

## <研究発表>

### 環境負荷を考慮する水運用計画支援システムの提案

堂上 悠介<sup>1</sup>、福本 恭<sup>2</sup>、栗栖 宏充<sup>3</sup>、原直樹<sup>4</sup>、田所秀之<sup>5</sup>

株式会社 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:dohgami@sdl.hitachi.co.jp<sup>1</sup>, fukumoto@sdl.hitachi.co.jp<sup>2</sup>, kurisu@sdl.hitachi.co.jp<sup>3</sup>)  
 情報システム事業部(〒319-1293 茨城県日立市大みか町五丁目 2 番 1 号  
 E-mail:naoki.hara.vh@hitachi.com<sup>4</sup>, hideyuki.tadokoro.dw@hitachi.com<sup>5</sup>)

#### 概要

環境問題への関心が高まるにつれて、上水道事業においても従来の安全・安定した水の供給を満足するだけでなく、水運用に要す環境負荷を低減する技術への要求が増している。環境負荷として運用に要す消費電力量に着目する。従来の運用条件のみを考慮していた水運用計画で消費電力量を追加して考慮しようとする、運用条件と消費電力量の目的関数がトレードオフ関係となるため目的関数間の調整が困難となる。目的関数間の調整を対話的に行う多目的計画法を適用し、運用条件と消費電力量を同時に考慮する水運用計画支援システムを提案する。

キーワード: 多目的、消費電力量、水運用計画、環境負荷、トレードオフ

#### 1.はじめに

日本の水道事業は規模の拡張や水道普及率の向上を目指してきたが、水道普及率がほぼ 100%に達したため維持管理の時代へ移行している。近年は、安全・安定した水の供給を維持しながらも地球温暖化などの深刻化する環境問題に貢献するため環境負荷低減への要求が増している。水道のあるべき将来像を纏めた『水道ビジョン』<sup>1)</sup>においても、水道事業での環境負荷を低減するために「単位水量当たり電力使用量を 10%削減する」などの省エネルギーを実現するための施策目標を掲げている。

水運用に要す消費電力量のうち送配水での消費電力量が約8割を占める。本研究では、水運用での省エネルギーを実現するために送水に要す消費電力量に着目し、環境負荷を考慮する水運用計画支援システムを検討する。

管路の流量や配水池の貯水量の計画値を作成する水運用計画の立案を数理計画問題として解くとき、ある目的関数を設定することで最適化問題として扱うことができる。通常、最適化問題を解くときは単一の目的関数を設定して、解を求める。目的としたい対象が複数ある場合でも事前に目的間の重みを設定し単一の目的関数として解くので、解は一意に決まってしまう。消費電力量と水量(管路での流量と配水池での貯水量)など目的間の単位すら異なるときは、複数の目的間の重みの適切な値を事前に決ることが特に困難となりオペレータにとって満足な解は得られ難くなる。例えば、線形計画法と動的計画法を組み合わせる『動力費最小化を目的とした送水ポンプ運転計画手法の検討』<sup>2)</sup>では、一度立案した水量や消費電力の計画値にオペレータが不満を持ったとしても、立案後の計画値の変更までは考慮していない。

複数の目的間の重みの設定の難しさを解決する最適化手法として、多目的計画法が存在する。多目的計画法では、

目的関数が複数存在しても、単一の目的関数にせず複数の目的関数を保持したまま最適化計算を行い、目的関数間のトレードオフ分析をしながら候補となる解の中からオペレータにとって満足な解を選択することができる。

本研究発表では、多目的計画法を適用し消費電力量と水量に対して独立に目的関数を設定し目的関数間のトレードオフ分析を行うことで、消費電力量と水量を同時に考慮しながらオペレータが満足する立案を行う水運用計画支援システムを提案する。

#### 2.多目的計画法の概要と適用方針

『多目的計画法の理論と応用』<sup>3)</sup>で述べられているように、評価尺度が複数あるモデルでは、通常目的が複数あり「あちらの目的を立てればこちらの目的がたたく」と、それぞれの目的にとってよりよい状態が相反する場合が多い。意思決定者にとっての価値判断の問題は「あちらの目的をどの程度達成してこちらの目的をどの程度犠牲にするか?」という匙加減問題(トレードオフ分析に相当)になる。このような場合、多目的計画法では、Fig.1 に示した Pareto 解集合と呼ぶ「全ての目的を同時によくすることができない」解の集合を求め、Pareto 解集合の中から対話的操作により意思決定者にとって最も好ましい解を選択する。

送水に要す消費電力量を考慮する水運用計画は、単に消費電力量を考慮するだけでなく施設にとって好ましい水量となる計画値を作成しなければならず目的が複数あるので、多目的計画法の特長を活用することができる。「送水に要す消費電力量を削減したい」「ある管路の流量を減少したい」などの目的に対してそれぞれ目的関数を設定し、複数の目的関数を保持したまま最適化問題として解を求め、Pareto 解集合内で計画値をトレードオフ分析する水運用計画によりオペレータにとって満足できる計画値に決めることができる。

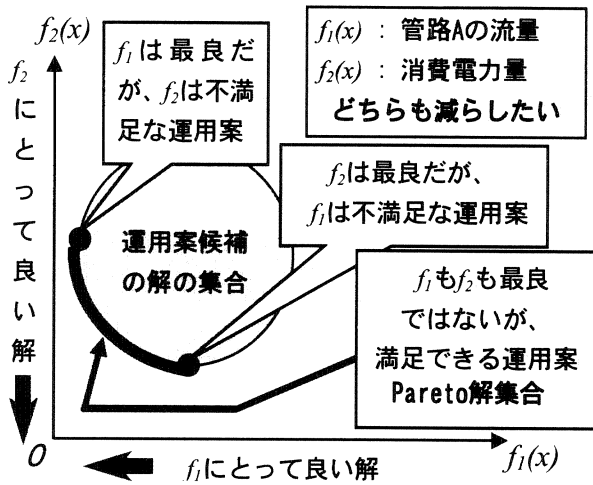


Fig. 1 目的が2つのときのPareto解集合

多目的計画法は、Pareto 解集合内にある解をトレードオフ分析しながらオペレータにとって好ましい解を選択できるが、目的関数の数が増えるほどトレードオフ分析の感度が悪化する傾向がある。さらに、目的関数が増加しすぎると全ての目的関数に対する解を操作画面上に表示できなくなり、解の変更を見ながらのトレードオフ分析できなくなる。

消費電力量を考慮したトレードオフ分析をより効果的に行うため、多目的計画法を水運用計画へ適用した『広域水運用計画への対話型多目的計画法の応用』<sup>4)</sup>のように水運用計画を日間単位と時間単位に分割して行う。日間単位計画に多目的計画法を適用し、トレードオフ分析を効果的に行うために多目的計画法の目的とする対象を管路の流量と水系全体の送水に要す消費電力量に限定する方針とする。すなわち、日間単位計画では、選択した管路の流量と送水に要す総消費電力量に対してそれぞれ目的関数を設定し、日間単位の需要量などの運用条件を満足する計画値を作成する。時間単位計画では、日間単位の計画値を基にして指定流量を作成し、時間単位の需要量などの運用条件を満足する計画値を作成する。日間単位計画を基にした指定流量を作成することで、消費電力量を考慮した日間単位計画の計画値の結果を反映しながら、管路の平滑化や日間単位での配水池の水位回復なども実現できる時間単位の計画値が得られる。

### 3.水運用計画の定式化

一般に、水運用計画をモデル化して数理計画問題として解くとき、配水池や分岐点や需要点をノードとして、管路をアークとして表現する。

日間単位計画では多目的計画法を利用し、複数の目的関数を最小化するときには式(1)と定式化できる。

$$\begin{aligned} & \max \omega_i (f_i(X) - \bar{f}_i) + \alpha \sum_{i=1}^p \omega_i (f_i(X) - \bar{f}_i) \rightarrow \min \\ \text{s.t.} & \begin{cases} AX = B \\ L \leq X \leq U \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

$A$  は空間的な水系ネットワークの接続関係を表す行列、 $X$  はアークに対する日間単位の流量を表すベクトル、 $B$  は各ノードに対する日間単位の需要量を表すベクトル、 $\alpha$  ( $10^{-6}$  のような十分小さな値) は Tchebychev スカラー化関数、 $L$  はアークの日間単位の下限、 $U$  はアークの日間単位の上限、 $i$  は目的とする対象、 $f_i(X)$  は目的の目的関数、 $\bar{f}_i$  は目標関数の目標値、とする。

ある管路の流量を目的とする目的関数は式(2)となり、

$$f_k(X) = X_k \quad (k \in i) \quad (2)$$

目的と選択した管路  $k$  での流量の大きさをほぼ等しくするため日間単位の流量  $X$  の重み  $\omega$  を選択した管路の上下限幅の逆数となる式(3)とする。

$$\omega_i = \frac{1}{U_k - L_k} \quad (k \in i) \quad (3)$$

単位水量当たりの送水に要す消費電力量が線形近似で表現できる仮定すると、送水に要す消費電力量を目的とする目的関数は式(4)となる。

$$f_\varepsilon(X) = \sum_{j=1}^{en} e_j X_j \quad (\varepsilon \in i) \quad (4)$$

$j$  は送水に消費電力量を要す管路、 $e$  は送水に消費電力量を要す管路の単位水量当たりの消費電力量を線形近似した係数、 $en$  は送水に消費電力量を要す管路の総数、とする。目的とした消費電力量の大きさも目的とした流量の大きさとほぼ等しくするために、消費電力量の重みを送水に消費電力量を要す管路のうち上下限幅が最大の管路の逆数となる式(5)とする。

$$\omega_\varepsilon = \frac{1}{\max(U_j - L_j)} \quad (\varepsilon \in i, j = 1 \sim en) \quad (5)$$

以上より、流量と消費電力量を目的関数、運用条件を制約式、で表現できた。補助的Min-Max問題に変換し、補助的Min-Max問題の式(6)を解き初期日間計画を導く。

$$\begin{aligned} & z + \alpha \sum X_i / (U_i - L_i) \rightarrow \min \\ \text{s.t.} & \begin{cases} X_i - (U_i - L_i)z \leq \bar{f}_i \quad (i \in N_{obj}) \\ \sum_{j=1}^{en} e_j X_j - \frac{1}{\omega_\varepsilon} z \leq \bar{f}_\varepsilon \quad (\varepsilon \in N_{obj}) \\ AX = B \\ L \leq X \leq U \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

求めた日間単位の計画値から Pareto 解集合の中から計画値を変更する場合、 $k$  回目の目標値  $f^{(k)}$  のうち、目的  $q$  に対する目標値を  $\bar{f}_q$  と新たに設定する。 $\Delta f_q^{(k)} = \bar{f}_q - f_q^{(k)}$  に対して、 $\mathcal{G}$  に関するパラメトリック最

適化問題となる式(7)を逐次解くことで新たな目標値設定後のトレードオフ分析後の計画値を求めることができる。

$$\begin{aligned}
 & z \rightarrow \min \\
 & \text{s.t.} \begin{cases} X_q \leq f_q^{(k)} + \mathcal{G}\Delta f_q^{(k)} \\ X_i - \beta_i(U_i - L_i)z \leq f_i^{(k)} \quad (i \in N_{obj} \setminus \{q\}) \\ \sum_{j=1}^{en} e_j X_j - \frac{1}{\omega_\varepsilon} z \leq f_\varepsilon^{(k)} \quad (\varepsilon \in N_{obj} \setminus \{q\}) \\ AX = B \\ L \leq X \leq U \end{cases} \quad (7)
 \end{aligned}$$

さらに、 $k$  回目と  $k-1$  回目の中間の計画値を保存して置き、簡単な操作性で Pareto 解集合内の解の変更を行う操作画面とすることで両者の中間値を連続的に見ながら確認することができる。

時間単位計画では、アークとノードの接続関係を時間単位で層を成す多層のネットワークと見立て、最小費用流問題として解く。配水池へ流入する管路に対して日間単位の計画値を時間総数で割った値を指定流量値とすることで、日間単位の計画値を保存しながら時間単位の運用条件を満足する計画値が得られる。

#### 4. シミュレーションによる実験

多目的計画法の適用方針と定式化を検討した水運用計画の有効性を検証するためにシミュレーションによる実験を行う。

対象とする水系は、水系内で水融通が可能となるネットワークを構成するように任意に作成した。シミュレーション用に作成した Fig.3~5 の操作画面上の水系図(画面の右下)の記号はそれぞれ Table1 の施設を表現している。

Table 1 水系図の記号と施設の対応

記号	施設名
→	管路(アーク)
○	需要点(ノード)
□	取・受水箇所、配水池(ノード) (需要量があってもよい)

作成した水系の3箇所(ポンプ)にポンプを設け送水に要す消費電力量が発生する管路とし、単位水量当たりの消費電力量はそれぞれ Table.2 とする。

Table 2 消費電力量が発生する管路

施設名	単位水量当たりの消費電力量
ポンプA	1 (Wh/t)
ポンプB	2 (Wh/t)
ポンプC	3 (Wh/t)

今回の実験での水運用計画の目的は、4つの取・受水箇

所からの流量と送水に要す総消費電力量の計5つを対象として、Fig.2 の手順フローに従い実験を行った。

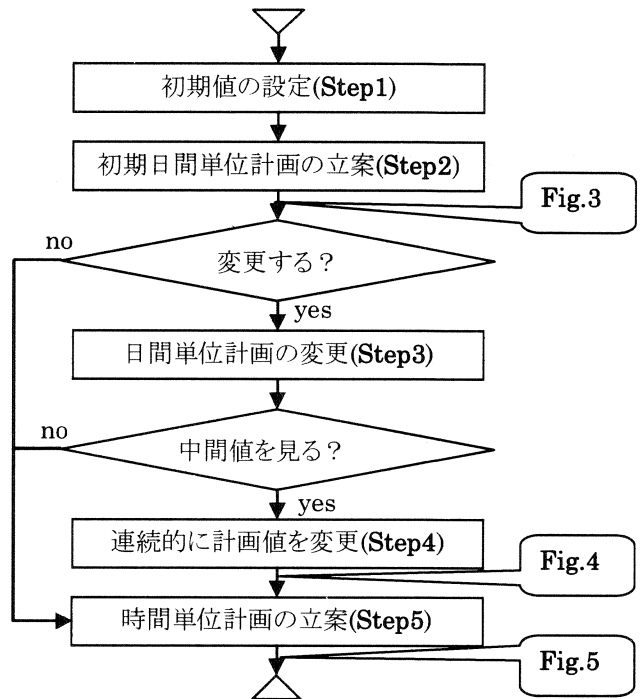


Fig. 2 水運用計画の手順フロー図

**Step1 初期値の設定:** 目的と設定した箇所に対して目標値を設定する。今回の実験では全ての目的に対して、目標値を手動で設定したが、過去の実績などから自動的に設定することも可能である。

**Step2 初期日間単位計画の立案:** 与えた目標値に対して、日間単位の計画値を作成する (Fig.3)。目的に対する日間単位の計画値は、数値と棒グラフで表示している。

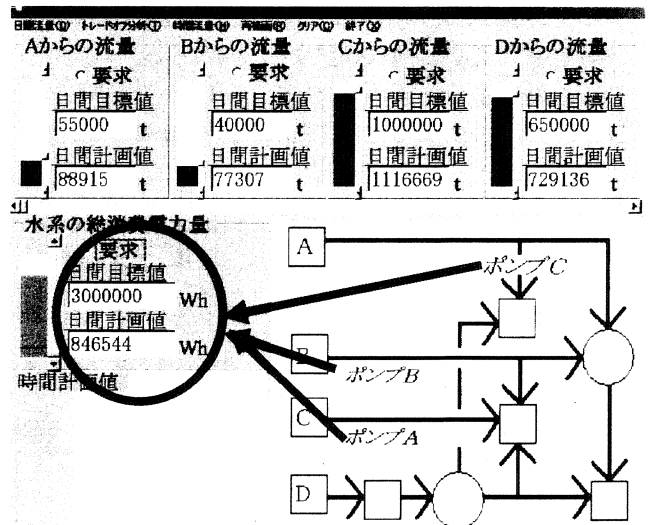


Fig. 3 初期日間単位計画後の操作画面

**Step3 日間単位計画の変更:** 初期の計画値での総消費電力量に不満を持った場合、対象箇所(ノード)に新たな目標値を設定する。

例えば、初期の計画値から消費電力量をできるだけ減少

したいとし、目標値を0に変更し2回目の日間計画を行うと、Pareto 解の中から変更した目標値に対する計画値を作成する(Fig.4)。目的間のトレードオフ分析により、日間単位の総消費電力量は、846,544(Wh)から 615,505(Wh)へ約28%削減した計画値が得られた。

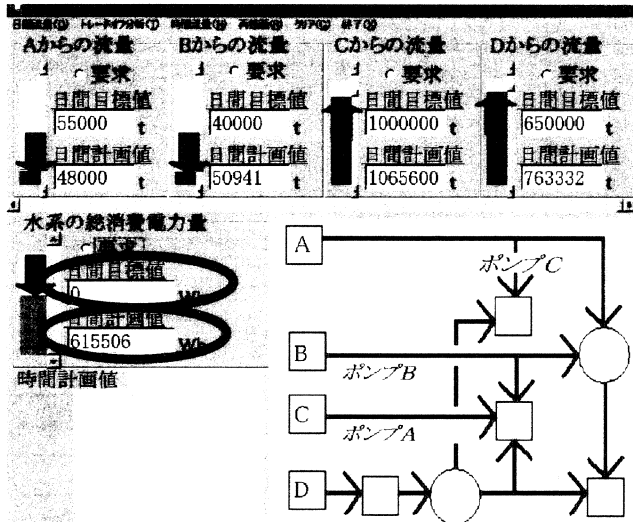


Fig. 4 目標値を変更しての日間単位計画後の操作画面

**Step4.** 連続的に計画値を変更: 必要に応じ、初期の計画値とトレードオフ分析後の計画値の中間の計画値を連続的に変更しながら、オペレータにとって最も満足できる計画値を決定する。

例えば、2回目の計画値では、消費電力量には満足できるようになったが、Dからの流量が 729,136(t)から 763,332(t)へ増加し過ぎたことに不満を持ったとすると、操作画面上の水平スライドバーを左右に移動するだけで、初期の計画値と2回目の計画値の中間値を連続的に確認しながら満足できる計画値に調整することができる。

**Step5.** 時間単位計画の立案: 最も好ましいと判断した日間単位の計画値を基に時間単位の計画値を作成する(Fig.5)。

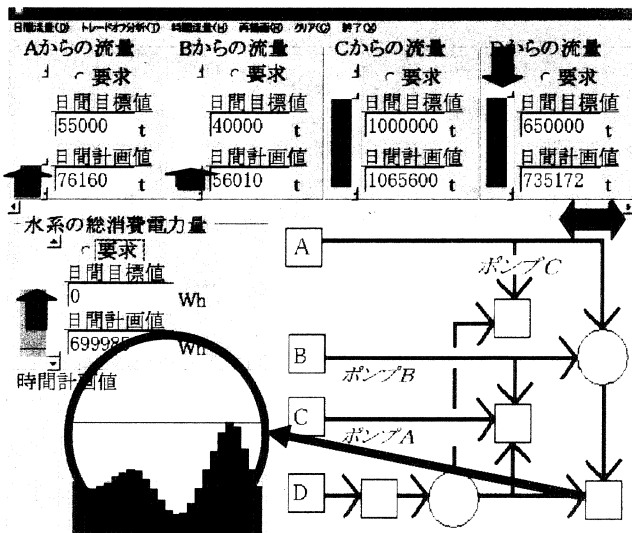


Fig.5 日間計画に基づく時間単位計画後の操作画面

時間単位の計画値では、操作画面の左下に表示されているように各施設(この例ではある配水池の貯水量)の時間単位の運用条件を満たす計画値が得られた。

以上より、水量と送水に要す消費電力量の双方を目的とした水運用計画のシミュレーションを行うことで、消費電力量を変更しながら水量の計画値も作成できる水運用計画を実現することができた。今回の実験では、消費電力量を変更する場合としたが、逆に水量を変更しながら消費電力量の計画値を作成することもできる。

提案水運用計画では、日間単位計画で作成した計画値の時間単位計画への反映方法を、簡単に配水池の流入量に対して全時間切り替えなしで一定と指定した。もし上下限幅が小さく貯水能力に乏しい配水池があれば、流入量を全時間切り替えなしで一定と指定することは難しく切り替えが必要になると考える。よって、貯水能力に乏しい配水池の条件も満足する計画値を作成を検討する必要がある。

## 5. おわりに

環境負荷を考慮した水運用計画支援システムとして、送水に要す消費電力量も考慮する水運用計画の検討を行った。任意に作成した運用条件に対して、線形近似した単位水量に対する消費電力量の係数を基に算出した総消費電力量を削減する水運用計画を作成した。水量と消費電力量を目的に設定し複数の目的関数に対して多目的計画法を用いて定式化し、シミュレーションによる実験を行った。提案水運用支援システムでは、水運用計画立案中に消費電力量を考慮しながら計画値が作成できることを確認した。

今後実際の水運用へ提案水運用支援システムを適用するためには、管路や配水池のより厳しい運用条件での実験や、原水原価などの水運用に要す費用なども目的に増やしたときの多目的計画法の有効性の検証、などが必要になると考える。

## 【参考文献】

- 1) 厚生労働省健康局、“水道ビジョン”、(2004年)
- 2) 上野他、“動力費最小化を目的とした送水ポンプ運転計画手法の検討”、第57回全国水道研究発表会、pp544-545 (2006年)
- 3) 中山他、“多目的計画法の理論と応用”、計測自動制御学会 (1994年)
- 4) 加藤他、“広域水運用計画への対話型多目的計画法の応用”、計測自動制御学会論文集 Vol35、No.2、pp280-287 (1999年)