Ⅳ-77　1水系流域における広域的・多目的な水利用施設の段階的拡張方法に関する一考察

鳥取大学工学部　正員　岡田憲夫
建設省　正員　大内忠臣
京都大学工学部　正員　吉川和広

1. はじめに

本研究では，1水系流域における広域的・多目的な水利用問題を取り上げるが，その際特に，関連施設の段階的な拡張問題の重要性に注目するとともに，その最適な布設方式の選定問題を数理計画モデルとして定式化することを試みる．さらにケーススタディとして，兵庫県の加古川流域を取り上げ，実証的な分析を行うことにする．なお，本研究の一部は既に，本年度の関西支部講演会において発表済みであるが，ここではさらに問題を，供給水質による工業用水需要変動を考慮した場合に拡張して，議論することにする．

2. モデル化の前提条件

(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,…，Nの番号で表わす．また，計画対象期間をM個のステージに分け，順に1,…,Mの番号づけを行う．

(2)取上げる供給システムとしては，各ゾーンを地域単位とする，取水施設・上水道浄水場・工業用水道浄水場・三次処理場・ゾーン間送水管からなる施設群を考える．

(3)各ゾーンでは，その下流地点において本川の水質規制を行う．なお，水質としてはBOD(ppm)のみ考える．

(4)施設の拡張は，計画対象期間に発生する需要量(ステージごとに増加)が充足されるように行う．各ステージで供給不足が起こることはないように拡張することが要件とされるが，同時に，必要以上の規模の施設を供与して，遊休による機会損失がいたずらに大きくなることも避けることが必要である．

(5)三次処理水の再利用は工業用水需要のみを対象とする．なおその際，三次処理水は，工業用水道浄水と混合して工業用水道配水管網より利用者に供給する．なお以下では，三次処理水を混合した工業用水道浄水を，「混合工業用水」と呼ぶことにする．

(6)混合工業用水の需要量は供給水質の低下にともなって減少するが，この関係は岡田・吉永によって，混合率の関数として表わされることが既に研究されている．本研究では，この関係をモデルに組み込むことにする．

(7)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の建設費の償還額および維持管理費の支払い額の総和を取り上げ，これを最小化することとした．

3. 要求水質別需要量曲線

まず以下で用いる記号を次のように定義する．

D：生活用水需要量，$\overline{D}_{max}$：全工業用水需要量，$\overline{D}_{min}$：三次処理水だけで供給可能な工業用水需要量，r：工業用水の混合率，z_u：三次処理水再利用量，$\overline{z}_f$：工業用水道浄水場からの供給量，z_f：工業用水需要を満たすための上水道浄水場からの供給量，$\overline{D}(r)$：混合率rのときの混合工業用水道に対する工業用水需要量，$\overline{b}_f$：工業用水道浄水の水質，b_t：三次処理水の水質，$b(r)$：混合率rのときの混合工業用水の水質．このとき，次式が成立する．

$$r=\overline{z}_f/(\overline{z}_f+z_u)\quad(0\leqq r\leqq 1)\qquad(3.1)$$

$$b(r)=\overline{b}_f\,r+b_t(1-r)\qquad(3.2)$$

また，混合工業用水の供給量と需要量は等しいから，

$$\overline{D}(r)=z_u+\overline{z}_f=\overline{z}_f/r\qquad(3.3)$$

岡田・吉永は，兵庫県の主要河川について，混合率rに関する(すなわち要求水質別)混合工業用水需要曲線を求めている．ここではこれを次のように近似する．(図-1)

$$\overline{D}(r)=a/(1-br)\quad(a,b:\text{定数})\qquad(3.4)$$

式(3.1),(3.3)を(3.4)に代入・整理して，次式を得る．

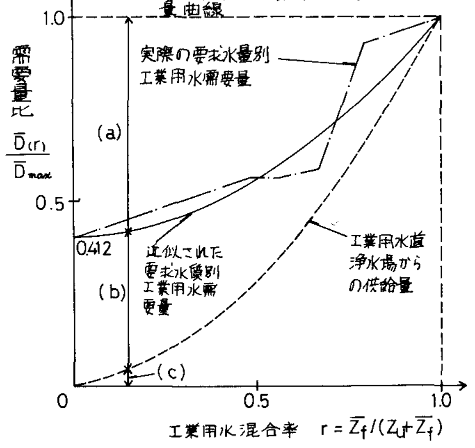
$$z_u+(1-b)\overline{z}_f=a\quad(z_u+\overline{z}_f\neq 0)\qquad(3.5)$$

これより，工業用水道浄水量$\overline{z}_f$と三次処理水再利用量は1対1対応し，線形関係が成立することがわかる．また上記の定数a, bは各流域ごとに次のように求められる．

$$a=\overline{D}_{min},\ b=1-\overline{D}_{min}/\overline{D}_{max}\qquad(3.6)$$

混合率rのときの，混合工業用水の水質では満足できない工業用水需要量と生活用水は，上水道浄水場からの供給を受けるものとして，その供給量を改めてz_fと定義すれば，次の関係式が成立する．

図-1　加古川水系流域における要求水質別工業用水需要量曲線



(a)　上水道より供給される部分
(b)　三次処理水の再利用量　Zu
(c)　工業用水道浄水場からの供給量

$$D+(\overline{D}_{max}-\overline{D}(r))=Z_f \qquad (3.7)$$

また、$$\overline{Z}_f=(\overline{D}_{max}/\overline{D}_{min})(\overline{D}_{min}-Z_u) \qquad (3.8)$$

式(3.3),(3.8)を(3.7)に代入し、地域間送水を考慮した補正項 $u-v$（u：他地域へ送水される上水量，v：他地域から送水される上水量）を加えると次式を得る。

$$Z_f=D+(\overline{D}_{max}/\overline{D}_{min}-1)Z_u+u-v \qquad (3.9)$$

同様にして、$\overline{Z}_f$についても次式が成立する。

$$\overline{Z}_f=\overline{D}_{max}-(\overline{D}_{max}/\overline{D}_{min})Z_u+\overline{u}-\overline{v} \qquad (3.10)$$

ただし，$0\leqq Z_u\leqq\overline{D}_{min}$，$Z_f,\overline{Z}_f\geqq 0$ $\qquad$ (3.11)

（$\overline{u},\overline{v}$は$u,v$に対応する工水量を表わす。）

であるから，(3.9),(3.10)を(3.11)に代入して，

$$D\geqq(1-1/\alpha)Z_u-(u-v) \qquad (3.12)$$

$$\overline{D}_{max}\geqq Z_u/\alpha-(\overline{u}-\overline{v}) \qquad (3.13)$$

以上の制約式は，以下のモデルの定式化に用いられる。

4. モデルの定式化

主な変数としては，x_i^K $\overline{x}_i^K$ ξ_i^K それぞれ上水道浄水場，工業用水道浄水場，三次処理場の拡張規模（i：ゾーン番号，K：ステージ番号），$w_{ij}^K,\overline{w}_{ij}^K$：それぞれ，ゾーン$i$から$j$への送水管のうち上水道専用，工業用水道専用のものの拡張規模，また$Z_{f,i}^K$ $\overline{Z}_{f,i}^K$，$Z_{u,i}^K$：先に定義したZ_f，$\overline{Z}_f$，Z_uに対応する，y_{ij}^K，y_{ji}^K：u,vに対応，$\overline{y}_{ij}^K,\overline{y}_{ji}^K$：$\overline{u}$，$\overline{v}$に対応する．$g_i^K,\beta_i^K$：ステージK，ゾーン$i$の取水地点の河川流量とその水質を表わす。また，0-1型の決定変数として$\Phi(i,j,K)$を導入する，主要な定数としては，$D_i^K,\overline{D}_i^K$：上記のD，$\overline{D}_{max}$に相当，S_i：ゾーンiの計画対象期間Tの初年度における水使用量，V_i^K：下水処理量，B_{i+1}^K：ステージK，ゾーンiの下流地点の水質基準値，F_i：ゾーンiの取水地点の維持流量，$Q_{i,i+1}^K,B_{i,i+1}^K$：ステージKにおいて，ゾーンiと$(i+1)$の区間の本川に支川より流入する流量，B_1，B_2：下水処理水，三次処理水の水質などである。またI_i：ゾーンiに隣接するゾーンの番号の集合で，ここでは$I_i=\{i-1,\ i+1\}$である。さらに費用関数としては，R_{ij}^K $\overline{R}_i^K$ P_i^K：x_i^K，$\overline{x}_i^K$，ξ_i^Kに対応し，$U_{ij}^K,\overline{U}_{ij}^K$：$w_{ij}^K,\overline{w}_{ij}^K$に対応する。（ただし各費用は，建設費の計画対象期間中の支払額＋維持管理費の総和を表わす。これらの記号を用いてモデルは次のように表わされる。

〈評価関数〉

$$\mathit{Minimize}\ G=\sum_{i=1}^{N}\sum_{K=1}^{M}\Big\{R_i^K+\overline{R}_i^K+P_i^K+\sum_{j\in I_i}\big(U_{ij}\Phi(i,j,K)+\overline{U}_{ij}\Phi(i,j,K)\Big\} \qquad (4\text{-}1)$$

〈制約条件〉　（$i=1,\cdots,N$；$K=1,\cdots,M$）

0-1条件

$$\Phi(i,j,K)=f\Big(\sum_{l=1}^{K-1}y_{ij}^l\Big)\Big\{1-f(y_{ij}^K)\Big\} \qquad (4\text{-}2)$$

$$f(y_{ij}^K)=\exp\{-100(1-\exp(-x))\} \qquad (4\text{-}3)$$

浄水条件

$$D_i^K\geqq(1-1/\alpha_i^K)Z_{u,i}^K-\sum_{j\in I_i}(y_{ij}^K-y_{ji}^K) \qquad (4\text{-}4)$$

$$\overline{D}_i^K\geqq Z_{u,i}^K/\alpha_i^K-\sum_{j\in I_i}(\overline{y}_{ij}^K-\overline{y}_{ji}^K) \qquad (4\text{-}5)$$

$$D_i^K\leqq\sum_{l=1}^{K}x_i^l+(1-1/\alpha_i^K)Z_{u,i}^K-\sum_{j\in I_i}(y_{ij}^K-y_{ji}^K) \qquad (4\text{-}6)$$

$$\overline{D}_i^K\leqq\sum_{l=1}^{K}\overline{x}_i^l+Z_{u,i}^K/\alpha_i^K-\sum_{j\in I_i}(\overline{y}_{ij}^K-\overline{y}_{ji}^K) \qquad (4\text{-}7)$$

取水条件

$$\sum_{h=1}^{i}Q_{h-1,h}^K+\sum_{h=1}^{i}S_h-V_i^K-F_i\geqq\sum_{h=1}^{i}\sum_{j\in I_h}(y_{hj}^K-y_{jh}^K+\overline{y}_{hj}^K-\overline{y}_{jh}^K) \qquad (4\text{-}8)$$

三次処理条件

$$Z_{u,i}^K\leqq\alpha_i^K\overline{D}_{max\,i}^K \qquad (4\text{-}9)$$

$$V_i^K\geqq Z_{u,i}^K+Z_{r,i}^K\quad(Z_{r,i}^K\text{：河川放流量}) \qquad (4\text{-}10)$$

$$\sum_{l=1}^{K}\xi_i^l\geqq Z_{u,i}^K+Z_{r,i}^K \qquad (4\text{-}11)$$

水質制約条件

$$(B_{i+1}^K-B_i^K)\Big(\sum_{h=1}^{i}Q_{h-1,h}^K+\sum_{h=1}^{i'}S_h\Big)+(B_{i+1}^K-B_{i,i+1}^K)Q_{i,i+1}^K+(B_i^K-B_1)V_i^K\geqq(B_{i+1}^K-B_i^K)\Big\{\sum_{h=1}^{i}\sum_{j\in I_h}(y_{hj}^K-y_{jh}^K+\overline{y}_{hj}^K-\overline{y}_{jh}^K)\Big\}+(B_2-B_1)Z_{r,i}^K+(B_i^K-B_1)Z_{u,i}^K \qquad (4\text{-}12)$$

送水管条件

$$w_{ij}\geqq y_{ij}^K \qquad (4\text{-}13)$$

$$\overline{w}_{ij}\geqq\overline{y}_{ij}^K \qquad (4\text{-}14)$$

この他に，全変数の非負条件が加われば，モデルの定式化は終了する。上記のモデルは，非線形混合整数問題を，$\Phi(i,j,K)$によって近似したものであり，Zoutendijkの斜影勾配法を用いて解くことができる。

5. 実証例

兵庫県の加古川流域を対象として実証分析を行ったが，その詳細は，紙数の制約上，講演時に譲ることにする。