水運用計画における対話型多目的計画法の適用事例

加藤　博光，栗栖　宏充

1. はじめに

本稿では水道分野における運用計画立案にOR技術を適用した事例を紹介する．水道は「安全でおいしい水」を需要者に配ることを目的とした，日常生活になくてはならないライフラインである．よって平常時はもとより，渇水時や地震災害時にも水資源を確保し輸送できるように管網や施設の整備がなされてきている．水道ネットワークの広域化により，余裕のある水源から水を融通してもらうことも可能となり，水の需要と供給のバランスの変化に対して柔軟に対応できるようになってきた．

その一方で，広域なネットワークでは管網が大規模で複雑になり，多様な運用条件を満足させながら水資源の配分を計画することが困難になってきている．特に，工事や渇水などのために普段利用していた管路や水源が利用できない状況に対しても，迅速に需要や運用条件を最大限満足できるようにしたいという要望がある．

このようなニーズに応えるため，計画立案者の意思を取り入れながら実際の水運用計画問題をどのように定式化しているかを紹介する．

2. 対象とする問題の概要

水道は，水源から取水した水を浄水場で浄化し，一旦配水池（reservoir）と呼ばれる貯留点に水をためてポンプで加圧したり，自然流下によって需要者のもとに水を届ける輸送ネットワークシステムである（図1）．需要者に届いた水は「水量」「水質」「水圧」が適正である必要がある．本稿ではこのうち水量に関する配分計画について述べる．

浄水場は長い時間をかけて水をろ過したり，薬品を注入して化学処理するシステムであるので，急激に処理する水量を変化させることが難しい．このため，運用上はできるだけ一定な水量を取水し続けて，一定の浄水を生産することが望ましい．

一方，需要者側では生活のリズムに合わせて時々刻々需要量は変化している．たとえば，早朝から需要量は急激に増加し，一旦減少した後，夕刻あたりで二番目のピークを迎えて，夜中には低い需要量で推移する（図2）．

よって，一定水量を供給しながら変動する需要量を満足させるために，変動を吸収するためのバッファが必要になる．このバッファとして，水量を安定的に確保するために重要な役割を果たしているのが，前述した配水池という施設である．配水池には緊急時に備えた水の貯留という役割もあるため，配水池の水位は，運用下限水位以上であることはもとより，できるだけ高い水位に保っておきたいという要望がある．特に，需要が急激に増加する前の早朝時には，配水池水位を満水に近い目標水位まで戻しておきたいという運用目標がある．

以上のように，水需要量を満足させながら，浄水の安定供給，配水池の目標水位回復といったさまざまな運用条件を満たす運用計画を立案することが必要になる．これを水運用計画問題と呼ぶ．

3. 従来技術と課題

3.1 従来技術

配水池貯水量の時間変化まで考慮した水運用計画問題に対する解法として，1浄水場から1配水池への送水計画を数理計画問題としてモデル化する手法がある[2]．しかし，実際の水道は，複数の浄水場や配水池がネットワーク状に結合されているため，ローカルな浄水場と配水池に注目するだけでなく，広域な接続関係も考慮してモデリングする必要がある．

複数の配水池があるネットワークにおいて配水池貯水量も考慮した水量配分計画手法としてSA法を応用したものがある[3]．SA（Simulated Annealing）法

かとう　ひろみつ，くりす　ひろみつ
㈱日立製作所システム開発研究所
〒215-0013 川崎市麻生区王禅寺1099

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

は，組み合わせ最適化問題の近似解を得るアルゴリズムであり，送水量を離散的に増減させて組み合わせ問題として最適化する手法である．しかしながら，SA法のようなメタヒューリスティック手法の場合，問題の性質が温度のようなパラメータに集約されているため，ヒューリスティックを埋め込むためのパラメータ・チューニングが非常に困難であるという問題がある．また，一般にメタヒューリスティック手法は計算量が膨大で，本稿で扱う大規模な広域水道の計画への適用は難しい．

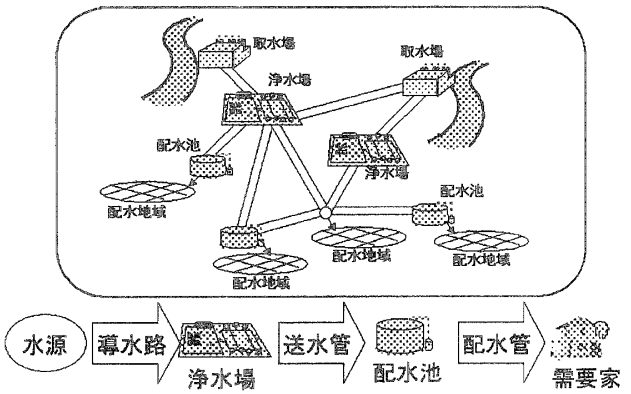

図1　水道ネットワークの全体像

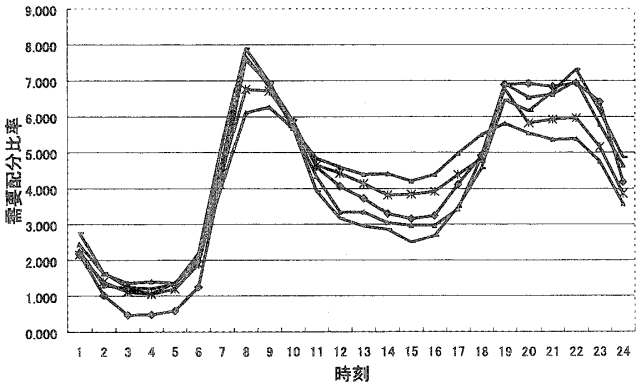

図2　ある地域における水需要量の時間推移

そこで本稿では，計算量や拡張性を考慮して，以下に述べる多層ネットモデルにおける最小費用流問題として水運用計画を考える．

3.2　多層ネットモデル

本稿で扱う水運用計画は水量の配分問題であるので，水量保存式が支配方程式となる．今，配水池に注目して，ある時刻 t における水量の入出力を考えると，時刻 $(t+1)$ の貯水量は，時刻 (t) の貯水量に時刻 (t) から $(t+1)$ までに流れ込んだ水量を加え，時刻 (t) から $(t+1)$ までに流れ出た水量（需要量も含む）を差し引いたものとして定義できる．これを図3左に示す．この関係をネットワークとして捉えることにより，図3右に示す多層状の有向グラフとして水量保存式を表すことができる．有向グラフの各アークは該当する配水池貯水量や管路流量を表している．以後，これを多層ネットモデルと呼ぶ．このモデリングは貯留のある輸送ネットワーク問題において典型的なものである[1]．

3.3　多段プライマル法による解法

多層ネットモデルにおいて，各アークに対して輸送費用（コスト）を割り当てることにより，ネットワークフロー問題として典型的な最小費用流問題として定式化することができる．水道の場合，輸送コストをポンプ稼動の電力量などに換算して考えることもできるが，一般には電力量を最小化する計画は前述の運用目標を満足するわけではないので，通常，安全性や経済性を考慮しつつ適当な値を割り付けて計画を立案する．また，コスト関数として非線形関数を用いることも可能であるが，線形なものを利用した方が計算量的にも扱い易く実用的なため，線形な最小費用流問題を扱う．

多層ネットモデルにおける最小費用流問題では，各時刻毎に同じネットワークが繰り返し現れるため，同

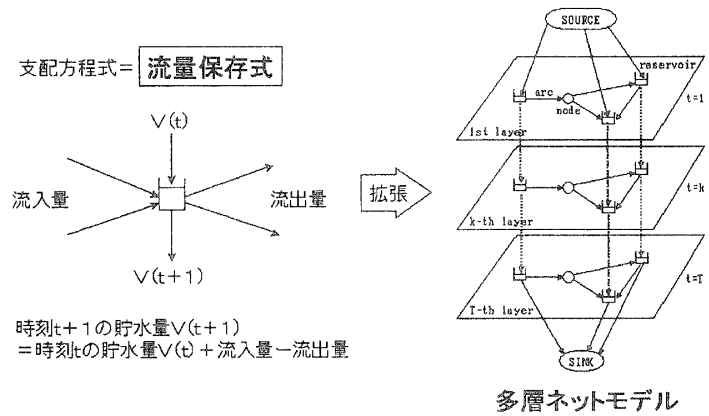

図3　配水池に注目した水量の入出力と多層ネットモデル

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

じ小行列が階段状に並ぶ線形計画問題となる．階段構造を持つ問題では基底行列も同様に階段構造を持つため，基底行列の逆行列は実質的に，これら小行列の逆行列計算に帰着される．

さらに，水量保存式を制約条件とする最小費用流問題については，係数行列および基底逆行列の非ゼロ要素は，すべて1または−1となる．このことはアルゴリズムとしては何の影響も与えないが，計算機上では次のような利点がある．

1. 計算の大部分を和差算として表現することができ，除算をなくすことができる．従って，係数や定数をすべて整数とすれば，計算機上で使用される変数をすべて整数として定義することができる．このことは，実数同士の積和演算が整数同士の和算に変換できることを意味し，大幅な計算時間の短縮となる．
2. 計算機で反復計算を行なう場合，常に考慮しなければならないのが，誤差管理の問題である．しかしながら，すべて整数でかつ除算がないために，誤差は常にゼロであり，誤差管理のためのチェック処理を行なう必要がなくなる．

以上の点を考慮し，階段状の最小費用流問題に特化した形に基底分解法を改良した多段プライマル法を開発した[4]．

3.4 問題点

上述の多段プライマル法の場合，前提条件として多層ネットモデルの各アークに対してアークを流れる水量に対してコスト係数を割り付け，最小費用流問題に帰着している．ここで，コスト係数をどのように決定すればよいかが問題になるが，実際には人手による試行錯誤によって適当に割り付け，さまざまな条件下でテストを行ない，不都合が生じたら再び試行錯誤によってコスト係数を設定するという作業を繰り返すことになる．

また，コスト係数は現場の水運用オペレータには理解しづらい形になっていることも問題である．コスト係数を決定すると問題が決まり，あとは多段プライマル法を適用して解を求めればよいので，実質的にコスト係数を決定することが解を決定していることになる．つまり，うまくコスト係数を設定できるかどうかが，良い運用計画を立案できるかどうかの鍵になる．そのような重要なパラメータを意味もなく自由に変更してしまうと，望ましい計画を立案できなくなってしまう．よってコスト係数は，実際には水運用オペレータからは隠蔽された形で設定する．

ところが，解の決定に重要な影響を与えるパラメータをオペレータから隠蔽すると，今度は逆にオペレータの意思を計画に反映させる手だてがなくなってしまう．計画立案プロセスは本来，「AをBとしたい」「CをDとしてみてはどうだろうか？」といった人間の意思や価値判断が介入して結論が出るものであるが，上記の定式化ではそれが全く考慮されていない．意思決定支援のためには，人間と計算機の持つ特徴をうまく生かすことができる手法を考えていく必要がある．

4. 構築した計画システム

4.1 計画者の要望を計画に反映する仕組み

前述した課題を解決するために，筆者らは対話型多目的計画法を利用した水運用計画立案システムを開発した[6]．対話型多目的計画法は，希求水準（Aspiration Level）と呼ばれる「許容しうる目標不達成度のレベル」を導入して，希求水準の不達成度を最小とする最適化を行なう手法である[5]．希求水準を計画立案者に対話的に入力してもらい，代替案へのトレードオフ分析を行なうことで，計画立案者の価値基準を取り入れながら満足化を行なうものである．

筆者らは当初，「配水池に流出入する流量を一定に保ちたい」「早朝の決められた時刻に配水池水位を目標レベルまで回復したい」といった陽に持っている運用目標を目的関数として多目的計画問題を定式化することを試みた．しかし，

- 大規模な水運用計画問題に適用した場合に，定式化が非常に複雑になる．
- 上記に付随して，従来の有効な解法であった多段プライマル法が利用できなくなり，計算量が膨大になる．
- 目的関数が多くなり過ぎて，トレードオフ分析のような意思決定を行なう上で計画に対する評価が難しくなる．結果として，トレードオフ分析が「もぐらたたき」的な試行錯誤に陥りやすい．

といった問題点が明らかになった．そこで，全体問題を二つの階層に分割し，従来手法である多段プライマル法を生かしながら，コスト係数を計画立案者の意思に従って動的に生成する手法を考案した．

配水池水位の回復目標が達成される場合，日間での配水池への流入量と流出量が等しくなる．逆に，日間で計画を立てて，日間計画量との整合性を取りながら時間毎に計画を立案すれば，配水池水位は結果として

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

回復することになる．つまり，日量計画立案時に配水池も他の分岐点と同じように扱うことで，配水池水位回復を制約として埋め込むことができる．このとき，日量の計画では，どの取水点からどのくらい水を取れば良いかが意思決定上のポイントとなるため，これを目的関数として多目的計画問題を定式化すればよいことになる．配水池水位が回復する場合，日間では取水量と需要量は等しくなる．需要量は境界条件として与えて一定なので，取水量の内どれかを変動させれば，その他の取水量の内いずれかが変動するので，トレードオフ分析の対象としやすい．取水点は一つの水系でそれほど多くはないので，計画立案者にとっても判断がしやすくなる．

このようにして日間での計画に対話型多目的計画法を適用し，日間取水量を計画した後，これを実現するための時間単位の計画を立案する必要がある．取水管路や配水池への流出入管路の流量を，日間流量を24時間で割った値とすることが理想的だが，実際には需要量の変動の影響を受けたり，管路流量や配水池水位の運用上下限を守らなければならなかったりするため，容易には決定することはできない．

そこで筆者らは，図4のような計画立案システムを構成し，日量計画の結果から多層ネットモデルのコスト係数を自動生成し，多段プライマル法を用いて時間毎に計画を立案する手法を提案した．このシステムでは，流量平滑化対象管路において，流量が日間流量を24時間で割った値となる流れが最小費用流と定義されるようにコスト関数を図5のように設定し，多段プライマル法を用いて高速に解を求める．これにより，流量平滑化対象管路の流量を可能な限り一定とする運用案を計画し，結果として配水池水位も回復する計画を立案することになる．

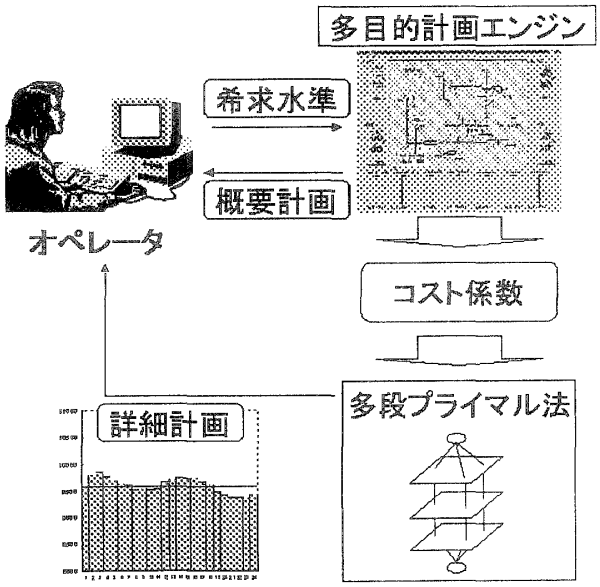

図4　計画立案システムの全体構成

4.2　実験結果と考察

実在する水道ネットワークに提案システムを適用し，日量計画における取水量のトレードオフ分析を行なった例を表1に示す．表の上段は設定した希求水準であり，下段が上段の希求水準の下に最適化された計画値である．k は何回目に提示された解かを示す．渇水対策のために，取水点Dにおいて取水制限を実施する計画を立案するものとする．そこで，取水点Dにおける希求水準を0（k=1上段）として計画を行なうと，最初は取水点Dからの取水量を0とする計画を得られなかった（k=1下段）．これは，他の地点からの取水量要求も少なく設定したために，不満足度を均一化する最適化が行われたためである．そこで，「他の地点からの取水量を増やしてでも取水点Dからの取水量は0にしたい」と水運用オペレータが判断して，希求水準を再度0と設定（k=2上段）してトレードオフ分析をしたところ，要求を満足する解を得ることができた（k=2下段）．

この日量計画に基づいてコスト関数を生成し，時間毎の流量計画を行なったところ，概ね流量は一定とな

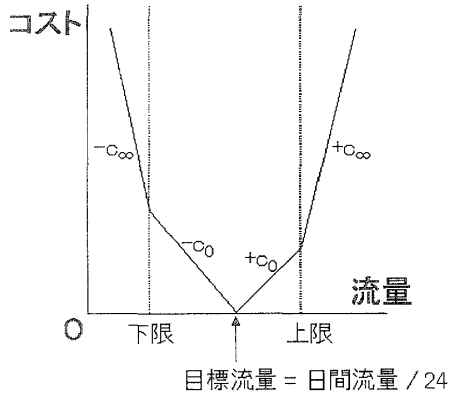

図5　自動生成されるコスト関数の例

表1　日量計画における取水量に対するトレードオフ分析（上段：希求水準，下段：計画値，単位はトン）

k	取水点A	取水点B	取水点C	取水点D
	24000	200000	15000	0
1	27785	230202	22335	9320
				0
2	27785	237701	24156	0

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

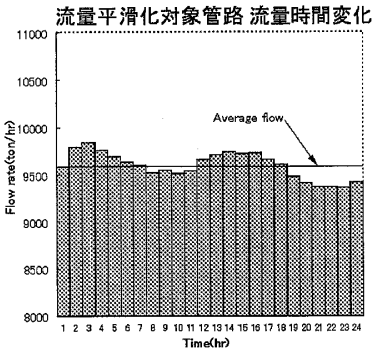

図6　流量平滑化対象管路の時間毎計画立案例

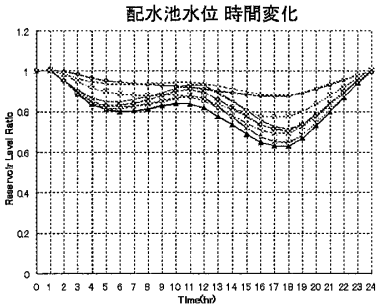

図7　配水池水位の時間毎計画立案例（初期水位が目標水位）

る計画を立案することができ（図6），結果としてどの配水池の水位も回復する計画を得た（図7）．

5.　おわりに

輸送計画最適化の具体例として，水道における水量配分計画の従来手法と課題，問題点を解決するためのモデリングと解法について事例を紹介した．

水運用計画問題を最小費用流問題に帰着し，これに特化した解法として多段プライマル法を開発したが，最小費用流問題として定式化するために設定するコスト係数が試行錯誤に頼らなくてはならない点がこれまで課題であった．また，コスト係数をうまく設定することが，望ましい計画を得るための条件であった点も改善すべき点であった．これらの課題は，線形計画法を利用した単一目的関数の最適化において宿命的なものであろう．

筆者らの研究では，この課題に対して対話型多目的計画法を利用し，日量計画において取水量について満足化を行ない，計画立案者の意思をくみ取った日量計画に基づいてコスト係数を自動生成する手法を提案した．配水池水位回復や流量平滑化など，水運用の分野に特有な性質を利用したものではあるが，他の応用分野における問題解決の一助になれば幸いである．

今後の技術的課題として，計画立案者の要求をうまく引き出すためのユーザインターフェースはどうあるべきかを考えていくことも必要と考える．

参考文献

[1] 志水：“システム最適化理論”，コロナ社（1976）．
[2] 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，pp. 306-307（1997）．
[3] 関田：“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，pp. 290-291（1996）．
[4] 栗栖，西谷，舘，安達：“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，Vol. 30，No. 2，pp. 198-307（1994）．
[5] 中山，谷野：“多目的計画法の理論と応用”，計測自動制御学会（1994）．
[6] 加藤，栗栖，瀬古沢，舘：“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，Vol. 35，No. 2，pp. 280-287（1999）．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．