広域水運用計画への対話型多目的計画法の応用[†]

加藤 博光*・栗栖 宏充*

瀬古沢 照治*・館 仁平**

Interactive Multiple Criteria Programming Applied to Wide Area Water Supply Scheduling

Hiromitsu KATO*, Hiromitsu KURISU*,

Teruji SEKOZAWA* and Nihei TACHI**

We propose a hybrid method using interactive multiple criteria programming and minimum cost flow analysis to make a useful schedule for waterworks. In case of constructing a mathematical model, it is difficult to adjust the model parameters in the actual application, and to make the user satisfied with the solution under the pre-determined parameters. In our research, the parameters are generated automatically based on the abstract plan, in which interactive multiple criteria programming is employed, and then the minimum cost flow is calculated under the generated parameters.

Flexible water supply scheduling is indispensable to assign water using the limited facilities efficiently in various situations. Traditionally, it is a common approach to formulate the minimum cost flow problem to make a schedule. However, good modeling is an essential premise to make a useful plan to distribute water, and elaborate work is necessary for good modeling. It is also difficult to adjust the solution, reflecting the user's aspiration. Multiple criteria programming(MCP) has been proposed to overcome these disadvantages of single-objective optimization. Nevertheless, it is not quite effective to apply MCP to large-scale problem like water supply scheduling because of complexity and formulation difficulty. Using our proposed method, the whole problem can be divided into two parts. In abstract planning, interactive multiple criteria programming is applied to extract the user's request for the intake flow amount by using aspiration levels. Then, cost coefficients of the multi-layered network model are generated automatically based on the abstract plan. Since the minimum cost flow is defined as the flow which can nearly reproduce the abstract plan and minimize the deviation of flow rate, resulting minimum cost flow can satisfy requirements of both reservoir level recovery and flow smoothing. As a result, the proposed method can make an applicable schedule quickly, reflecting the user's aspiration flexibly.

Key Words: multiple criteria programming, minimum cost flow, multi-layered network model, waterworks

1. はじめに

水運用は、水道ネットワークにおいて、一日の取水量、浄水量、及び配水池貯水量を計画するものである。このようなホルダ(holder)を有するネットワーク輸送問題は、多層状の拡張ネットワークモデル(以後、多層ネットモデル)において最小費用流(minimum cost flow)問題に帰着することができる^{1) 3) 4)}。ここで費用(コスト)は数理的なモデリングのため

の概念で、実際に水の輸送にかかるコストである必要はない。また、公共性の高い水道ではコストのような経済性だけでなく、安全性も考慮する必要がある。このように様々な要因を考慮しながらグラフ上の各アークに対してコストを設定する作業は難解となり、実際には適当に値を設定して最適化計算を行い、計画結果を理想的な計画と比べながら試行錯誤的にコストをチューニングすることになる。また、最小費用流問題はアルゴリズム的には解は唯一に決まってしまう、計画立案者の要求に合わせて柔軟に解を修正することが困難である点も課題である。

このような単一目的関数の下での最適化では、定式化した時点で解は暗に決まってしまう、うまくモデリングを行なうことが満足解を得るための前提条件となってしまう。このような問題点を克服するために、複数の目的関数を持つ多目的計画問題として定式化するアプローチが考えられる^{5) 6) 9)}。この場合もベクトル値目的関数を適当に重み付けして加え合

[†] 情報処理学会 第15回数理モデル化と問題解決研究会で発表(1997・9)

* (株)日立製作所システム開発研究所 川崎市麻生区王禅寺1099

** (株)日立製作所大みか工場 日立市大みか町1-55-2

* Systems Development Laboratory, Hitachi Ltd., Asao-ku, Kawasaki

** Omika Works, Hitachi Ltd., Hitachi

(Received January 8, 1998)

(Revised November 19, 1998)

Fig. 1 Overview of Waterworks

わせるようなスカラー化手法をとると、単一目的関数の問題点を本質的に解決できなくなる。この点を解決するために、希求水準 (aspiration level) を用いて意思決定者の選好情報を対話的に引き出し、希求水準にできるだけ近い Pareto 解を求める対話型多目的計画法が提案されている^{7) 8)}。

ところが、多層ネットモデルにおいて水運用をそのまま多目的計画問題として定式化すると、問題が非常に大規模になり、従来解法として応用してきた基底分解法³⁾を利用することもできなくなるため、計算量が膨大になる。さらに、運用指針のモデリングが大規模になればなるほど複雑で困難になることも問題である。

本稿では、以上のような問題点を解決するために、水運用において一般には目的として考えられている配水池水位回復を制約化することにより、日量計画を行なう概要レベルと、時間毎の流量・貯水量を計画する詳細レベルを、それぞれ独立に解くことができることを利用する。このとき概要レベルの計画量を実現する詳細レベルの計画は配水池水位回復を実現することに着目し、概要レベルの計画結果を基にして多層ネットモデルにおけるコストを自動生成し、従来のように最小費用流計算により詳細計画を得る手法を提案する。

以下、第2章では水運用計画の概要を述べる。第3章では従来手法を用いた場合の問題点を詳細に述べる。第4章では、概要レベルと詳細レベルに階層化できることの妥当性を述べ、それぞれのレベルでの解法を示す。第5章では、実在する水道ネットワークのデータを用いて計画立案を行なった結果について議論し、本提案手法の有効性を示す。

2. 水運用計画問題の概要

上水道は管路ネットワークを構成し、水源からの原水取水、浄水場 (water purification plant) への原水の導水、浄水場での原水浄化、浄水の配水池 (water reservoir) への送水、配水池から需要者への配水、といった一連のプロセスによって需要者に水を配るシステムである (Fig. 1)。水の流れは、流量や圧力を監視しながらポンプやバルブによって制御される。需要量は人々の生活のリズムや気温、天候とともに時々刻々、日々変動する一方で、取水ポンプや浄水場は、施設能力や水

利権などの理由から、毎時間一定量を導送水することが望まれている。この変動する需要量と、一定に生産される浄水量の間を調節するバッファの役割を負っている施設が配水池である。よって、配水池は時々刻々その水位を変動させながら送配水を行なうことになる。

しかし、地震被害などの事故発生時の水量確保の観点から、平常時から配水池貯水率はできるだけ高く保っておくことが望まれている。よって運用貯水量の範囲内で水量のやりくりをする必要があり、場合によっては配水池間で連絡し合って水を融通する必要がある。この問題は、水道ネットワークが広域で複雑になるほど難解になる。これを水運用と呼んでいる。特に、渇水に代表される緊急時や、ポンプ点検による運転停止に伴う断水や管路工事のような場合にも、施設状況に応じて柔軟に、取水量や水量配分、配水池運用を迅速に決定する必要がある。このような水道システムの運用に当たって指針となるのは、通常

- 各配水池の水位を早朝に回復する
- 流量平滑化対象管路の流量変動を最小限に止める

である。以後、これらの要求を満足するための計画立案手法について議論する。

3. 従来手法の問題点

水運用計画における基礎方程式は流量保存則である。水系を、浄水場や配水池 (n_R 個) 及び分岐点 (n_J 個) をノード、管路 (n_K 本) をアークとするグラフによって表現する。時刻 t におけるノード i の貯水量を $v_i(t)$ 、アーク j の流量を $x_j(t)$ とすると、流量保存の関係式は

$$v_i(t) - v_i(t-1) = \sum_{j \in N_i^I} x_j(t) - \sum_{j \in N_i^O} x_j(t) - d_i(t) \quad (1)$$

となる。ここで N_i^I はノード i に流入するアークのインデックス集合、 N_i^O はノード i から流出するアークのインデックス集合、 $d_i(t)$ はノード i における時刻 t での需要量を表す。

ここで、Fig. 2 のようにネットワークを時間毎に層状に重ね、層間のアークで貯水量 $v_i(t)$ を表現すると、時間変化も含めた拡張ネットワーク全体を一つの閉じたネットワークとして扱うことができる。これを多層ネットモデル (multi-layered network model) と呼ぶ。このとき $v_i(t)$ はアークの流量変数 $x_i(t)$ と等価であり、式 (1) は

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{x}(t-1) + \mathbf{A}_2 \mathbf{x}(t) = \mathbf{b}(t) \quad (2)$$

と書き直すことができる。ただし、 $m = n_R + n_J$ 、 $n = n_R + n_K$ として、

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} -I & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_2(t) = \begin{pmatrix} I & A_R \\ 0 & A_K \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T \quad (5)$$

Fig. 2 Multi-Layered Network(MLN) Model

$$\mathbf{b}(t) = (-d_1(t), -d_2(t), \dots, -d_m(t))^T \quad (6)$$

であり、 I は配水池間を結ぶ層間のアークを意味する n_R 次元単位行列、 A_R は配水池に流出入する管路を表す接続行列、 A_K は配水池以外の分岐点に流出入する管路を表す接続行列である。

式(2)を時刻1から最終時刻 T まで積み重ねるとき、

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \\ & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \\ & & \dots & \dots \\ & & & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{x} = (\mathbf{x}(1), \mathbf{x}(2), \dots, \mathbf{x}(T))^T \quad (8)$$

$$\mathbf{b} = (\mathbf{b}(1) + \mathbf{x}(0), \mathbf{b}(2), \dots, \mathbf{b}(T))^T \quad (9)$$

とすると、

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (10)$$

として流量保存の関係を定式化できる。

このとき、各アークの変数 $x_i(t)$ に対してコスト係数 c_i を設定すると、水運用は最小費用流問題

$$\begin{aligned} z &= \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n c_i x_i(t) \rightarrow \min. \\ \text{s.t. } \mathbf{Ax} &= \mathbf{b} \\ \mathbf{l} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned} \quad (11)$$

として定式化される。ここで $\mathbf{l}$ は $\mathbf{x}$ に対する運用下限値ベクトル、 $\mathbf{u}$ は運用上限値ベクトルである。ただし、実行可能解が存在しないことがないように、シンプレックス法においては Table 1 のような階段コスト ($-c_\infty \ll c_1 < c_2 < \dots < c_s \ll c_\infty$) を設定し、非基底変数を基底変数に入れるときに、相対コスト係数が小さくなる区間を選択して計算をすすめる。

Table 1 Multi-stage Cost coefficients in simplex method

band ID	Lower bound	Upper bound	cost coefficient c_i
0	$-\infty$	1	$-c_\infty$
1	1	u_1	c_1
2	u_1	u_2	c_2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
s	u_{s-1}	u	c_s
$s+1$	u	$+\infty$	$+c_\infty$

問題(11)のように小行列が階段状に並ぶ制約式を持つ線形計画問題は、基底分解法を利用することにより高速に解を求めることができる²⁾。さらに、最小費用流問題では係数行列 $\mathbf{A}$ の任意の正方部分行列 $\mathbf{C}$ について

$$\det \mathbf{C} = 0, 1 \text{ または } -1 \quad (12)$$

となる完全ユニモジュラ性を示すことができ、使用する全ての係数を整数に限定すると解の整数性が導かれる。この性質を利用すると、問題(11)をシンプレックス法によって解く場合、全ての計算を和差算のみで行なうことができる³⁾。以後、この解法を多段プライマル法と呼ぶことにする。

このとき、上記のモデリングでは目的を暗にコスト係数という形で表現していたため、良い計画を立案するためには、 c_i や区間変数 u_i を試行錯誤的にチューニングしていかなければならないことが問題であった。また、たとえ c_i や u_i をうまく調節できたとしても最適解は唯一しか提示されず、その解に計画立案者が不満を持った場合に、修正を加えることが困難となる。

そこで、明示的に持っている運用指針を数理的にモデリングして、 p 個の目的関数 $f_i(\mathbf{x})$ ($1 \leq i \leq p$)

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), \dots, f_p(\mathbf{x})) \quad (13)$$

の下で最適化を行なう多目的計画問題として定式化するアプローチを考える。例えば時刻 t_1 に配水池 i の貯留量 $x_i(t_1)$ を目標貯留量 g_i に回復する運用指針は $f_1(\mathbf{x}) = g_i - x_i(t_1)$ を最小化することとしてモデル化できる。流量平滑化についても後述する式(18)のように、平均流量からの偏差を最小化することとしてモデル化できる。ここで、最適性を定義するための目標レベルとして、希求水準 (aspiration level) という概念を導入する。希求水準は目的 f_i がどのくらいのレベルになれば満足できるかを数量表現するもので、最も希求水準に近い Pareto 解を満足解として導く。スカラー化関数は拡大 Tchebyshev スカラー化関数を用いて、

$$\begin{aligned} &\max_{1 \leq i \leq p} w_i (f_i(\mathbf{x}) - \bar{f}_i) \\ &+ \alpha \sum_{i=1}^p w_i (f_i(\mathbf{x}) - \bar{f}_i) \rightarrow \min. \\ \text{s.t. } \mathbf{Ax} &= \mathbf{b} \\ \mathbf{l} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned} \quad (14)$$

として数理計画問題が定式化される。ただし、 α は十分小さい数、 w_i は $f_i - \bar{f}_i$ を正規化するファクタ、 $\bar{f}_i$ は f_i に対する希求水準である。ここで問題(14)は補助的 min-max 問題

$$\begin{aligned}
 & z + \alpha \sum_{i=1}^p w_i (f_i(\mathbf{x}) - \bar{f}_i) \rightarrow \min. \\
 & \text{s.t. } w_i (f_i(\mathbf{x}) - \bar{f}_i) \leq z \quad (1 \leq i \leq p) \\
 & \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \\
 & \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u}
 \end{aligned} \quad (15)$$

と等価なので、これを解くことにより所望の満足解が得られる。この場合、解の修正も対話的に希求水準を変更することで容易に実現できる⁸⁾。ところが、問題(15)の拡張された制約行列では、 $f_i(\mathbf{x})$ を整数係数の線形関数として、 w_i が全て整数としても、式(12)の完全ユニモジュラ性が成り立たなくなり、解の整数性が保証されない。また問題(11)に特化した高速解法である多段プライマル法を利用することもできなくなる。よって問題(15)を解くには改訂シンプレックス法(revised simplex method)のような一般的な解法に頼らざるを得ないため、計算量が膨大になる。

また、2節で示した水運用指針をモデリングすることも多層ネットモデルのような大規模モデルの下では非常に複雑になる。例えば、流量平滑化をモデリングする場合、時刻 t の流量 $x_i(t)$ に対して平均流量 avg_i は

$$avg_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_i(t) \quad (16)$$

であるから、理想的には平均流量で平滑化されると考えて、平均流量からの偏差

$$\|x_i(t)\| = \|x_i(t) - avg_i\| \quad (17)$$

を最小化することを考える。工学的な応用では誤差二乗のような l_2 ノルムを最小にする定式化がよく用いられるが、非線形最適化は一般に困難なことが多く、線形化できるときは l_2 ノルムよりも l_1 ノルムや l_∞ ノルムを用いた方が容易である。今、 l_∞ ノルムを考えると、

$$\begin{aligned}
 \|x_i(t)\|_\infty &= \|x_i(t) - avg_i\|_\infty \\
 &= \max_{1 \leq t \leq T} |x_i(t) - avg_i| \\
 &= \max_{1 \leq t \leq T} \left| x_i(t) - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_i(t) \right|
 \end{aligned} \quad (18)$$

の最小化を行なうことで流量平滑化を達成できる。

しかしながら、このとき補助的 min-max 問題(15)の目的関数の第2項に式(18)が入り込み、線形計画問題としての定式化が困難になる。第2項を除いて通常の Tchebyshev スカラー化関数の下で定式化することもできるが、その場合には得られる解は弱 Pareto 解しか保証されなくなり⁸⁾、不要なトレードオフや、希求水準の変更に対する感度が0となってしまう問題に煩わされることになる。

次節では、以上のような課題を解決するための計画立案手法を提案する。

Fig. 3 Configuration of the Hierarchical System Containing Abstract Level and Time-Series Level

4. 提案手法

4.1 水運用計画問題の階層化

配水池貯水量の回復条件は、式(1)の t の単位時間を1日とみなすと、 $v_i(t-1) = v_i(t)$ と表されるので、式(1)は

$$\sum_{j \in N_i^I} x_j(t) = \sum_{j \in N_i^O} x_j(t) + d_i(t) \quad (19)$$

となり、日量計画立案時に配水池も他の分岐点と同様に扱うことで、配水池水位回復を制約式に埋め込むことができる。ただし、取水点からの水の供給は需要を満たすために必要なので、これら大きな配水池と考えられるノードはソースとシンクとで結ばれている。よって日量計画は一層のみの多層ネットモデルの下で立案するものと考えられ、計画変数の数を大幅に削減することができる。

このとき取水量を目的とすることにより目的は単純な形に表現でき、しかも

$$\sum_{i=1}^p \sum_{t=1}^T x_i(t) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m d_j(t) = \text{一定} \quad (20)$$

が成り立つので、取水量の内どれか一つを変動させれば、その他の取水量も少なくとも1つは変動することになるので、トレードオフ分析の対象としやすいことも利点となる。

しかし、このように時間変化を考慮しないと、貯水量を配水池間で融通し合う配水池運用や、管路流量の時間変化をできるだけ少なくする流量平滑化を計画することができなくなってしまう。そこで本稿では、日量を計画する概要レベルでの計画立案結果を基に多層ネットモデルのコストを自動生成する手法を提案する。

Fig. 3 にシステムの全体構成を示す。多層ネットモデルにおいて最小費用流を求める下部が従来手法による解法である。ところが、この場合、各アークに対するコスト係数をデータ

ベース化して事前に用意する必要があり、コストのチューニングが困難なことが課題であった。そこで本提案手法では、ユーザインターフェースとして対話型多目的計画法を利用し、希求水準を対話的に取得しながら概要計画としての Pareto 解を提示する。計画者を満足させる概要案を作成できたら、コスト生成器 (Cost Generator) が概要計画を基にして上述のように多層ネットモデルのアーケ変数に対してコストを生成する。この動的に生成されたコストの下に最小費用流を求めることで、事前に試行錯誤的にコストをチューニングすることなく、様々な要求を反映した詳細計画を得ることができる。

以上のように、日量を扱う概要レベル (Abstract Planning Level) と時間毎の流量を扱う詳細レベル (Time-Series Flow Planning Level) に問題を階層化することにより、それぞれの特徴を生かした解法を適用することが可能となり、しかも計算量を大幅に削減することができる。

4.2 概要レベルにおける多目的計画法

日間の管路流量 $\mathbf{X}$ と需要量 $\mathbf{D}$ を

$$\mathbf{X} = \sum_{t=1}^T \mathbf{x}(t) \quad (21)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{x}(0) + \sum_{t=1}^T \mathbf{b}(t) \quad (22)$$

とすると、日間での流量保存則は式 (2) を簡略化して

$$\mathbf{A}_2 \mathbf{X} = \mathbf{D} \quad (23)$$

となる。

このとき水源からの取水量を概要レベルの目的とすると注目する取水管路 i の日間取水量 X_i に対して、目的関数は単に

$$f_i(\mathbf{X}) = X_i \quad (24)$$

となる。ここで目的関数と希求水準の距離を正規化するためのファクタ w_i は理想点 f_i^* と最悪点 f_{i*} を用いて

$$w_i = \frac{1}{f_{i*} - f_i^*} \quad (25)$$

とするのが常套手段である。最適化計算によって f_{i*} , f_i^* を求める場合もあるが実用上非効率なので、ヒューリスティックに考えられる理想点と最悪点

$$f_i^* = 0 \quad (26)$$

$$f_{i*} = U_i - L_i \quad (27)$$

を用いることにする。ただし U_i および L_i はそれぞれ管路 i の日間運用上限値および下限値である。つまり $L_i = l_i T$, $U_i = u_i T$ である。

よって多目的計画法における補助的 min-max 問題 (15) は

$$\begin{aligned} & z + \alpha \sum_{i \in N_{obj}} (X_i - \bar{X}_i) / (U_i - L_i) \rightarrow \min. \\ \text{s.t. } & X_i - (U_i - L_i)z \leq \bar{X}_i \quad (\forall i \in N_{obj}) \\ & \mathbf{A}_2 \mathbf{X} = \mathbf{D} \\ & \mathbf{L} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{U} \end{aligned} \quad (28)$$

のようになる。ここで N_{obj} は取水点に直結している管路の管路インデックスの集合、 $\bar{\mathbf{X}}$ は $\mathbf{f}_i(\mathbf{x})$ に対する希求水準ベクトルである。

k 回目に提示される解 $\mathbf{X}^{(k)}$ に対する目的関数 $\mathbf{f}^{(k)}$ のうち $f_q^{(k)}$ を改善したいと計画者が思ったとする。このとき新たに希求水準 $\bar{f}_q$ を入力してもらい、 $\Delta f_q^{(k)} = \bar{f}_q - f_q^{(k)}$ としてパラメトリック線形計画問題

$$\begin{aligned} & z \rightarrow \min. \\ \text{s.t. } & X_q \leq X_q^{(k)} + \theta \Delta f_q^{(k)} \\ & X_i - (U_i - L_i)z \leq X_i^{(k)} \quad (i \in N_{obj} \setminus \{q\}) \\ & \mathbf{A}_2 \mathbf{X} = \mathbf{D} \\ & \mathbf{L} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{U} \end{aligned} \quad (29)$$

において $\theta = 1$ となるまで Pareto 曲面をたどることにより $\mathbf{X}^{(k+1)}$ が提示される。問題 (29) において $\theta = 0$ の最適基底逆行列は、問題 (28) の最終タブローに対して感度解析の理論を用いることにより得られる⁸⁾。得られた最適基底逆行列がそのまま最適である θ の上限 θ_{max} を求め、 $\theta_{max} < 1$ の場合には新しい希求水準を満足する点に到達するまでに Pareto 曲面が折れ曲がっていることを意味するので、 $\theta = \theta_{max}$ のところで双対シンプレックス法を適用して新たな最適基底逆行列を生成し、 $\theta_{max} \geq 1$ となるまで同様の計算を繰り返す。 $\theta_{max} \geq 1$ ならば $\theta = 1$ が希求水準到達点となる⁸⁾。以上のようにして対話的に日間取水量をベースにネットワーク全体の流れを計画することができる。

4.3 詳細レベルにおける多段プライマル法

今、平滑化対象管路 i について概要レベルで日間流量が X_i と計画されたとし、一日のうち管路使用可能時間が T_i^e であるとする。ここで、管路使用可能時間は運用上下限の範囲内で自由に水が流れる時間の和であり、管路使用不能時間は点検やポンプ停止により流れがなくなる時間の和である。このとき定義より

$$X_i = \sum_{t=1}^T x_i(t) \quad (30)$$

である。理想的に流量平滑化がなされると管路使用可能時間内では流量が一定に保たれるので、一定値を x_e とすると

$$x_e = X_i / T_i^e \quad (31)$$

となる。よって、時間毎の目標流量を

$$goal_i(t) = \begin{cases} x_e & (t: \text{管路使用可能時間}) \\ 0 & (t: \text{管路使用不能時間}) \end{cases} \quad (32)$$

と設定すると、概要レベルの計画を保存しながら流量平滑化も達成することができる。故に式 (32) を満たす流れが最小費用流となるように Fig. 4 のようなコスト関数を生成することにより、従来と同様の手法で運用指針を満足する運用案を柔軟に求めることができる。前述のように、このコストの下に問題 (11) を定式化することにより、配水池水位が T 時間後に元の水位に戻り、各流量平滑化対象管路の流量が一定となる流れが理想的な最小費用流として定義される。このとき

Fig. 4 An Example of the Auto-Generated Cost Function

Fig. 5 A water supply network used for evaluation

使用する変数を整数に限定すると、基底分解法と解の整数性を利用した多段プライマル法³⁾により高速に解を求めることができる。

5. 数値実験

5.1 前提条件

本提案手法を検証するために、実在する水道システム (Fig. 5) のデータ (1層当たりアーク数79, ノード数48, 配水池11, 取水源4, 計画時間24) を用いて計画立案を行なった。需要量は最も典型的な平日のものをを用いた。比較は次の3種類の手法の間で行なった。

Multi-Stage Integer Programming (MSIP) 多段プライマル法と後処理としての平滑化処理を組み合わせた従来手法³⁾

Multi-Objective Programming (MOP) only 多層ネットモデルの下に、有効貯水量が十分にある6個の配水池に対する水位回復目的と、12本の管路に対して流量平滑化目的を設定した多目的計画法

Proposed 概要レベルと詳細レベルに階層化し、多層ネットモデルのコストを自動生成して多段プライマル法を

Table 2 Comparison on Mean Computational Time(sec)

MSIP	MOP only	Proposed
2.4	393.4	2.7

Table 3 An Example of the Tradeoff Analysis on Abstract Level (Upper: Aspiration Level, Lower: Plan)

k	IntakeA	IntakeB	IntakeC	IntakeD
1	24000 27785	200000 230202	15000 22335	0 9320
2	27785 20000	237701 20000	24156 25677	0 0
3	20000	243965	25677	0

適用する本提案手法

5.2 計算時間

まず計算時間の比較を行なった結果を Table 2 に示す。CPUはSPECint_base95=4.58, SPECfp_base95=2.86のプロセッサ^(注1)を用いた。Proposedの計算時間は、最初の概要計画立案に要した時間 ($k=1$ の解を得るまでの時間)と、詳細計画立案に要した時間 (MSIPと同じ) を足し合わせたものであり、概要計画立案時に計画立案者が $k \geq 2$ の解を得るためにトレードオフ分析を繰り返す時間は含まない。Table 2からも明らかなように、多層ネットモデルのように大規模な問題を汎用的な改訂シンプレックス法で解くと、膨大な計算量を要する。また、大規模な問題で多目的計画法として定式化すると、目的関数も複雑で大規模になってしまう点も計算量の増加につながっていると考えられる。一方、提案手法では、多目的計画法での計算量を大幅に削減し、かつ計算量の少ない多段プライマル法を利用できる形にしているので、計算時間の大幅な削減を実現している。

5.3 概要計画結果

上述のように従来手法である MSIP は計算量は少ないが、予め適切なコストを用意しておく必要がある。このような点を改善するために提案手法では、概要レベルにおいて対話型多目的計画法を応用する。概要レベルでの計画例を Table 3 に示す。目的関数は4つある取水点 (A~D) からの取水量である。上段は設定した希求水準であり、下段が上段の値の下に計算された計画値である。 k は解の提示番号を示す。今、渇水対策のため取水点Dにおいて取水制限を実施できる計画立案を考えるものとする。希求水準は各取水点においてどのくらいの水量を取りたいかを入力する。このとき、式(20)を意識する必要はない。取水点Dからは取水制限したいので、ここは希求水準を0と設定した。最初に提示された解 ($k=1$) は、与えられた希求水準ベクトルに拡大 Tchebyshev 距離で計って最も近い解である。換言すると、最初の希求水準は現状の需要量に対してどれも厳しすぎるものだったので、システムは各目的毎に正規化された目的不達成度の最大値を最小化した最適解を提示したことになる。

(注1) <http://www.intel.com/procs/perf/mainstream/> 参照

計画者は最初の解ではDからの取水量を0にすることができなかったので、これを不満に思い、取水点Dからの取水量に対する希求水準を再度0と設定した。初回との違いは、 $k > 1$ からはトレードオフモードに入り、全ての目的に対して希求水準を設定する必要がない点である。希求水準が設定されていない箇所は設定されている希求水準の達成のための代償としてよいものとする。結果として $k=2$ での解は、Dからの取水量を0とすることを達成する流れとなったが、反対に取水点B及び取水点Cからの取水量は増加するようなトレードオフ結果となった。

当初目的として扱ったものを計画の途中から制約に変換することも式(29)において $\Delta f_q^{(k)} = 0$ となる希求水準 $\bar{f}_q = X_q^{(k)}$ を設定することにより容易に可能である。Table 3の $k=3$ では、Dからの取水量を0として制約化しつつ、Aからの取水量を押さえる希求水準を入力し、トレードオフ分析を行なうことにより、所望の計画を得ることができたことがうかがえる。

5.4 詳細計画結果

詳細計画結果の時系列データをFig. 6及びFig. 7に示す。例としてProposedによって生成されたものを示してある。Fig. 6は、ある流量平滑化対象管路の24時間分の計画結果を示したものである。横軸が推移時間、縦軸が時間流量(ton/hr)である。平均流量に対して ± 300 トンの変動内で平滑化が達成されている様子が見て取れる。一方、Fig. 7は主要な配水池の水位変動を示したものである。横軸は推移時間、縦軸は初期水位を1として正規化した水位レベルである。どの配水池も水位を変動させて需要量変動を吸収し、かつ24時間後には元の水位に回復していることが確認できる。

次に前記の手法間で詳細計画結果を定量的に比較する。MSIPも共に比較できるようにトレードオフ分析を行なわずに詳細計画を立案した。まず配水池水位の回復率を比較する。11個ある配水池の内、有効貯水量が十分にある6個の配水池

Fig. 6 An Example of Time-Series Flow Plan

Fig. 7 An Example of Reservoir Level Plan

Table 4 Comparison on Reservoir Recovery Ratio(%)

MSIP	MOP only	Proposed
100	103	100

Table 5 Comparison on Flow Smoothing Ratio(%)

MSIP		MOP only		Proposed	
avg.	max.	avg.	max.	avg.	max.
1.22	8.54	0.00	0.00	1.22	2.58

の初期水位と最終水位の比率 r_i

$$r_i = \frac{x_i(T)}{x_i(0)} \quad (33)$$

の平均値をもって水位回復率(Reservoir Recovery Ratio)と定義した。結果をTable 4に示す。Table 4より、試行錯誤や明示的目的関数なしに、提案手法でも十分水位回復を実現できることを見てとれる。

流量平滑化率(Flow Smoothing Ratio)については、各時刻 t における平均流量 avg_i からの偏差 $\chi_i(t)$ に対して、平均平滑化率を

$$avg. = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{|\chi_i(t)|}{avg_i} \quad (34)$$

、最大平滑化率を

$$max. = \max_{1 \leq t \leq T} \frac{|\chi_i(t)|}{avg_i} \quad (35)$$

と定義し、全部で12ある平滑化対象管路それぞれの平均平滑化率と最大平滑化率の内、最悪値をTable 5に示す。多層ネットモデルにおいて明示的に流量平滑化を目的としたMOP onlyの場合、計算時間を十分費やすことによって最適解まで到達できたものと考えられる。MSIPでは、優先順位に従って順次平滑化処理を行なうため³⁾、優先順位の低い管路では若干平滑化率が悪いところが見られた。提案手法では、配水池水位回復を制約化した障害もあって最適解までは到達できていないが、MSIPと同等以上の実用的な解を導くことに成功している。

以上の実験結果により、提案手法を用いることにより、計画者の要望を反映した運用案を迅速かつ柔軟に作成すること

ができる見通しを得た。

6. ま と め

ネットワークにおける輸送計画問題の数理モデル化において、従来はモデルパラメータをうまく設定することが良い計画を得るための条件であった。しかし、適切なモデルパラメータの設定には試行錯誤が必要となり、またパラメータを固定的に用意しておくだけでは計画立案者の意図に沿った計画を柔軟に立案することが困難であった。

これらの課題を解決するために、本稿では広域水運用計画への対話型多目的計画法の応用について考察した。運用計画上の目的の一つである配水池水位の回復を制約化することにより、計画問題を日量を扱う概要レベルと時間量を扱う詳細レベルに階層化できることを利用する。さらに、概要レベルの流れを保存し、流量平滑化条件も満足する流れが最小費用流となるように多層ネットモデルのコストを自動生成する手法について述べた。

本提案手法を用いることにより、以下のような改善事項が確認された。

- (1) 事前にモデルパラメータをチューニングして固定的に用意しておくのではなく、計画立案者の選好に合ったパラメータを動的に生成できるようになった。
- (2) 提示された運用案に不満があった場合にも、トレードオフ分析によって修正を加えて満足化するシステムとした。
- (3) 概要レベルと詳細レベルに分割してそれぞれ独立に定式化することにより、分割せずにそのまま多目的計画法を適用した場合に比べて計算量を大幅に削減し、計算時間を短縮した。
- (4) 自動生成されたコストの下での最小費用流は、配水池水位回復目標・管路流量平滑化目標といった実運用上の目標を十分満たし得るものであった。

また、本手法は問題を限定的に捉えたからこそ、その有効性が示せたと考えることもできる¹⁰⁾。今後は、配水池水位の同レベルへの回復のみでなく、初期条件に依存せずに目標レベルに回復できるような、より現実の運用制御に適した手法へと改良を加えていく。

なお、本研究について有益かつ貴重な御意見をいただきました甲南大学理学部中山弘隆教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 志水清孝. システム最適化理論. 392/397, コロナ社 (1976)
- 2) T. Nishiya and M. Funabashi. Basis Factorization Method for Multistage Linear Programming Problem with an Application to Optimal Energy Plant Operation. IEEE Transactions on Automatic Control, **AC-32**-10, 851/857(1987)
- 3) 栗栖宏充, 西谷卓史, 館仁平, 安達弘. 数理計画法とヒューリスティック法を組み合わせた動的配分計画技法の上水道運用計画問題への適用. 計測自動制御学会論文集, **30**-2, 198/307(1994)
- 4) 加藤博光, 栗栖宏充, 瀬古沢照治, 館仁平, 三井芳郎. 事例ベース緊急時広域水運用計画立案手法の開発. 学会誌「EICA」, Vol.1, No.1, 94/97(1996)

- 5) 難波. 浄水場における送水計画システム. 第48回全国水道研究発表会講演集, 306/307(1997)
- 6) 大島, 小須田. 配水池容量を活用した水運用システムに関する一考察. 第47回全国水道研究発表会講演集, 290/293(1996)
- 7) 中山弘隆. 多目的計画法に対する満足化トレードオフ法の提案. 計測自動制御学会論文集, **20**-1, 29/35(1984)
- 8) 中山弘隆, 谷野哲三. 多目的計画法の理論と応用. 156/179, 計測自動制御学会 (1994)
- 9) H. Wallenius. Implementing Interactive Multiple Criteria Decision Methods in Public Policy. University of Jyväskylä, 30/58(1991)
- 10) 中村正久. 公共部門計画問題への多目的数理計画手法の適用と問題点. オペレーションズ・リサーチ, 395/399(1988)

[著 者 紹 介]

加 藤 博 光 (正会員)

1994年米国 Stanford University にて M.S. (Aero/Astro) 取得. 1995年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了. 同年(株)日立製作所システム開発研究所に入所. 上下水道の運用制御システム, 危機管理システムの研究に従事. 情報処理学会の会員.

栗 栖 宏 充 (正会員)

1988年京都大学大学院工学系研究科修士課程修了. 同年(株)日立製作所システム開発研究所に入所. 上下水道の運用制御システム, 危機管理システムの研究に従事. 電気学会, 環境システム計測制御学会, IEEEなどの会員.

瀬古沢 照 治 (正会員)

1979年東北大学大学院工学研究科修士課程修了. 同年(株)日立製作所システム開発研究所に入所. 上下水道/河川運用管理制御システム, 自動車エンジン制御システム, プラント制御システム, 医療分析システムの研究開発に従事. 同所主任研究員(工学博士). 1995年本会技術賞受賞.

館 仁 平

1975年金沢大学工学部電気工学科卒業. 同年(株)日立製作所入社, 同社大みか工場配属, 現在に至る. 制御用計算機を用いた上下水道監視制御システムなどの設計に従事. 電子情報通信学会の会員.