

(15) 運転方式も勘案した最適設計による安定供給のための水道システムの特性のコスト解析

ANALYSIS OF THE COST CHARACTERISTICS OF A HIGHLY UPGRADED WATER SUPPLY
SYSTEM DESIGNED THROUGH OPTIMIZATION CONSIDERING OPERATION SCHEME

早貸外幸*・大井紘**・真柄泰基***

Sotoyuki HAYAKASHI*, Ko OI**, Yasumoto MAGARA***

ABSTRACT : In this paper, an oscillatory behavior of optimal solutions of an advanced water supply system is examined. The system has a buffer reservoir for raw water as well as a biological treatment unit and an activated carbon treatment one as advanced treatment facilities to fill a qualitative and quantitative demand of supply water in the case of drought. For the optimal design of the system, a formulation and a solution procedure have been given in our former paper. Here, for changing values of supply water quality, fluctuation with sharp increase and decrease behavior of the corresponding optimal contact length of the biological treatment unit is discovered. The optimal solutions are scrutinized to reveal the reason of the oscillation is the relation of trade-off between the design parameters of the two advanced treatment facilities of the system. This means the design procedure shown in the former paper is indispensable for the optimal design of the system.

KEYWORDS : *Drought, Raw water pollution, Buffer reservoir, Advanced treatment, Cost optimization, Systems characteristics, Cost analysis,*

1. はじめに

日常生活に不可欠な水道は、近年の異常気象に起因する小雨傾向により¹⁾、毎年全国の何処かで渇水に悩まされ、また、公共用水域の環境基準の達成率が十分でないため²⁾、毎年大略 1500 万人の異臭味被害を受けている。そこで、著者らは、渇水時を含め水量及び水質の両面で原水の状態が異常な場合にも、所要の水量と水質の浄水を供給する(以下、「安定供給」という。)システムを検討してきている。そのシステムは、水量の確保を当該システムの最上流に位置する原水調整池により、また、水質の確保を沈殿と急速濾過から構成される通常の浄水処理施設(以下、「通常処理施設」という。)に生物処理施設及び活性炭処理施設(以下、「GAC」という。)を付加した高度浄水処理施設により、その目的を達成する水道システム(以下、「安定供給システム」という。)である。

前報では³⁾、この安定供給システムについて、次のことを示した。

- ① 実測データなどから当該システムを構成する各ユニットプロセスの状態方程式などを数式モデルにより設定した。
- ② 当該システムを総費用(建設費と運転費の和)最小の観点から最適となるように設計する方法を定式

* Sotoyuki HAYAKASHI (株) 日水コン (The Nihon Suido Consultants Co., Ltd)

** Ko OI 国立環境研究所 (The National Institute for Environmental Studies)

*** Yasumoto MAGARA 国立公衆衛生院 (The Institute of Public Health)

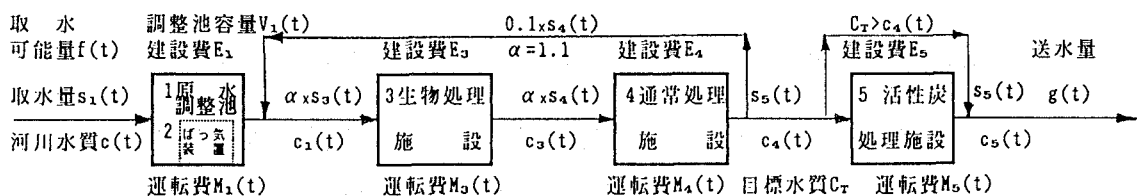


図 - 1 安定供給システムの構成

化した。

③ それに基づき渇水規模と原水汚濁レベルによる原水の条件に応じ、浄水の所要送水量の充足度と目標水質レベルの組合せごとに総費用の最小値を求めた。

④ 数段階の目標水質レベルに対応する生物処理の最適処理時間が、併用する GAC の作動時間との組合せにより、常識的な直感と矛盾しない挙動を示すことを示し、当該システムの特性を明らかにした。

本報では、④ について、前報³⁾よりも目標水質を微細に変化させていったときの対応する生物処理の最適処理時間の挙動を詳細に検討した結果、次のことを明らかにした。さらに、目標水質がある値以下になると、それを達成するためには、生物処理時間を単純に増加させる替わりに、GAC を全時間作動させると共に、2 章で述べる原水調整池の容量を水量確保に必要な容量よりも大きくし、その平準化効果を活用する方が、総費用は最小となることを詳細に検討し確認した。

⑤ 生物処理時間の挙動は様相が一変し、急激な増減の繰返しを含む複雑なものとなることが分かった。即ち、目標水質の値が小さくなるに応じ、直感的には水質を向上させるために生物処理時間が単調に長くなると考えられるが、この直感に反した興味深い現象が見いだされた。

⑥ その原因は、GAC の作動回数と生物処理時間とが、トレードオフの関係にあることによっていることを明らかにした。

⑦ 生物処理時間の複雑な増減の挙動は、生物処理施設の入口水質及び設計変数の増減に対して出口水質が単調に変動するこのシステムのユニットモデルからは予想できない。

⑧ この増減の挙動は、そのようなユニットを結合させて、一つのシステムとして構成したことのみ起因するのではなく、目標水質などの束縛条件を入れた処理費用を最小にする最適問題としたことによって生じている。即ち、ユニットの特性からは、システムの特性は予測出来ない。

⑨ したがって、「要素の単純な寄せ集めではないものとしてのシステム」の優れた実例が、水道にとって緊急な課題である安定供給システムに即して存在する。

⑩ さらに、システムの最適設計に際し、ユニットの特性から最適解の挙動を予測するためには、前報³⁾が示すような固有の方法論が必要である。

2. 安定供給システム

安定供給システムは、図-1 のとおり導水施設の途中に原水調整池を設置し、通常処理施設に、生物処理施設と GAC を付加した構成とした。原水調整池のばっ気装置は、前報³⁾と同じ理由により省略する。

2.1 原水調整池

取水可能水量 $f(t)$ と需要水量に見合った送水量 $g(t)$ との差は、原水調整池の貯留容量 V_1 を利用し、取

水量で原水調整池の入口流量でもある $s_1(t)$ と $g(t)$ との差を平常時は貯留し、渇水時は吐出することにより、その差を調整する。この場合の原水調整池の貯留水量を $V_1(t)$ とし、流量調整に必要十分である貯留容量を $V_{1r.o.}$ と表す。原水調整池内では混合による原水水質の時間変動が平準化される効果（以下、「平準化」という。）を有する。平準化のため原水水質 $c(t)$ と出口水質 $c_1(t)$ とは異なる。

2.2 浄水処理施設

浄水処理施設の入口水質と出口水質との関係は、次章の 3 節 2 項の状態方程式による。生物処理施設以降の各浄水処理施設が貯留機能を有しないため、 $g(t)$ の値が原水調整池の出口水量に等しくなる。

- (1) 生物処理施設の入口水質 $c_1(t)$ はハニカムタイプで処理時間 H の処理により出口水質 $c_3(t)$ となる。
- (2) 通常処理施設の入口水質 $c_3(t)$ は、処理により出口水質 $c_4(t)$ となるが、洗浄排水などは生物処理施設の前に戻される。
- (3) $c_4(t)$ の値が目標水質 C_T の値を越えている場合には、固定床式の GAC の処理により出口水質 $c_6(t)$ となるが、その他の場合はこれを迂回する。いずれの場合も、それ以降、即ち、システム出口の流量を $s_5(t)$ 、水質を $c_5(t)$ とする。

3. 最適化計算

原水水質 $c(t)$ を有する制約条件 $f(t)$ のもとで、安定供給の要件 $g(t)$ 及び C_T を満たし、コストが最小となる最適システムを設計するため、以下に述べるとおり、設計変数と制約条件のもとに、計算の前提条件を設定し、数式モデルを用いて、計算手順により、最適設計の手順を構成した。設計が標準化されている通常処理施設は、費用計算の対象とはするが、最適化の設計変数を持たないものとする。

3.1 設計変数と制約条件

(1) 設計変数

- ① 原水調整池の容量 V_1 (V_1 には平準化の効果もあるので、 $V_{1r.o.}$ よりも大きい容量も意味を持ちうるので、 V_1 も設計変数となる。)
- ② 生物処理施設における処理時間 H

(2) 制約条件

- ① 取水量と取水可能水量： $f(t) \geq s_1(t)$
- ② 送水量の確保： $s_5(t) = g(t)$
- ③ GAC の出口水質と目標水質： $C_T \geq c_6(t)$

3.2 計算の前提条件

- ① 原水調整池の中の水質の分布は、完全混合モデルに従う。
- ② 導水から送水までは、自然流下とする。
- ③ 各浄水処理施設における貯留容量は考慮しない。
- ④ 通常処理施設の排水などは着水井へ返送され、生物処理施設と通常処理施設における処理水量は、それぞれ 10% 増加するが水質は変化しない。
- ⑤ 原水調整池の満杯状態（初期 t_0 ）から計算を始め、差分計算のステップ幅 Δt を半旬（5日間）として、渇水時を経て終期 $t_E = 73$ 半旬まで（以下、「1 サイクル」と呼ぶ。）計算を行う。1 サイクルの終期において、水量・水質とも初期状態に戻っている。
- ⑥ 建設費と運転費との和を総費用とし、用地費は含めない。

表 - 1 原水調整池の状態方程式、建設費関数式

1. 原水調整池	
状 態 方 程 式	$c_1(t) = \{V_1(t) \times c_1(t-1) + S_1(t) \times c(t) \times \Delta t\} / \{2 \times V_1(t) - V_1(t-1) + g(t) \times \Delta t\}$
建 設 費 関 数 式	$E_1 = 32.06 \times V_1^{0.7711}$
t: 時間[日], $\Delta t=5$ 日, $S_1(t)$: 取水量[$10^3 \text{ m}^3/\text{日}$], $c(t)$: 河川水質[mg/ℓ] $c_1(t)$: 原水調整池の水質[mg/ℓ], E_1 : 原水調整池の建設費[百万円] $V_1(t)$: 原水調整池貯留水量[10^3 m^3], V_1 : 原水調整池容量[10^3 m^3]	

各処理施設の状態方程式、建設費関数式、運転費関数式

	3. 生物処理施設	4. 通常処理施設	5. 活性炭処理施設
状 態 方 程 式	$c_3(t) = \{72.43 - 4.008 \times \ln(H)\} / 100 \times c_1(t)$	$c_4(t) = 1.707 \times \exp\{0.03733 \times c_3(t)\}$	$c_5(t) = 0.03619 \times c_4(t)^{2.413}$
建 設 費 関 数 式	$E_3 = 29.01 \times \{1.1 \times g(t)_{\text{Max}}\}^{0.97} \times (H/2)^{0.75}$	$E_4 = 101.2 \times \{1.1 \times g(t)_{\text{Max}}\}^{0.9153}$	$E_5 = 15.62 \times \{g(t)_{\text{Max}}\} + 782.6$
運 転 費 関 数 式	$M_3(t) = 1.8 \times (H/2)^{0.70}$	$M_4(t) = 0.8628 \times c_3(t) - 0.5947$	$M_5(t) = 10.65 \times c_4(t) - 18.13$
g(t) _{Max} : 最大通水量[$10^3 \text{ m}^3/\text{日}$], c(t): 各施設の水質[mg/ℓ], H: 処理時間[hr] E: 各施設の建設費[百万円], M(t): 各施設の単位水量当たりの運転費[円/ m^3]			

3.3 数式モデル

数式モデルは実データに基づき、以下のとおり設定した。

(1) 水量関数式、水質関数式

渇水のために平常時の流量のうち一定値以上を通水しないことをピークカットといい、その一定値と平常時における流量の最大値との差（絶対値）の最大値に対する割合をピークカット率（以下、取水の場合を「K'」、送水の場合を「K」とする。）という。本報では、渇水規模を渇水期間が1年未満で取水量のK'が20%のレベルとし、また、g(t)のピークカット率は、K=0%（以下、「%」を省略する。）の場合を主体とした。C_Tの計算範囲は、水道法の旧水質基準（平成5年改正）であるC_T=10 mg/l（以下、「mg/l」を省略する。）までとし、計算のピッチを前報³⁾よりも小さい $\Delta C_T=0.1$ とした。

① 水量関数式は、前報³⁾同様に次の2式がある。

取水可能水量関数式 f(t) は、平常時・渇水時について或る一級河川の流量パターンを用い、そのピーク値は $100 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$ とする。送水量関数式 g(t) は、某用水供給事業の送水パターンを用い、そのピーク値 g(t)_{Max} は f(t) と同じ $100 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$ とする。

② 水質関数式は前報³⁾と同様に、原水水質のみであり過マンガン酸カリウム消費量（以下、「KMnO₄」という。）を水質指標として選定した。原水水質関数式 c(t) は、別の或る一級河川の水質パターンから求め、その汚濁レベルは KMnO₄ として最大 40 mg/l、平均 25 mg/l である。

(2) 状態方程式、建設費関数式、運転費関数式

各計算式は実績データに基づき求めた前報³⁾と同じ式を用い、原水調整池の状態方程式、建設費関数式を表-1の上段に、各処理施設の状態方程式、建設費関数式、及び運転費関数式を下段に示す。このことから

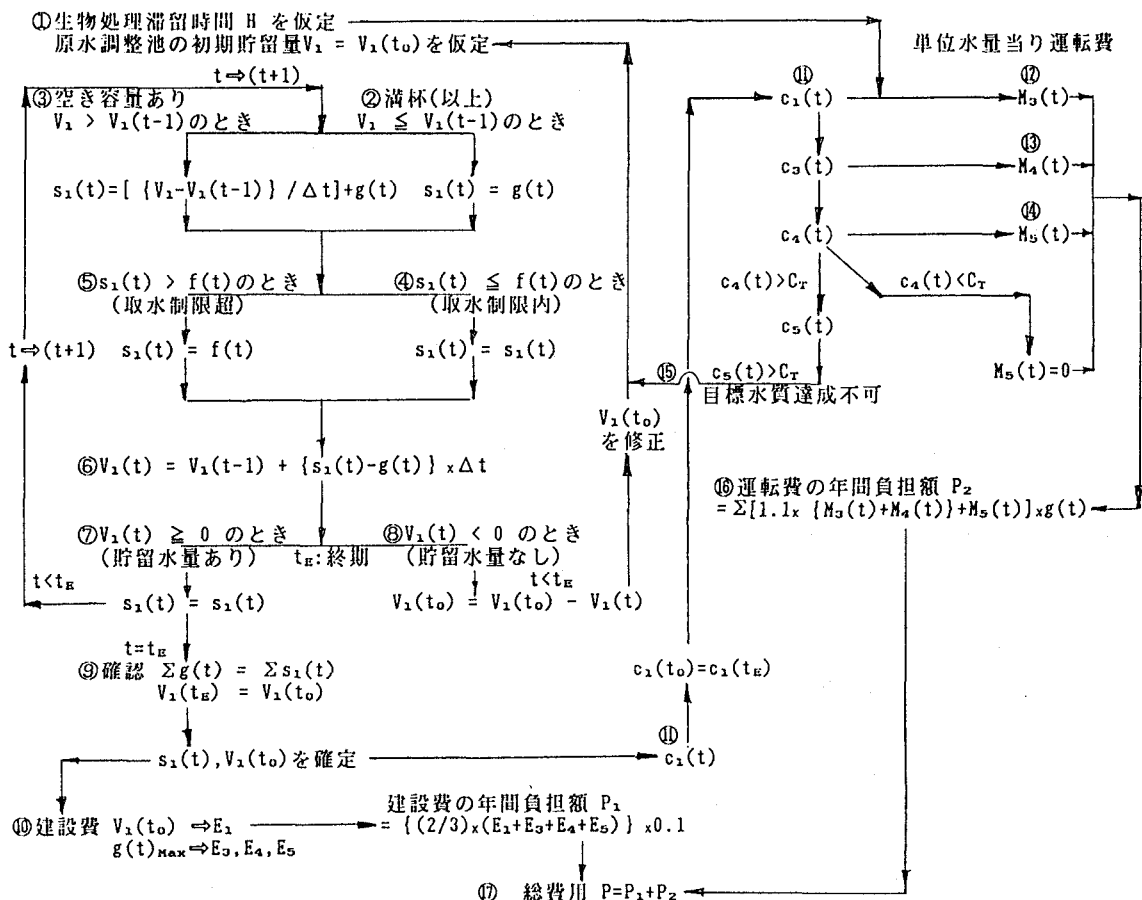


図 - 2 原水調整池の計算手順フローチャート

安定供給システムを構成する各ユニットの状態方程式などが、線形、冪乗、及び一次結合などの極めて単純な関数形で表示されていることが分かる。

① 状態方程式：原水調整池において平準化があるので $c_1(t)$ に関する微分方程式を差分形に変形する。

② 建設費関数式：各施設の建設費は、原水調整池 E_1 、生物処理施設 E_3 、通常処理施設 E_4 、及び GAC の E_5 とする。これらの和である全建設費 E に対し、国庫補助金の残額を起債により賄うための年利息、ならびに各施設に毎年の減価償却額を考慮して、毎年の建設費負担額 P_1 は、次式で表わされる。

$$P_1 = (2/3) \times [E_1 \{V_1(t_0)\} + E_3 \{H, g(t)_{MAX}\} + E_4 \{g(t)_{MAX}\} + E_5 \{g(t)_{MAX}\}] \times (0.1) \quad (1)$$

③ 運転費関数式：自然流下を仮定しているので水量確保のための運転費を規定する必要がない。一方、水質確保のための運転費 P_2 は、表 - 1 の下段に示すように、生物処理施設 $M_3(t)$ 、通常処理施設 $M_4(t)$ 、及び GAC の $M_5(t)$ を単位水量当たりで規定しているので、それぞれの処理水量 (生物処理と通常処理は 10 % 増し) を乗じた総和として次式で与えられる。

表-2 総費用 P の値を最小にする条件 (V_{1opt} , H_{opt})
(中規模濁水、高濁度原水)

ピークカット率 K %		30	20	10	0
原水調整池 $V_{1opt} \times 10^3 \text{ m}^3$		0	179	181	188
生物処理時間 H_{opt} hr	= 3 mg/ℓ	0.56	0.99	0.99	0.99
	= 6	0.71	0.18	0.17	0.15
	=10	0.18	0.18	0.17	0.15

$$P_2 = \sum [(1.1)x\{M_3(t) + M_4(t)\} + M_5(t)]xg(t) \quad (2)$$

3.4 計算手順

計算手順フローチャートは図-2 に示す前報³⁾と同じであるが、その要点を以下に述べる。

- ① 1 サイクルの初期 t_0 で、 H 及び原水調整池が満杯状態の $V_1(t_0)$ を仮定する。
- ② 原水調整池へ取り込む最大取水量は、原水調整池が満杯ならば $g(t)$ であり、空容量があれば Δt で満杯にする水量 $\{[V_1 - V_1(t-1)]/\Delta t\} + g(t)$ である。貯留状況に応じ、 $s_1(t)$ としてその水量を仮定する。
- ③ 仮定された $s_1(t)$ は $f(t)$ を上限とし、 $s_1(t)$ と $g(t)$ との差を貯留量の増・減分として、新しい $V_1(t)$ が決定される。 $V_1(t)$ が負でないならば、 $t \rightarrow (t+1)$ として 1 サイクルの終期 $t=t_E$ になるまで ② へ進む。 $V_1(t)$ が負ならば、① に戻り一層大きい $V_1(t_0)$ を仮定しなおす。
- ④ ③ の終期において総取水量 $\sum s_1(t)$ と総送水量 $\sum g(t)$ とが等しく、貯留量が初期状態に復し、 $V_1(t_0)=V_1(t_E)$ であれば $s_1(t)$ と $V_1=V_1(t_0)$ が確定され、(1) 式から P_1 が決定される。もし、 $c_6(t)$ の値が C_T の値を越えている場合は、① に戻り一層大きい $V_1(t_0)$ を仮定しなおす。
- ⑤ 表-1 から、各施設ごとに単位水量当りの運転費にそれぞれの処理水量を乗じた総和として、(2) 式により P_2 の値を求める。
- ⑥ (1) 式と (2) 式の和から総費用 P の値を求める。このように C_T の値に応じ、仮定した V_1 の値について、 H の値をパラメータとして P の値の最小値 P_{min} を求める。

3.5 コスト最小化の条件

P_{min} の値を与える最適処理時間 H_{opt} の値と C_T の値との関係の概略は、表-2 のとおりである。この表で見るかぎり、 C_T の変化に対応する H_{opt} の値の挙動は、必ずしも単調ではないものの、急激な変化を繰り返すという特性は示していない。この表-2 で見る H_{opt} の値の挙動の平板さは、システムを構成するユニットに関する状態方程式の関数形が単純であったことを反映しているかのごとくに解釈されかねない。しかし、 C_T の変化に対応する H_{opt} の値の挙動を ΔC_T の計算ピッチを前報³⁾よりも小さくして、詳細に観察すると様相は一変する。その結果を、 $K=0$ の場合について図-3 に示す。 C_T の値と H_{opt} の値との関係は、大局的には前報³⁾と同じである。しかし、より詳細に見ると、この図から視覚的に直ちに分かるように C_T の変化に対応する H_{opt} の値の挙動は、急激な増減の繰返しを含む複雑なものとなる。GAC の作動状況と対応させて H_{opt} の値の変化を検討すると、以下ようになる。

まず、 $4.8 \leq C_T \leq 10.0$ の区間で C_T の値が小さくなるにつれて、 H の値を長くして GAC の作動なしで $c_4(t) \leq C_T$ ならしめることが可能である。この C_T の区間では、 H_{opt} の値は単調に推移し、関数形の単純なユニットを組合わせたシステムの最適解の挙動としても、また、目標水質を厳しくすると生物処

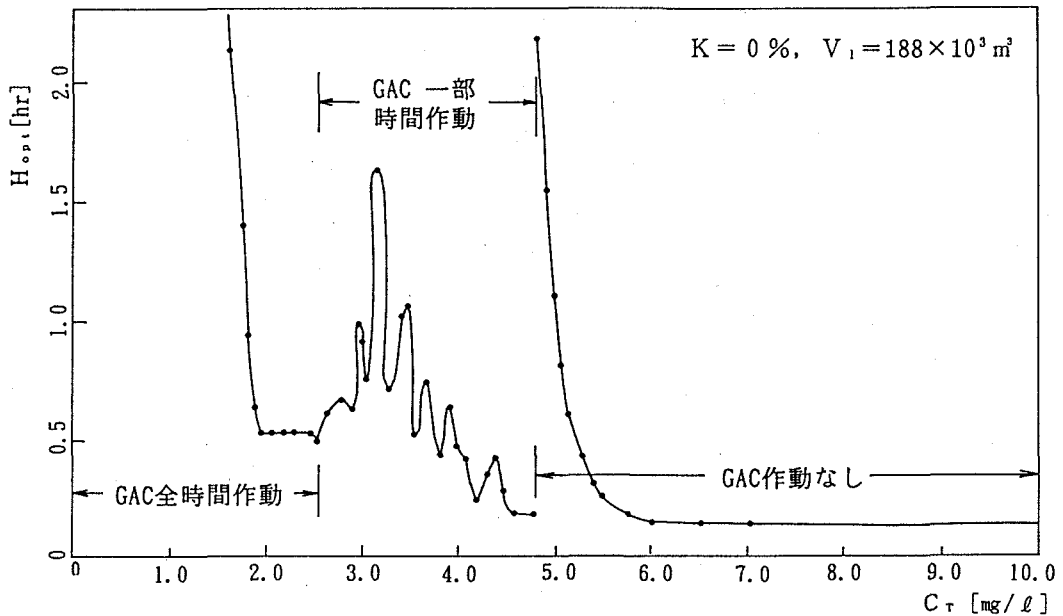


図-3 $P_{\min}$ ならしめる C_T と H_{opt} との関係

理時間を長くしなければならないという対応関係としても、先に述べた直感と一致する。

ところが、 $C_T \leq 4.7$ の区間になると時として $c_4(t) > C_T$ となり、この部分には $C_T \geq c_5(t)$ を達成するために GAC の作動を必要とする。

つぎに、 $C_T = 3.2$ の近傍で H_{opt} の値がピークを持ち、局所的には H_{opt} の値が振動することをはじめ、 $2.0 \leq C_T \leq 2.5$ の区間では $H_{opt} = 0.51$ hr (以下、「hr」を省略する。) とほぼ一定となる。こまでは、 $V_{1opt} = V_{1req}$ となっている。

さらに小さい C_T の値である $C_T \leq 1.75$ の区間では、目的関数 P を最小にするために、最適な原水調整池の容量 V_{1opt} は、 $V_{1req} = 188 \times 10^3 \text{ m}^3$ (以下、「 $\times 10^3 \text{ m}^3$ 」を省略する。) ではなく、より大きくして平準化の効果を活用するものとなっている。即ち、 C_T の変化に対して、 H_{opt} の値は複雑に挙動し、 V_{1opt} も変化する。このことを、次章で詳細に検討する。

4. 最適設計値の挙動の検討

前章 5 節で示したように、浄水目標値 C_T と送水量 $g(t)$ のピークカット率 K との組合わせに対して設計変数である原水調整池容量 V_1 と生物処理時間 H との最適設計値の組合わせ (V_{1opt} , H_{opt}) が定まる。この最適設計値の挙動については、次のように考えるのが自然な予測であろう。一定の K の値について、 C_T の値をより小さく設定することは、安定供給システムに対する性能要求レベルがより厳しくなるため、これに対応して最適な H_{opt} の値も徐々に長くなる。 C_T の値の減少に応じ、 H の値が長くなることを表-2 で示したが、これは上述の自然な予測による挙動であるかに見える。しかしながら、 C_T の値の変化に対する H_{opt} の値の挙動を詳細に検討すると、そのように単純ではない。

4.1 生物処理時間の挙動の分析

まず、 $4.8 \leq C_T \leq 10$ の区間において、 C_T の値の減少に伴い GAC の作動なしで、 H_{opt} の値は単調に

増加する。 C_T の値がこの区間では GAC の作動がないので、 C_T の値の減少を H_{opt} の値の増加で補完したもので、前述の予測のとおりである。しかし、それ以上の C_T の値の減少に伴い H_{opt} の値は、次のように複雑に挙動する。このような現象が発生する理由について、以下に記述する。

(1) $4.7 \leq C_T \leq 4.8$ の区間において H_{opt} の値が不連続となる理由

$4.8 \leq C_T \leq 10$ の区間において、 $c_4(t)$ の最大値、したがって $c_5(t)$ の最大値も目標水質 C_T より小になる。そのようになる理由は、この C_T の区間において、GAC よりも生物処理の方が安価になるため、最適解として、GAC を作動させないものを選択されたためである。 $C_T=4.7$ になると、 H の値の増加を続けるよりも GAC の作動を開始させる方が、目的関数 P の値を小さくできるので、GAC を作動させる分に対応して、最適解の生物処理時間 H_{opt} が短くなる。このため、 C_T の値が 4.8 と 4.7 との間で H_{opt} の値は不連続的に急減する。

(2) $2.6 \leq C_T \leq 4.7$ の区間で H_{opt} の値が振動する理由

H の値を大きくし $c_4(t)$ のピーク値を低減させ C_T の値を達成させることによる各費用へ与える影響は、次のとおりである。

① (1) 式から生物処理の建設費と (2) 式からその運転費を増大させる。

② (2) 式から通常処理の運転費と GAC の運転費を低減させる。

③ $C_T \leq 4.7$ の区間では、原水調整池、規模が最大処理水量に対応して設計変数を持たない通常処理施設、及び GAC の建設費は、 H の値の大小と関係しないので、変化しない。

したがって、 H の値を大きくすることと GAC の作動回数を減少させることとの間には、トレードオフの関係がある。即ち、 C_T を微量だけ小さくしたとき、これを達成するために生物処理時間を大きくすることによる建設費及び運転費の増大と、その増加をしなかったときに、同等の $c_5(t)$ の最大値の低減を獲得するための通常処理及び GAC の運転費の増加とが比較されて、経済的により有利な方が選択されることになる。その比較により P の値を最小ならしめる H_{opt} の値が決定される。ここに、 C_T の値に対応する H_{opt} の値が振動するなど安定供給システムが複雑な挙動をする原因がある。

H_{opt} の値が振動する理由を解明するため、 $3.5 \leq C_T \leq 3.9$ の場合を例として、 C_T の値ごとに P の値と H の値との関係を図-4 に示す。この図では、 H の値に対する目的関数 P の値と GAC の作動回数の変化を示している。即ち、 H の値を順次大きくしていくと、GAC の作動回数の減少に対応して、 P の値は鋸歯状に変化する。つまり、 H の値を大きくしていくと、 $c_4(t)$ の値が小さくなり、 $c_4(t)$ の C_T より大きなピークが一つ減ると、GAC の作動回数を一回減少させるので、 P の値は階段状に減少する。 H の値をさらに大きくすると、次の GAC の作動回数を減少するまでの間、 H の値の増加に伴い P の値は増加の基調にある。

例えば、 $C_T=3.8$ の場合 (図-4 の太線)、 $H=0.26$ までは P の値は単調減少であるが、さらに $H=0.41$ まで大きくすると $c_4(t)$ のピーク値が低減するので、GAC の作動回数は 12 回 ($H=0.26$) から 9 回 ($H=0.41$) へと順次低下し、 P は 1,466.3 百万円/年 (以下、「百万円/年」を省略する。) から 1,444.7 へ減少する。しかし、さらに H の値を 0.41 より $H=0.95$ 近くまで大きくする間は、 $c_4(t)$ のピークで、 C_T の値を下回るに至るものが出てこない。よって、GAC の作動回数を減じないので H の値が大きなるにつれて、 P の値は単調に増加する。さらに、 H の値を 0.95 より大きくすると、 $c_4(t)$ の値のピークのひとつが $C_T=3.8$ を達成して、GAC の作動回数が 8 回に減少し、 P の値は 1,469.8 へ小さくなる。しかし、この P の値は $H=0.41$ の $P=1,444.7$ より大きいので、 $H=0.41$ における $P=1,444.7$ が最小値となる。

この $C_T=3.8$ の例示から、 H_{opt} の値に振動が現われる理由をまとめると、以下のとおりである。図-4 において、各 C_T の値に対して P の最小値が存在し、最適な GAC の作動回数 (図-4 の○印) と H_{opt} の値が定まる。さらに、 C_T の値の減少につれて、図-4 に見るとおり $C_T=3.9$ から $C_T=3.8$ へ、あるいは $C_T=3.7$ から $C_T=3.6$ へのように、最適値の GAC の作動回数が増えたときは H_{opt} の

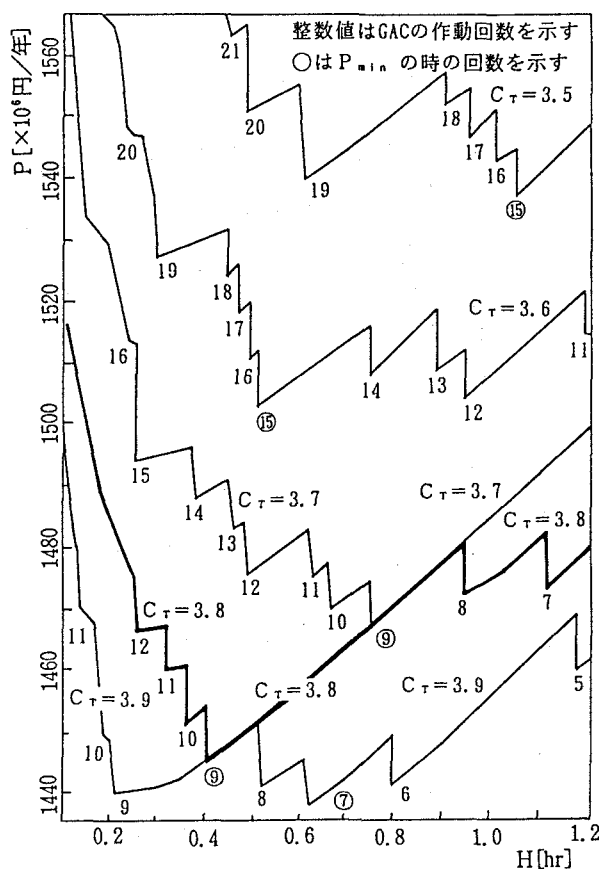


図 - 4 C_T に対応した GAC の作動回数
の変動を示す H と P との関係

値が減少する。一方、 $C_T=3.8$ から $C_T=3.7$ へ、あるいは $C_T=3.6$ から $C_T=3.5$ へ見るように、作動回数が増えないときは H_{opt} の値が増加することにより、 P の値を最小化ならしめる。このことが、図-3 の $2.6 \leq C_T \leq 4.7$ で H_{opt} が増減の振動をする原因である。

(3) $2.0 \leq C_T \leq 2.5$ の区間で H_{opt} の値が一定となる理由

この区間では、GAC を全時間作動させるので、GAC の作動回数に応じた H_{opt} の値の急減はないため、前項のような H_{opt} の値の振動はない。

つぎに、 C_T の値の変化に対する H_{opt} の値の挙動を考察するために、この区間を含む $C_T \leq 2.5$ の区間における H_{opt} 、 P_{min} 、及び V_{1opt} などの値を表-3 に示す。この表における H_{req} は、以下のように定められる。即ち、原水調整池の容量 V_1 を流量調整に必要十分な値 V_{1req} に等しくとって、なおかつ、GAC を全時間作動させる条件下で $c_6(t)$ が C_T を越えることがない H の値を H_{req} とする。即ち、 H_{req} は原水調整池による平準化と生物処理とを必要最小限にするときの生物処理時間である。このとき、通常処理と GAC とに最大限の負荷がかかることになり、それらの運転費は最大となる。

さて、 $2.0 \leq C_T \leq 2.5$ の区間では、表-3 から分かるように、 $H_{opt} \geq H_{req}$ であって、また、 $V_{1opt} = V_{1req}$ となっている。このことは、この区間では、原水調整池による平準化を最小限にしながら、生物

表-3 $\max\{c_5(t)\}$ が C_T を達成するための H_{opt} と P_{min} との関係

C_T	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	
V_{lreq}	←			188.0		→	←	188.0	→
H_{req}	0.09	0.13	0.17	0.23	0.32	0.45	0.65	0.94	
H_{opt}	←			0.51		→	0.65	0.94	
P_{min}	←			1865.82		→	1867.48	1876.93	
			$V_{lreq}=V_{lopt}$ $H_{req}<H_{opt}$				$V_{lreq}=V_{lopt}$ $H_{req}=H_{opt}$		

C_T	1.75	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
V_{lreq}	←			188.0		→
V_{lopt}	192.0	218.0	229.0	228.0	389.0	616.0
H_{req}	1.15	1.40	2.13	3.33	5.37	8.97
H_{opt}	1.10	1.06	1.48	2.34	2.49	2.26
P^*	1886.39	1899.15	1940.56	2012.31	2132.93	2334.33
P_{min}	1885.89	1896.08	1922.43	1971.57	2049.83	2124.43
			$V_{lreq}<V_{lopt}$ $H_{req}>H_{opt}$			

注) P^* : $V_1=V_{lreq}$, $H=H_{req}$ のときの P の値

処理施設を H_{req} よりも大きくして、その建設費と運転費は若干増大するものの、通常処理と GAC の負荷を軽くし、これらの運転費を低減（建設費は不変）させた方が、総費用 P の値が小さくなり有利であることを示している。そして、そのときの生物処理時間 H_{opt} が、この C_T 区間で 0.51 とほぼ一定なので、図-3 に見るように、この区間では H_{opt} 曲線は水平に推移するのである。

(4) $1.8 \leq C_T \leq 1.9$ の区間で H_{opt} の値が急増する理由

この C_T 区間では、生物処理施設を最小限の H_{req} よりも大きくしても、総費用 P の値は有利にならないので、GAC と通常処理に最大限の負荷をかけるときに、目的関数 P が最小になる。したがって、目標水質 C_T が厳しくなるに従って増大する H_{req} と一致して H_{opt} が大きくなるので、表-3 に示すような H_{opt} の増大を見るのである。ただ、この区間ではまだ原水調整池に流量調整に必要十分な容量を上まわる容量が持つ平準化の効果を求めても、総費用 P の値は有利にはならないので、 $V_{lopt}=V_{lreq}$ となっている。

4.2 平準化の効果及び生物処理効果の増大による C_T の値の達成

目標水質が $1.3 \leq C_T \leq 1.75$ の区間では、表-3 の下段から分かるように、 $H_{opt} \leq H_{req}$ であって、また、 $V_{lopt} \geq V_{lreq}$ となっている。つまり、この目標水質の区間では、原水調整池の容量 V_1 を流量調整に必要な値 V_{lreq} よりも大きくとって平準化の効果をより大きく利用し、そのかわりに生物処理時間の長さを原水調整池の容量が V_{lreq} に等しかったときの最小限の値 H_{req} より小さくとした方が目的関数が小さくなっている。表-3 には、比較のために $V_1=V_{lreq}$ かつ $H=H_{req}$ のときの目的関数値を P^* として示している。 $1.3 \leq C_T \leq 1.4$ の区間では、 $V_{lopt} \geq 389$ となり、このときは、原水調整池の滞留時間が約 4 日以上となる。このため、ここまでは定式化には含まれていない原水調整池における水質悪化の防止策を別途構じる必要が生じるので、現実には計算上の総費用は P_{min} の値よりも大きくなることになる。

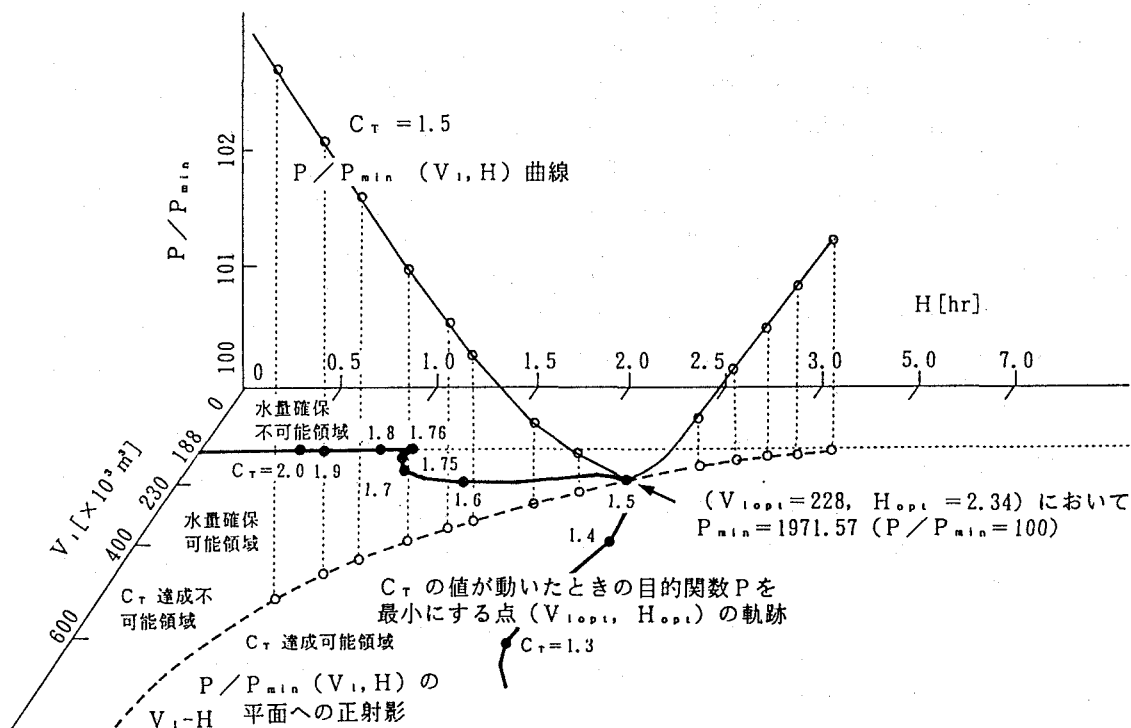


図-5 $K=0$ 、 $C_T=1.5$ の場合において P_{min} ならしめる $V_{1,opt}$ と H_{opt} との関係

目標水質が水質基準を補完する項目として設定された快適水質項目の目標値の半分である $C_T=1.5$ の場合を例にとって、 V_1 と H 及びそれらによって定まる $P/P_{min}(V_1, H)$ との関係を表す曲線を図-5 において 3 次元空間に表示した。図-5 では、この曲線の V_1-H 平面への正射影が破線で示されている。 V_1-H 平面上におけるこの破線の右側では、 $c_s(t)$ は常に C_T 以下になり、目標水質を達成しているわけである。当然、表-3 の結果と一致することであるが、 $V_{1,opt}$ の値は $V_{1,req}=188$ より大きい $V_{1,opt}=228$ で、 H_{opt} の値は $H_{req}=3.33$ より小さい $H_{opt}=2.34$ である。このとき $P_{min}(V_{1,opt}, H_{opt})=1,971.57$ となる。この値は $P(V_{1,req}, H_{req})=2,012.31$ よりも 3.5 % 小さい。さらに、図-5 の V_1-H 平面上に、 C_T の値が動いたときの目的関数 P を最小にする点 $(V_{1,opt}, H_{opt})$ の軌跡を示した。 $C_T \geq 1.76$ の区間では、この軌跡は $V_{1,req}=188$ 上にあるが、 $C_T \leq 1.75$ の区間では $V_{1,opt} > 188$ となっている。

5. おわりに

前章までの検討により、ユニットのモデルの特性のみから、システムが予測出来ない実例を発見した。それは、まず、目標水質 C_T の値に応じ目的関数 P の値を最小ならしめる最適解の生物処理時間 H_{opt} の値が極めて複雑な挙動をすることである。そして、その複雑な挙動をする原因が GAC の作動回数と生物処理時間の値とがトレードオフの関係にあることを解明した。その発見は、 C_T の値が小さくなるに応じ H_{opt} の値が単調に長くなるであろうとする自然な予測も覆すものである。さらに、目標水質がある値以下になると、それを達成するためには、生物処理時間を単純に増加させる替わりに、GAC を全時間

作動させると共に、原水調整池の容量を水量確保に必要な容量よりも大きくし、その平準化効果を活用する方が、総費用は最小となることを詳細に検討し確認した。

安定供給システムを構成する各ユニットの特性は単純であり、即ち、水質をよりよくするには、機能を単調に大（作動時間なら長）にしなければならない。しかるに、ユニットを統合したシステムにおける最適問題においては、目標水質をよりよくするためでも、最適解の挙動はユニットの場合のように単調ではなく、最適解が振動する。もちろん、ユニットを図-1に示すようにシステムとして構成したことのみによって、この複雑さが生じているのではなく、目標水質の達成及び必要水量の確保に要する費用 P を導入し、最適問題を構成したことによって、システムの複雑な特性が出現しているのである。この事情は、ワットの遠心制御装置について、その安定条件を考慮しないレベルで、制御装置のためによかれとして行われた設計が、その安定性の条件を求めて見ると、安定性を確保するためには、悪い方向で行われていた⁴⁾ということと似た構造にあると言えよう。即ち、システムの性質をより広い範囲で考慮すると、違ったものが特性として顕在化するという点で通ずるものがある。

ユニットから構成されるシステムの最適解の特性は、時として、それに関するエンジニアの常識的な直感の範囲を越えることがあり、そのことにより政策判断などの重要な決定において、足下を拘わることがある。したがって、システムを構成する最適問題を解く場合には、本論文で示したように、システムの特性を十分に理解し調査した上で、実用性を第一義的に考えたシステムの特性の把握を念頭に置かないと、不利な設計となる恐れがある。

実際、図-3に見られる GAC を一部作動させる目標水質の範囲では、実施設計時において、安定供給システムの置かれる状況の変化に対処できるような運用上の融通性を考え、計算上の最適設計を機械的に採用せずに、生物処理時間をこの範囲内の長めの値にとる。そして、運営時において、通常処理施設の出口水質 $c_4(t)$ の値が目標水質の値を越える分については、GAC の運転でカバーするというのが現実的な対応であることが示唆される。

よく言われることだが、「システムとは部分の間の相互作用で、部分だけでは出てこないような性質や機能を表すもの⁵⁾」である。それゆえに、ユニットの特性からシステムの特性は予測出来ない。したがって、「要素の単純な寄せ集めではないものとしてのシステム」の優れた実例が、水道にとって緊急な課題である安定供給システムに即して見つかったことになるわけである。

要素の特性から予測できないシステムの最適解の挙動の特性を見いだしたことの意義は、もとよりシステム論的な興味に限定されるわけではない。それは、現実にはシステムの最適設計を行うときに、要素であるユニットの特性から、いかにして最適解の挙動を予測するか、また、それがいかに困難であるかを示し、システム設計には前報³⁾の例が示すような固有の方法論が必要なことを明らかにしたものである。さらに、最適解の挙動の観察から安定供給システムの中で、各ユニットの果たす役割についての洞察が得られ、安定供給システムの意義が一層明確になったわけである。

参 考 文 献

- 1) 気象庁：異常気象レポート '89(IV)，大蔵省印刷局，pp. 69-83，1989.
- 2) 環境庁：平成 6 年度版環境白書，大蔵省印刷局，pp. 314-326，1994.
- 3) 早貸外幸，真柄泰基，大井紘，乙間末広：渇水時を含む水道の安定供給システムの特性に関するコスト分析，土木学会論文集 No. 491/II-27，pp. 89~98，1994. 5.
- 4) A. C. ポントリヤーギン（千葉克裕 訳）：常微分方程式，共立出版，pp. 210-217，1963.
- 5) 杉田元宣：社会とシステム論 情報と応答・制御の機構，みすず書房，pp. 236，1976.