の解の導出を行うために、2段階アプローチを提案し、配水池を除外したシステムについて性能分析を行うとともに、その結果に基づき配水池を含むシステムについて一日の最

適運用計画を行う方法を提示した。また、一つの適用事例によって本方法の有効性について検討した。電力従量料金として一定および時間帯別料金を採用した場合に、一日の電力従量料金を最小化する最適運用計画を行い、配水池の容量によるポンプおよび配水池の運用方策、ならびに電力消費量および電力従量料金の変化の特徴を明らかにし、本方法によって合理的に運用計画を行うことができることを示した。

なお、適用事例における性能分析については、機器性能特性として一般的に用いられる流量および圧力バランスのモデルに基づいて検討した。実在する送水システムの性能分析への本方法の適用、ならびに実データとの比較検討については、今後の研究課題としたい。

文 献

- (1) Hatakeyama, J., Matsumoto, K. and Taniguchi, H., Optimization of Distribution of Flow and Pressure in Water Network, *Trans. IEE Japan*, **98-9**, C (1978), 289-296, (in Japanese).
- (2) Ohsato, A., Yamaguchi, H., Sekiguchi, T., Saito, S. and Kodate, H., A Hierarchical Optimization on a Wide Water Supply System With Transport Delay, *Trans. IEE Japan*, **99-5**, C (1979), 103-110, (in Japanese).
- (3) Saito, S., Optimization of Water-Supply System and Reflections on Identification of Weighting Factors, *Trans. SICE*, **19-6** (1983), 472-479, (in Japanese).
- (4) Kurisu, H., Nishiya, T., Tachi, N. and Adachi, H., A Dynamic Distribution Method Composed of Mathematical Programming and Heuristic Method and Its Application to Water Management, *Trans. SICE*, **30-2** (1994), 198-207, (in Japanese).
- (5) Sakamoto, Y., Kurokawa, F., Sano, M., Yamada, T., Ashiki, T. and Yuki, H., Quasi-Optimization of Water Distribution Scheduling Based on GA, *Trans. IEE Japan*, **120-8/9**, D (2000), 987-999, (in Japanese).
- (6) Yokoyama, R. and Ito, K., Modal Trimming Method for Improving Local Optima of Nonlinear Programming Problems, *Trans. JSME*, **69-688**, C (2003), 3243-3250, (in Japanese).
- (7) Yokoyama, R., Takeuchi, S. and Ito, K., Thermoeconomic Analysis and Optimization of a Gas Turbine Cogeneration Unit by a Systems Approach, *Proc. ASME Turbo Expo 2005*, Paper No. GT2005-68392 (2005), 1-7.
- (8) Japan Society of Civil Engineers, *Formulary for Hydroscience*, 1999 Ver. (1999), Japan Society of Civil Engineers, (in Japanese).