

# 浄水調整池及び高度浄水処理施設を有する水道システムにおけるコスト最小化に関する考察

前・厚生省水道環境部（現・日本水道協会）\*早貸外幸  
厚生省国立公衆衛生院 \*\*真柄泰基  
環境庁国立公害研究所 \*\*\*乙間末広、\*\*\*\*大井 紘

\*日本水道協会 工務部 東京都千代田区九段南 4-8-9  
\*\*厚生省国立公衆衛生院 衛生工学部 東京都港区白金台 4-6-1  
環境庁国立公害研究所 \*\*\*総合解析部 \*\*\*\*環境情報部 つくば市小野川 16-2

## 概 要

わが国の水道は高普及率時代を迎えたが、頻発する濁水による不安定な水源に加え、原水の汚濁に起因する異臭味水等の被害が、全国規模で毎年発生している。このため、安全な水を安定的に供給することが、水道にとって今日的な課題となっている。この課題に応える一方法として、水量の確保には浄水調整池により、水質の確保には通常処理に生物処理と活性炭処理を付加した高度浄水処理施設による水道システムを設定した。原水の条件が濁水で水質が悪化した場合においても、需要に見合った浄水量を目標の水質で供給する供給条件(サービスレベル)を満足したうえで、コストが最小となる最適値が存在することを示した。さらに、供給条件の数種類の組合せについて同様に各々コストの最小値を求め、コストと供給条件との関係を表す等高線図が得られることを示した。拡張事業による水量の増加が期待されないにもかかわらず、水量及び水質の観点から安定供給を図るために、このようなシステムを導入しコスト増分の料金への転嫁を迫られるケースが今後増加するものと思慮され、その際議会等関係者への説明資料、ユーザの意向調査等の基礎資料作成に等高線図の活用が考えられる。

## キ - リ - ト

水道、濁水、原水水質汚濁、送水量、目標水質、最適設計、コスト最小化、高度浄水処理、流量調整池

### はじめに

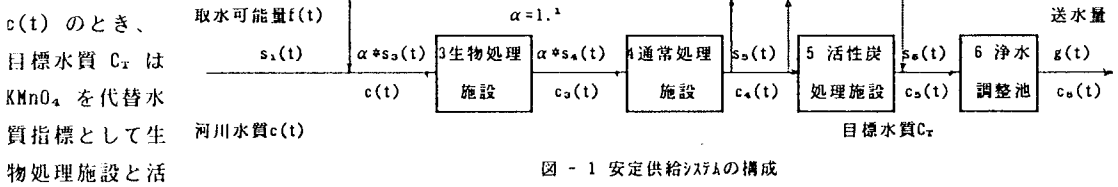
わが国の水道は高普及率の時代を迎え、国民生活はもとより都市活動にとっても不可欠な施設となり、また、生活水準の向上と意識の多様化を背景として、水量及び水質の安定的な供給を図ることがより一層強く求められている状況にある。一方、水量及び水質の面から見ると、昨今頻発する濁水による不安定な水源に加え、公共用水域の水質汚濁に起因するトリカドマシや異臭味水等に関する被害が全国規模で発生している。

そこで本報は、濁水で河川水質が悪化した場合においても所定の水質を有する浄水量を確保したうえで、コストを最小ならしめる最適設計のシステムが存在することを明らかにした。その場合に浄水量の満足度と目標水質について数段階のレベルを設定して、これらの組み合わせそれぞれについて求められたコストミナムの値を継ぐことにより、浄水量の満足度及び目標水質レベルとコストとの関係を示す等高線図が得れた。これらの成果により、水量及び水質の安定供給のための水道システムを新たに導入しようとする場合、その安定度、安全度のレベルとコストとの関係の定量的な把握が可能となる。

### 1. システムモデルの設定

システムは 図-1 に示すとおり、濁水による取水制限時の取水可能水量  $f(t)$  のもとで、浄水場から送りださ

れる需要量に見合った所定の送水量  $g(t)$  と  $f(t)$  とのギャップが浄水調整池で調整され  $g(t)$  が確保される一方、河川水質



性炭処理施設を沈殿と濾過の通常処理施設に付加した安定供給システムにより確保される。当該システムの前提条件は、次のとおりである。①取水から浄水調整池を経て送水までは自然流下とする。②生物処理施設は通常処理の前処理施設として水質改善に必要な処理時間  $H$  を有する施設である。また、各処理施設の貯留容量は浄水調整池の容量に加算しない。③通常処理施設における廃水は着水井へ返送され、生物処理と通常処理施設の処理水量は 10% 増加するが、着水井における水質への影響は無視する。④通常処理後の水質が  $C_r$  を確保している場合は活性炭処理施設を迂回する。 $C_r$  は水道法の水質基準より良好な水質、例えば、おいしい水のレベルとされる  $\text{KMnO}_4$   $3\text{mg}/\ell$  である。⑤  $g(t)$  は配水池により各需要水量がすでに調整されたもので、配水池の調整容量は  $g(t)$  にすでに折り込み済みである。⑥建設費用における用地費は含まれていない。

## 2. 計算対象の分類

① 渇水規模と原水の水質レベルとの現象パターン及び浄水システムにおける対策ケースの組み合わせにより、表-1

のとおり計算対象が、中規模渇水(ピークカット率が 25%、渇水期間が一年未満のレベル)と大規模渇水(ピークカット率が55%、渇水期間が一年以上のレベル)で、原水水質が中汚濁レベル(最大20mg/ℓ)

表-2 送水量削減率  $K$  と処理目標水質  $C_r$  による選択表

活目性炭処理 $C_r$ / ℓ	$C_r = 0$	case 13	case 9	case 5	case 1
$C_r < 3$	case 14	case 10	case 6	case 2	
$C_r < 6$	case 15	case 11	case 7	case 3	
$C_r < 10$	case 16	case 12	case 8	case 4	
	30	20	10	0	
	送水量削減率 (ピークカット) $K$ %				

(注)  $C_r = 0$  は全水量を活性炭処理することを表す。

と高汚濁レベル(最大40mg/ℓ)の8分類である。さらに、②表-1の各分類について渇水時に送水量のピークカット率4段階(削減率 $K=0\sim 30\%$ により需要家にも協力を求める)と  $C_r$  の4段階(活性炭全量処理のレベル  $C_r=0$  から水道法の水質基準レベル  $C_r=10\text{mg}/\ell$  まで)から選択し、表-2の16ケースについて最適化計算を行った。

## 3. 計算式

各施設の出入り口濃度を規定する状態方程式、建設費用関数式、及び運転費用関数式は、実測データ、実施設計例等を基に回帰式を4種類の関数型(一次式、指数式、対数式、exp式)について求め、これらのうち最も相関性が高い関数型を選択した。その一例として、生物処理施設について示せば、次の通りである。

状態方程式:  $c_3(t) = \{ [72.43 - 4.008 \cdot \ln(H)] / 100 \} * c_1(t)$   $c_1(t), c_3(t)$ : 出・入口濃度 [mg/ℓ],  $H$ : 処理時間 [hr]  
 建設費用関数式:  $E_3 = 29.01 * (1.1 S_{\text{Max}})^{0.97} * (H/2)^{0.75}$   $E_3$ : 建設費用 [百万円],  $S_{\text{Max}}$ : 最大処理水量 [ $10^3\text{m}^3/\text{日}$ ]  
 運転費用関数式:  $M_3(t) = 1.8 * (H/2)^{0.70}$   $M_3(t)$ : 単位水量当りの運転費用 [円/ $\text{m}^3$ ]

なお、 $f(t)$ 、 $g(t)$ 、 $c(t)$  は、それぞれ水道事業体の施設管理年報、水質年報等から半月単位(5日間)で求めたが、 $f(t)$  及び  $g(t)$  のレベル値は  $10 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$  である。

## 4. 計算の手順

計算は半月単位で、浄水調整池の貯留量が満杯  $V(t_0)$  から出発し、同じ状態に戻るまでを1サイクルとしてこの期間について図-2のフローチャートの番号に従って行う。①において送水量の最大値  $g(t)_{\text{max}}$  と平均値  $g(t)_{\text{av}}$  が求められる。②において取水される最大値  $S_{\text{Max}}$  は、 $g(t)_{\text{av}}$  より大きく、 $f(t)$  の最大値  $f(t)_{\text{max}}$  よりも小さい範囲にとれる。その範囲内で  $S_{\text{Max}}$  のある値を仮定すると③により各処理施設の建設費が求められる。仮定された  $S_{\text{Max}}$  の値に対する  $s(t)$  は、満杯  $\{V(t) = V(t_0)\}$  のときは④により溢水しないように  $g(t)$  と  $S_{\text{Max}}$  とのいずれか小さい方の値を取る。満杯でない  $\{V(t) < V(t_0)\}$  のときは、⑤により  $f(t)$

と  $S_{Max}$  とのいずれか小さい方の値を取る。⑥により  $V(t)$  は  $s(t)$  と  $g(t)$  との差から求められる。⑦により貯水量の最大値  $Max V(t)$  と最小値  $Min V(t)$  との差から容量  $V$  が求められるので⑧により建設費が求められる。⑨において③と⑤との和が求められるので  $P_1$  は④の第一項となる。一方、⑩～⑫によって  $M(t)$  が求められる。これに  $s(t)$  {生物処理施設と通常処理施設では各々  $1.1 \cdot s(t)$ 、活性炭処理施設では  $s(t)$ } を乗じて  $P_2$  は④により一か年間の総和で求められ④の第二項となる。このように  $s(t)$  を決定しながら  $S_{Max}$  を変数とし、 $H$  をパラメータとして④から  $P$  が求められる。

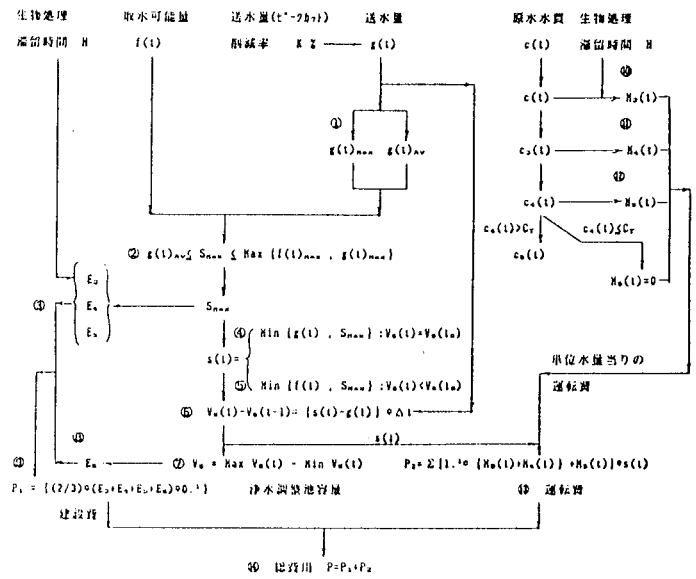


図-2 計算手順フローチャート

### 5. 計算結果

中規模濁水を例に、高汚濁原水で  $K=0\%$ 、 $C_T=0\text{mg/l}$  の場合を基本に記述する。なお、大規模濁水の場合に  $g(t)$  を確保するためには、 $10,000 \times 10^3 \text{ m}^3$  規模の浄水調整池が必要である。この容量は極めて大きく水道専用施設の中でのみ対応することは現実的には困難と考えられるが、実際の対応策については別途検討が必要である。

#### 5.1 総費用が最小となる条件

$K$  と  $C_T$  とのある組み合わせについて、 $P$  を最小にする設計変数は、 $K$  のある値に対して  $S_{Max}$  が決まり、 $C_T$  のある値に対して  $H$  が決まる。このようにして求められた  $S_{Max}$  と  $P_{Min}$  との関係から、 $H$  をパラメータとして  $S_{Max}$  と  $P_{Min}$  で除した  $P/P_{Min}$  との関係を図示すると、高汚濁原水で  $K=0\%$ 、 $C_T=0 \text{ mg/l}$  の場合については図-3 に示すとおりである。これによると  $S_{Max} = 90.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$  で  $P$  は最小となり  $H$  をパラメータとして変動する。

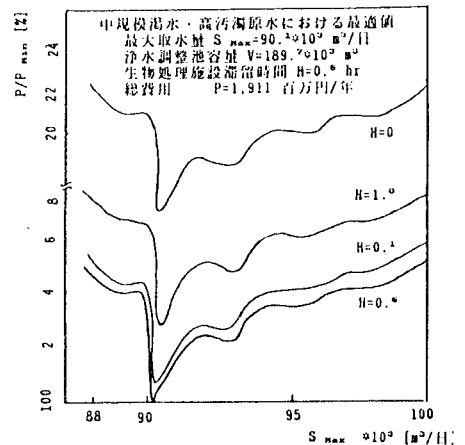


図-3 生物処理施設滞留時間別総費用の変化

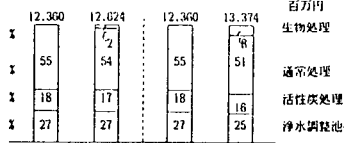
$P$  は生物処理施設なし ( $H=0$ ) が一番高く  $H$  を長くするに従って安くなるが、 $H=0.0 \text{ hr}$  よりも長くなるとむしろ高くなり  $H=0.0 \text{ hr}$  のとき  $P=1,911.0$  百万円/年で最小値となる。こうして求められた  $P$  が最小となる場合の条件を  $K$ 、 $C_T$  の組み合わせごとに、中汚濁原水及び高汚濁原水それぞれについて見ると、中汚濁原水の場合は、 $C_T=0 \text{ mg/l}$  から  $C_T=10 \text{ mg/l}$  のケースに対応して、 $H=0.11 \text{ hr}$  から  $H=0.02 \text{ hr}$  へ大略半分になっている。高汚濁原水の場合も同様に  $H=0.0 \text{ hr}$  から  $H=0.2 \text{ hr}$  へ  $1/3$  と短くなっている。 $C_T=6 \text{ mg/l}$  では  $H=0.0 \text{ hr}$  と長くして生物処理に負担をかけた方が  $P_1$  は高くなるものの通常処理以降の負担が軽減され全体として  $P_2$  が安くなるため  $P$  が安くなっている。一方、 $K=0\%$  から  $20\%$  へ移行するに従って  $V=189.7 \times 10^3 \text{ m}^3$  から  $181.0 \times 10^3 \text{ m}^3$  に僅かに減少し、 $K=30\%$  になると  $V=0$  となり浄水調整池は不要となる。

#### 5.2 費用構成割合

$P$  が最小となる場合における  $P_1$ 、 $P_2$ 、及び  $P$  それぞれにおける各処理施設等の費用構成割合は、 $K=0\%$ 、 $C_T=0 \text{ mg/l}$  の場合について例示すると図-4 に示されたとおりである。これによると原水の汚濁レベルにかかわらず①  $P_1$  の内訳割合は、通常処理施設が1番大きく、2番目が浄水調整池で、3番目が活性炭処理施設で

生物処理施設が1番小さい (1) 建設費 P<sub>1</sub>

い。②P<sub>2</sub> では、通常処理施設と活性炭処理施設がほぼ同じ割合で略50%を占め、残りが生物処理



施設である。③P では、原水の汚濁レベルにより P<sub>1</sub> と P<sub>2</sub> との割合は異なるが、いずれの場合も生物処理を行った方が中汚濁原水で約10%、高汚濁原水で約20~30%安い傾向にあり、高汚濁原水ほどその効果が高い。なお、高汚濁原水の場合、C<sub>T</sub>=0~3mg/l の H=0.6hr に比し C<sub>T</sub>=6mg/l では H=0.9hr と少し時間をかけて前処理を十分行い、通常処理以降の負荷を下げた方が P は安くなる。C<sub>T</sub>=10mg/l になると費用に対する感度が水質よりも水量の方が相対的に高くなるため H=0.2hr と短かくてよい。

### 5.3 コストの等高線図

表-2 に示された K と C<sub>T</sub> との組み合わせにおけるそれぞれの P の最小値を求め、それを総処理水量で除して単位水量当たりの処理単価とする(以下、「コスト」と言う)。これを K=0% C<sub>T</sub>=0mg/l の場合のコストを 100%とおき図-5-1、

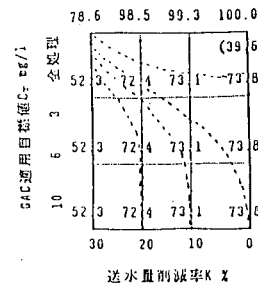


図-5-1 (中規模汚濁水・中汚濁原水)

図-5-2 のとおり無次元化して示すと、原水汚濁レベルに応じ需要家から見て条件の一番好ましい図の右上 (K=0%, C<sub>T</sub>=0mg/l) から、条件の一番悪い図の左下 (K=30%, C<sub>T</sub>=10mg/l) に向かって、条件に応じてコストが等高線状に描かれる。これによりサービスレベルとコストとの関係が明らかとなる。即ち、①中汚濁原水では K 方向は比較的なだらかであるが C<sub>T</sub> 方向は急勾配である。また、C<sub>T</sub>=6mg/l より条件を緩くしても C<sub>T</sub>=3mg/l と同じような状況にある。また、一番悪い条件のコストは、最も好ましい条件のコストの半分くらいである。②高汚濁原水では K 方向の勾配はゆるいが、C<sub>T</sub> 方向の勾配は C<sub>T</sub>=3mg/l から C<sub>T</sub>=6mg/l の間で急勾配となる。

コストの等高線図がこのような傾向を示すことから、コストが最小となる最適値において、水質の変動は水量の変動よりも影響を受け易く、また、原水の汚濁レベルが高いほど目標水質に対する最適値の変化が大きいシステムの特性を有するものと考えられる。

おわりに

「水量の確保」及び「水質の確保」の観点から、浄水調整池と高度浄水処理施設とから構成されるシステムを設定し、当該システムについてコストが最小となる最適化計算を行った。その結果、原水の条件(濁水規模と水質汚濁レベル)と浄水の条件(送水量のヒークカットと目標水質レベル)との組み合わせについて、それぞれコストが最小となる最適システムが存在することが確認された。また、その場合のコストが浄水の供給条件に応じて等高線状に求められることも判明した。今後この方法論を基として精度の向上を図ることにより、次のような活用方法が考えられる。新たに設定しようとする安定供給システムについて、安定度のレベルとコストとの関係を把握するのに活用できること。また、ほとんどの水道事業者において拡張事業を有していない状況で安定供給を図るために、高度浄水処理施設や浄水調整池を設置して水量の増加を伴わない施設整備を実施しなければならない現況から、新たな施策の展開やコスト増加分の負担についての考察も可能となる。なお、今後、状態方程式等の一連の関数式を規定するために必要なデータの蓄積とその開放が進み、データベースとして活用が可能となれば最適化計算に必要な状態方程式等一連の関数式の精度向上等が図られ、また、KMnO<sub>4</sub> を含む複数の水質指標への展開が可能になるものと考えられる。

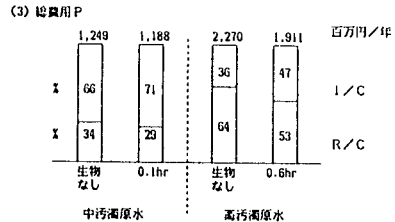
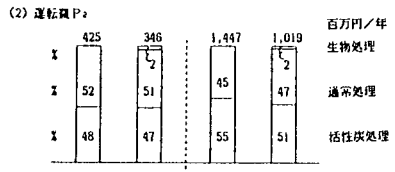


図-4 最適値における費用構成割合 (中規模汚濁水 k=0, C<sub>T</sub>=0)

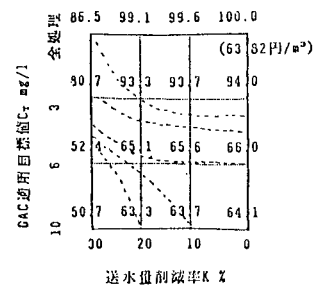


図-5-2 (中規模汚濁水・高汚濁原水)

送水量削減率・処理目標水質によるコストの変化