

広域利水計画に関するシステム分析

京都大学工学部 正員 吉川和広
 京都大学工学部 ○正員 岡田憲夫
 京都大学大学院 学生員 吉永一夫

1. はじめに

今日、人口の集中、生活様式の変化、生産活動の成長などの種々の社会的、経済的変化を反映して都市部における水需給が逼迫している。そのため水資源の広域導水をも考え大規模な水源開発方式を行なうとともに、需要地における効率的な水利用などの水資源の有効利用の方式を考慮することが必要になっている。本研究はこのような水資源の有効利用の問題のうちとくに広域的なダム建設による水源開発方式と需要地における三次処理水再利用方式に関する施設建設計画問題の観点から広域的な水配分計画問題をとりあげてこれを数理計画法の問題としてモデル化するとともに兵庫県の水配分問題に適用して実証的な分析を行なったものである。

2. 広域的な水源開発方式と三次処理水再利用方式との関連

広域的な規模でのダム建設による水源開発方式は、地域で不足している用水の確保を広域的な立場で行なおうとする立場であるのに対して、三次処理水の再利用方式は地域で不足している用水をできるだけその地域内で確保しようとする立場であり、両者の方式は立場が異なることがわかる。しにからてこのような2つの異なる方式をどのような形で調整すればよいかという問題の解決は重要な課題になってくると考えられる。このような観点に立って本研究ではまずわが国における水需要の実態について分析を行なうことにより水需要発生メカニズムについて検討を行なった。さらにこの検討をふまえて種々の水需要予測モデルを提案するとともに実際に兵庫県の東播磨播磨地域を対象にして需要予測を行なった。さらにこの予測値をインプットデータとして、上述した水配分問題の数学モデルによる実証的な分析を行なった。

3. 水需要予測モデル

水需要の予測にあたっては、単に予測値を得るだけでなく、水需要の発生メカニズムを説明するモデルを提案することを目的として種々の観点から予測モデルの検討を行なった。その際には上水道の需要予測問題と工業用水の需要予測問題の2つに大別して需要予測を行なった。この点についての詳細な説明はスペースの都合上講演時に言及することにする。

4. 水配分モデルの定式化

モデル化にあたって既設条件の相違によって2つのモデルを考えたい。すなわち、

- ① 三次処理の方法として現状からみてかなり高度な三次処理方式を採用し、この水質が工業用水としての一般的な要求水質を満足していると考えられる場合(モデル1)
- ② 三次処理水の水質を現在給水が行なわれている程度のものとする。また工業用水を要求水質別に何種類かに分類しこれらの水質を満足するようにその供給を行なう場合(モデル2)

なおここでは三次処理水の再利用は工業用水のみに限るという前提に立っている。このようにモデル2はモデル1に若干の条件を加えることにより定式化されるが以下の議論においてはスペースの都合上モデル1を中心として説明することにする。

モデル1の主要な仮定としては、

- (a) 諸施設の建設費ならびにその維持管理費と規模との間に線形関係が成立する。
- (b) 三次処理水の供給のために両水網を建設するとは考えず、処理水は工業用水道と混合しその両方施設を利用する。
- (c) 三次処理水の水質は十分よくその利用は水質的には工業用水道と同様に扱える。

(d) このとき全需要量のうち計画当初以前に発生している需要量に対しては将来も既に建設されている施設を使って供給を行なうものとする。この場合、施設の能力は計画当初において既に限界に達していると考え、新規の需要量に対しては新しい施設(ダム、導水施設、三次処理施設、上水道施設、工業用水道施設)の建設を行なうものとする。

またモデル記号のための記号を以下のように定める。

X_{ij} : ダムの建設規模を表す変数 (iは水系を表し、jは水系の中でのダムの下流からの順番を表す)

C_{ij} : i水系におけるj番目のダムの建設規模の上限値

D_i^u : i水系の下流部での上水道の需要量

D_i^I : " 工業用水の需要量

D_i^{u0} : " 既設上水道規模

D_i^{I0} : " 既設工業用水道規模

Y_{il} : i水系からl水系への導水施設規模

($i, l, l = i+1, l = i+1$), ($Y_{i0} = Y_{i0} = Y_{n+1} = Y_{n+1} = 0$)

ここにnは水系の数を表す。

S_i^u : i水系での上水道の施設規模

S_i^I : " 工業用水道の施設規模

S_i^P : " 三次処理施設の規模

つぎに制約条件の定式化を行なう。

・ダムの開発規模の制約条件として、

$$X_{ij} \leq C_{ij} \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m_i) \dots (1)$$

(m_i : i水系のダムの数)

・各水系における上水道、工業用水の需給のバランス条件として、

$$\begin{cases} S_i^u \geq D_i^u \\ S_i^I \geq D_i^I \\ S_i^I + S_i^P \geq D_i^I \\ S_i^I \geq D_i^{I0} \end{cases} \quad (i=1, \dots, n) \dots (2)$$

(ただし D_i^{I0} は D_i^I よりつねに小さいので、 $S_i^I \geq D_i^{I0}$ の条件は実質的には不要である。)

・各水系でのダムによる開発水量と上水道、工業用水道の取水量のバランス条件として、

$$\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} - Y_{i,i+1} - Y_{i,i+1} + Y_{i,i+1} + Y_{i,i+1} - S_i^u - S_i^I \geq 0 \quad (i=1, \dots, n) \dots (3)$$

が与えられる。

つぎにモデルにおける評価基準としては、上記の各施設の建設費の一年あたりの償還額ならびにその維持管理費の計画対象期間内全体の総和を考え、これを最小にする施設の建設方法を考える。なお各施設は計画対象期間の期末までに発生する需要量を満たすことのできるような施設を計画対象期間の期首に一度に建設してしまふと考える。しるから計画対象期間内での各時点での施設の段階的な拡張方法は考慮しないから、実質的には評価基準として各施設の建設費の一年あたりの償還額と維持管理費のみを考えても最小化の目的からは同じことになる。しるから本モデルの評価基準としては一年あたりの費用のみを考慮することにする。すなわち目的関数は、

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} a_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^n b_{i0} Y_{i0} + \sum_{i=1}^n \sum_{l=i+1}^n b_{il} Y_{il} + \sum_{i=1}^n C_i S_i^u + \sum_{i=1}^n d_i S_i^I + \sum_{i=1}^n e_i S_i^P \rightarrow \min. \dots (4)$$

ここに

a_{ij} : ダム ij に対する(建設費用+維持管理費)の単価

b_{il} : i水系からl水系への導水路の(建設費用+維持管理費)の単価

C_i, d_i, e_i はそれぞれi水系における上水道、工業用水道、三次処理場の(建設費と維持管理費)の単価を表わしている。

以上のように定式化された問題はLPであり、本研究でもLPの一般的な手法により解をもとめていたが、同時にモデルに組み込まれた問題の特性に着目し、

Decomposition原理の適用により分散化のプロセスを検討した。すなわち先に定式化された諸式のうち(1)式のみを満たす解集合とダム建設計画の代替案の集合とし、また同時に(2)式のみを満たす解集合を需要地における三次処理施設の建設計画の代替案の集合と考える。また(3)式の制約条件と(4)式の目的関数はこれら2種類の代替案が同時に満たさなければならない条件を示していると考えられる。Decompositionの原理によれば、(1)式、(2)式はそれぞれダム建設計画の代替案、三次処理施設建設計画

の代替案を選択する問題と考えると、(3),(4)式は、これらの代替案の重みづけの問題に変換できると示される。すなわちDecomposition原理を適用することにより、これらの2つの計画の総合調整過程の問題を数学的なアルゴリズムの問題として解決することができる。

5. 結果の考察

- ①広域的な水面処分問題を検討するにあたっては、単なるダムによる水源開発や水系間の広域導水方式のみならず三次処理水の再利用方式を検討することが重要であり、経済的にもこれらの2つの方式と組み合わせることが十分妥当であると考えられる。特に三次処理水の再利用は工業用水需要の大部分をカバーすることが可能であり、新規開発必要量を大幅に減らすことができる。水資源の保全の観点からも重要な意味をもっている。
- ②全体の需要量の増大した場合やダム費用が増大した場合に三次処理水の利用は非常に増加することになる。このような事態は今後十分考えられるので将来においてますます重要になると考えられる。
- ③三次処理施設の建設にあたっては各水系の工業用水需要の特性に合わせて高級処理施設と低級処理施設を組み合わせて建設することが必要である。

表-1 ダムの費用係数(単面) (円/m³)

水系	1	2	3	4	5	6
加古川	8.67	9.65	10.18	13.03	15.65	17.03
市川	7.00	15.15	15.27	41.10		
夢前川	3.92	27.67				
掛保川	5.82	12.31	17.81	38.86		
千鶴川	6.51	7.83	22.00	26.63	27.67	37.33

表-2 考察を行なったケースの一覧

シンプレックス法による解決の場合		2次元グラフ法による解決の場合	
ケース-1	三次処理の利用割合は0、河川からの取水、浄水場のみの利用	ケース-1-1	
ケース-2	① 広域導水、三次処理の利用なし ② 広域導水のみ ③ 三次処理の利用のみ		
ケース-3	① ケース-1のダム費用を1.2倍にした場合 ② ケース-1のダム費用を1.5倍にした場合 ③ ケース-2のダム費用を1.2倍にした場合 ④ ケース-2のダム費用を1.5倍にした場合 ⑤ ケース-3のダム費用を1.2倍にした場合 ⑥ ケース-3のダム費用を1.5倍にした場合	ケース-2-2	ケース-3-②
ケース-4	① ケース-1のダム費用を1.2倍にした場合 ② ケース-1のダム費用を1.5倍にした場合 ③ ケース-2のダム費用を1.2倍にした場合 ④ ケース-2のダム費用を1.5倍にした場合 ⑤ ケース-3のダム費用を1.2倍にした場合 ⑥ ケース-3のダム費用を1.5倍にした場合	ケース-3	ケース-4-②
ケース-5	河川からの取水と浄水場のみの利用		

④広域的な水面処分を考慮したダムの建設計画と三次処理水の再利用計画との総合調整過程の問題をDecompositionの原理の適用により数学的アルゴリズムの問題としてとらえることができる。

⑤三次処理施設に要する費用は地域によって大きく違っており、この部分の改善が全体的問題の改善に大きなウェイトを占めている。

⑥ダム建設に関する部分は建設候補のダムのうち建設単価の低いグループが主問題の解を構成する解として選ばれ、残りの中程度の単価のダムの費用にあまり差がないので以降の調整はダムに関して微調整を行えばよい。

⑦導水路の単価はダムや三次処理施設のそれと比べてオーダーが小さいので導水路の布設方法のいかににかかわらず全体の解に与える影響は小さい。このため導水路の布設方法を表わす解は最後の微調整の段階でダムや三次処理場の建設方法を表わす解に従属する形で決めればよいことになった。

その他詳細な結果の考察は講演時に図表を使って説明することにするが、いくつかを以下に図表として示す。

図-1 需要量の変化による最適解の変化

