

一水系流域における多角的な水利用問題に関するシステム分析

京都大学工学部 正員 吉川和弘

鳥取大学工学部 正員 岡田憲夫

建設省 正員 大内忠臣

1. はじめに

本研究では、水不足、水質汚濁問題に対処する1方策として、1水系流域における広域的・多角的な水利用方式を取り上げ、これを、①広域水道方式を前提とした水道施設、②再利用率の段階的な規模拡張問題としてとらえモデル化する。また、加古川流域に適用して実証的な分析を行った。

2. モデル化にあたっての主な前提条件

①対象とする1水系流域を、本川に沿ってN個のゾーンに分割するとともに、これらを上流から順に1, 2, ..., Nの番号で表わす。また計画期間をM個のステージに分け、順に1, 2, ..., Mと番号づけを行う。

②モデルを構成する施設としては、取水施設、上水道および工業用水道の浄水場、三次処理場およびゾーン間の送水管を考慮する。これらの施設のうち浄水場(取水施設を含む)、三次処理場については段階的な建設方式を考慮する。また、ゾーン間の送水管については、その施設の増設に計画期間中の規模拡張は行われぬものとし、もしゾーン間の送水が必要である場合には計画期間中の最大送水量に等しい規模の送水管を、その施設が必要とされる最初のステージにおいて一括して建設するものとする。

③各ゾーンにおいては、本川に流入する流量およびその水質を考慮するとともに、ゾーン下流地点において本川の水質の規制を行う。

④施設は生活用水および工業用水の新規需要の充足を目的として建設される。また三次処理水の再利用は工業用水にのみ考える。

⑤各ゾーンにおいては、取水はすべて本川の表流

水のみを水源として行われ、その使用水はすべて下水処理された後、本川へ排水されるものとする。

⑥評価関数としては、規模の経済性および機会費用の損失を考慮するために、計画期間全体にわたって建設費の償還額および維持管理費の支払い額の総和をとりあげ、この最小化を図る方法をモデル化する。

3. モデルの定式化

まず変数、定数を表1のように定義する。

このような施設の拡張問題は、送水管の建設時期の決定に関する0-1型決定変数(整数)を含む非線形混合整数計画問題の一種となっている。ところで、この種の問題はきわめて複雑な整数計画問題であるから、このままではその解と実用上求めるのは困難であると考えられる。そこで以下では、この問題を一般の非線形計画問題モデルに変換することを試みる。すなわち

まず送水管建設に関する0-1型決定変数(整数)を制約条件から除き、代りに次のような0-1型の決定変数を評価関数中に取り込む。

$$\phi(i, j, k) = \begin{cases} 1, & \text{Zone } i \text{ から Zone } j \text{ への送水管が stage } k \\ & \text{で建設されるとき (i.e. } y_{ij}^k > 0, \text{ かつ } \sum_{k=1}^K y_{ij}^k = 0) \\ 0, & \text{その他の場合.} \end{cases} \quad \dots (1)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x=0 \\ 0, & x>E \quad (E \text{ は十分大の正数}) \end{cases} \quad \dots (2)$$

という0-1型の両端固定連続関数を定義すれば、 $\phi(i, j, k)$ は次式で近似される。

$$\phi(i, j, k) = f\left(\frac{y_{ij}^k}{E}\right) \{1 - f\left(\frac{y_{ij}^k}{E}\right)\} \quad \dots (3)$$

本研究では、 $f(x)$ として次式を用いることにする。

$$f(x) = e^{-100(1-e^{-x})} \quad \dots (4)$$

以上のように、モデルの評価関数および制約条件は次のように定式化される。

① 評価関数

$$G = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \{ R_f(x_{fi}^k, k) + R_g(\bar{x}_{gi}^k, k) + R_t(x_{ti}^k, k) \\ + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \{ \bar{w}_{ij}(w_{ij}, k) RD_{ij}(w_{ij}, k) + \bar{w}_{ji}(w_{ji}, k) RD_{ji}(w_{ji}, k) \\ + \sum_{j=1}^N \{ Q_{fi} + \bar{Q}_{gi} + Q_{ti} \} + \sum_{j=1}^N \{ QD_{ij} + \bar{QD}_{ji} \} \} \\ \rightarrow \text{Min}$$

②制約条件 ($i=1, 2, \dots, N, k=1, 2, \dots, M$)

$$\sum_{h=1}^L a_{n-1,h} + \sum S_h - T_i^k - A_i \geq \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M (y_{ij}^k - y_{ji}^k - \bar{y}_{ij}^k - \bar{y}_{ji}^k) - Z_{ii}^k$$

$$D_i^k \geq -\sum_{j=1}^N (y_{ij}^k - y_{ji}^k)$$

$$\bar{D}_i^k \geq -\sum_{j=1}^N (\bar{y}_{ij}^k - \bar{y}_{ji}^k) + Z_{ii}^k$$

$$D_i^k \leq \sum_{j=1}^N x_{fi}^k - \sum_{j=1}^N (y_{ij}^k - y_{ji}^k)$$

$$\bar{D}_i^k \leq \sum_{j=1}^N \bar{x}_{gi}^k - \sum_{j=1}^N (\bar{y}_{ij}^k - \bar{y}_{ji}^k) + Z_{ii}^k$$

$$T_i^k \geq Z_{ii}^k + Z_{ii}^k \dots (11) \quad \bar{D}_i^k \geq Z_{ii}^k$$

$$\sum x_{ti}^k \geq Z_{ii}^k + Z_{ii}^k \dots (12)$$

$$(\hat{B}_{i+1} - \hat{B}_i^k) (\sum_{h=1}^L a_{n-1,h} + \sum S_h) + (\hat{B}_{i+1} - \hat{b}_{i+1}^k) a_{i+1}^k \\ + (\hat{B}_i - b_i^k) T_i^k \geq (\hat{B}_{i+1} - \hat{B}_i^k) [\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M (y_{ij}^k - y_{ji}^k - \bar{y}_{ij}^k - \bar{y}_{ji}^k) \\ + (b_i - b_i^k) Z_{ii}^k + (\hat{B}_i - b_i^k) Z_{ii}^k] \dots (14)$$

$$x_{fi}^k, \bar{x}_{gi}^k, x_{ti}^k, Z_{ii}^k, Z_{ii}^k, y_{ij}^k, \bar{y}_{ji}^k, w_{ij}, \bar{w}_{ji} \geq 0$$

4. モデルの解法

以上のモデルは評価関数が非線形連続関数、制約条件がすべて線形となっている。このよう構造に着目して、モデルの解法として実行可能方向法を用いることとする。

5. 結果の考察

本研究では、このモデルを兵庫県加古川水系に適用して実証的な分析を行った。この結果の詳細は講演時に述べることにし、ここでは全般的な結論を列挙するとともに、

① ゾーン間の送水は、両ゾーンの必要量の差が大きい場合に経済合理性が成立する。この傾向は特に下流ゾーンの最終ステージにおいての需要量が計画期間初期の両ゾーンの需要量の割合が大きいつきに顕著である。

② 浄水場、三次処理場などの各施設は、流域の水需要の増加傾向、流域の水質規制方式によって段階的建設が有利となる場合がある。

③ また、流域の水利用形態とくに工業用水の水供給方式は、流域に設定された水質規制方式および河川水質と三次処理水質の相対関係によって変化する。

④ 本研究で提案した解法のアルゴリズムは、この種の非線形混合整数計画問題に対する簡便かつ有効な手法であり、その際あわせて実行可能方向法を用いれば実用に十分耐え得る解が求められると云える。

(表1)

記号の定義	
① 定数	T_i : stage k の期末における zone i の下水処理量 ($T_i = S_i$ 城市人口)
② 変数	$\hat{B}_{i+1}$: stage k における zone i の下流地区の水質基準値
③ 定数	A_i : zone i の取水地区における維持流量
④ 変数	a_{i+1}^k, b_{i+1}^k : stage k において、zone i から $(i+1)$ の取水地区の間に設けられた浄水場の建設量とその水質
⑤ 変数	b_i^k : 下水処理場の水質、 b_{i+1}^k : 三次処理場の水質
⑥ 変数	$R_f(x_{fi}^k, k), R_g(\bar{x}_{gi}^k, k), R_t(x_{ti}^k, k)$: stage k において zone i で指定された施設の建設量についての計画期間中の支払い額
⑦ 変数	$RD_{ij}(w_{ij}, k), \bar{RD}_{ji}(\bar{w}_{ji}, k)$: stage k において建設された i と j の間の送水管の建設量についての計画期間中の支払い額
⑧ 変数	$Q_{fi}, \bar{Q}_{gi}, Q_{ti}$: 計画期間中における zone i の施設の維持管理費の総額
⑨ 変数	$QD_{ij}, \bar{QD}_{ji}$: 計画期間中における zone i から zone j の送水管の維持管理費の総額
⑩ 変数	$D_i^k, \bar{D}_i^k$: stage k の期末における zone i の新規需要量 (計画期間初年度からの増分)
⑪ 変数	S_i : zone i における計画期間初年度の水使用量