

水道の高度処理システムにおけるコストの最適設計に関する一考察

早貸外幸

日本水道協会工務部
東京都千代田区九段南 4-8-9

概 要

水源汚濁により水道水の異臭味や安全性が社会の関心を引いている。水道の自衛方策の一つとして、既存の沈殿と濾過から構成される通常処理の前に生物処理を、その後にオゾン処理と活性炭処理を付加した高度処理システムを設定する。時間変動する汚濁原水を処理し、異臭味や安全性と関係が深い $\text{NH}_4\text{-N}$ 、THM-FP、2-MIB の目標水質を達成し、且つ当該システムの総コスト（建設費と運転費との和）を最小化ならしめる最適設計を行った。当該システムに加え原水調整池と浄水池による水質の平準化効果も考慮したシステム特性を明らかにした。

キーワード

水道、高度処理、目標水質、コスト、最適設計、システム特性

1. はじめに

水道水源の汚濁により異臭味被害が毎年大略 2000 万人にも及び、また、農薬や THM による水道水質の不安が国民の間に広がっているため、1992 年に水道法の水質基準が改訂され、水道水源保全のための法律も 1994 年に制定された。しかし、水道水源である河川的环境基準の達成率は依然として 70% 程度に留まっている。このため、自衛方策の一つとして高度処理を導入する水道が多くなっている。その効果もあつて昨年厚生省の調査によると、異臭味による被害者数に低減の兆しが見えつつある。本報告は用水供給事業において、既設の沈殿と濾過から成る通常処理に生物処理、オゾン処理、活性炭処理（以下、「GAC」という。）を付加した高度処理システム（以下、「高度処理システム」という。）により、異臭味や安全性と関連が深い水質（ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、THM-FP、2-MIB）の目標を達成し、コスト最小化の最適設計を試みた。この種の試みは筆者らが行った報告^{21)・22)}以外に少ないが、既報に比べ ① オゾン処理を加え、② 水質を KMnO_4 単一から前述の 3 物質に増やし、③ 設計方程式は水温も考慮したアルレニウスタイプの反応定数を用いた物質収支により設定した。その結果、コスト最小化ならしめる最適パラメータが存在し、高度処理システムを導入する原水調整池と浄水場に必ず設置されている浄水池による水質変動の平準化効果（以下、「平準化」という。）も考慮すると、目標水質のレベルによっては、オゾン処理を不要とする場合もあるなど、高度処理システムの特性が判明した。このことにより、高度処理の現象をより忠実に再現するための精度の向上や多成分系への展開の可能性が確認された。

2. 水道システムの構成

目標水質を達成するために、図-1 に示すシステム（以下、「水道システム」という。）を対象とし、取水から送水までは自然流下と仮定する。また、通常処理から排出される洗浄排水（処理水量の 10%）などは着水弁

へ戻されるので、生物処理と通常処理の水量は $1.1 \times L$ となるが、返戻水による水質への影響は無視する。通常処理後の水質が目標水質を達成している場合は、オゾン処理及び GAC をバイパスさせる。 $C_j(m)$ は、着目成分（以下、「システムの状態変数」という。） m について $\{m: \text{NH}_4\text{-N}, \text{THM-FP}, \text{及び } 2\text{-MIB}\}$ 、施設 j : {0: 河川水, 1: 原水調整池, B: 生物処理, D: 通常処理, Z: オゾン処理, G: 活性炭処理, 2: 浄水池} において処理された浄水（以下、「浄水」という。）のそれぞれの水質 $\{C_N^*, C_H^*, C_M^*\}$ を、 $C^T(m)$ は目標水質 $\{C_N^T, C_H^T, C_M^T\}$ を示す。また、 T は水温 (t_w の絶対温度)、 Q_1 と Q_2 は原水調整池と浄水池の貯水量とする。

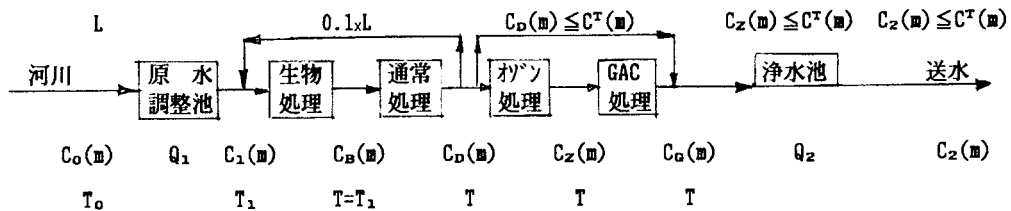


図-1 水道システムの構成

3. 計算式

各処理施設の入口と出口におけるシステムの状態変数の関係を規定する設計方程式並びに各施設の建設費と運転費からなる費用関数式について設定する。各処理施設の設計変数は、ハニカムチューブの面積 A 、オゾン注入率 η 、及び GAC 空塔接触時間 τ とする。ただし、通常処理は既設であるので、水道システムに含まれるが、最適化の対象外とし、通常処理の設計変数は存在しない。淀川下流の原水を対象とする実証プラントで得られた水質データなどにに基づき、設計方程式を図-1 の各処理施設とシステムの状態変数ごとに以下の方法により設定する。設計方程式は水道システムの最適化を対象とし、個別施設の設計を意図していない。

3.1 生物処理

実証プラントは表面積 A のハニカムチューブを充填し、処理される原水（以下、「原水」という。）がばっ気により十分攪拌されるので流動状況は完全混合とする。反応の場がハニカムチューブ表面 A に限定されるので、反応速度を A 当たりで規定し³⁾ 1 次反応とする^{4), 5)}。入口濃度 $C^1(m)$ 、出口濃度 $C^0(m)$ の物質収支をとり、反応速度定数を K_m^B 、浄水の水温を T とし、アルレニウスタイプ (K_{m0}^B : 頻度因子、 E_m^B : 活性化エネルギー、 R : 気体定数) を仮定すると、式 (1)、(2) を得る。 K_{m0}^B 、 E_m^B/R は実測データ L 、 $C^1(m)$ 、 $C^0(m)$ 、 T を、アルレニウスプロットに適用して、状態変数ごとに決定する。生物処理の設計変数は A である。

$$(L/A) \cdot [C^1(m) - C^0(m)] = K_m^B \cdot C^0(m) \quad (1), \quad K_m^B = K_{m0}^B \cdot \exp(-E_m^B/RT) \quad (2)$$

3.2 通常処理施設

通常処理施設は、次に述べる ① の理由から最適化になじまないため、② の方法により設計方程式を設定する。① 懸濁物質を主な処理対象として、永年の間利用され成熟した技術であるが、単独では微量化学物質などを十分に処理が出来ないため、高度処理の付加により補完する必要がある。② 設計方程式は処理プロセスのメカニズムにまで立ち入らず、実プラントのデータに基づき、 $C^1(m)$ と $C^0(m)$ との関係を 4 タイプ（直線、対数、指数、冪乗）の回帰式のうちから決定係数が一番大きいタイプを選定する。

3.3 オゾン処理施設

実証プラントはオゾン吸収槽と反応槽から構成され、ここでは接触槽と呼ぶ。二重境膜説に基づき原水に吸収された溶存オゾンは自己分解も伴いながら、 $C(m)$ 及びその他の被酸化物質と反応する。 $C(m)$ 以外の全ての被酸化物質にオゾンの自己分解相当分も含めた擬似物質 Q を仮定してその濃度を C_0 とする。

1) オゾン移動速度式 接触槽の流動状況は、オゾン化空気が栓流、浄水が完全混合で槽内は一様に等温であると仮定する^{6), 7), 8)}。液の境膜における総括物質移動係数を K_L 、槽内の溶存オゾン濃度を X 、槽内のガス中オゾン濃度を $Y(Z)$ 、拡散速度が液相よりも格段に速い気相の境膜を無視すると、単位面積当たりのオゾン移動速度 F は、分配係数 α (t_w の関数) により¹¹⁾ 次式を得る。 $F=K_L[\alpha \cdot Y(Z)-X]$ (3)

2) ガス栓流・液完全混合モデル (a) ガス相：ガス本体 G から境膜部分への移行量は、ガスと液混合相の界面積を a 、接触槽の断面積を S として、 $G \cdot Y(Z) - G \cdot [Y(Z+dZ)] - F \cdot a \cdot (S \cdot dZ) = 0$ であり、 F に式 (3) を代入し、 $M=(K_L a) \cdot \alpha \cdot (S/G)$ 、 $N=1-\exp(-M \cdot Z_E)$ とおき、境界条件 $Z=Z_E$ で $X=X^*$ 、 $Y(Z)=Y^*$ 、及び $Z=0$ で $X=X^*$ 、 $Y(Z)=Y^*$ により物質収支を解くと、式 (4) を得る。(b) 液相：溶存オゾンは $C(m)$ より格段に濃度が高い C_0 との反応により減少するが、i) $C(m)$ と C_0 、ii) オゾン、それぞれの物質収支は、以下のとおりである。

$$Y^* = Y^* \cdot \exp(-M \cdot Z_E) + (1/\alpha) \cdot (N \cdot X^*) \quad (4)$$

i) 状態変数と擬似物質： $C(m)$ 、 C_0 の反応速度定数がアレニウスタイプとすると式 (5)、(6) を得る。

$$L \cdot C^2(m) - L \cdot C^*(m) - K_m^z \cdot C^*(m) \cdot X^* \cdot (S \cdot Z_E) = 0 \quad \text{ただし、} K_m^z = K_{m0}^z \cdot \exp(-E_m^z/RT) \quad (5)$$

$$L \cdot C_0^2 - L \cdot C_0 \cdot K_q^z \cdot C_0 \cdot X^* \cdot (S \cdot Z_E) = 0 \quad \text{ただし、} K_q^z = K_{q0}^z \cdot \exp(-E_q^z/RT) \quad (6)$$

ii) オゾン：液が中性付近では溶存物質とオゾンとは擬 1 次反応と見なせる^{6), 8), 10)}。 $C(m)$ は極めて低いので、 $C(m)$ と C_0 との総括反応定数 $J(T)$ について係数 a_0, b_0 としてアレニウスタイプを仮定すると、 $G \cdot (Y^* - Y^*) - L \cdot X^* = X^* \cdot (S \cdot Z_E) \cdot J(T)$ の Y^* に式 (4) を代入して式 (7) から式 (8) を得る。

$$G \cdot N[Y^* - (X^*/\alpha)] - L \cdot X^* = X^* \cdot (S \cdot Z_E) \cdot J(T) \quad (7), \quad \ln\{[G \cdot N \cdot (Y^* - X^*/\alpha) - L \cdot X^*] / X^* \cdot (S \cdot Z_E)\} = \ln a_0 - b_0 \cdot \ln T \quad (8)$$

iii) Y^* から X^* の推定：実測データを式 (8) に適用し、そのアレニウスプロットにより a_0, b_0 が決定され、 Y^* から X^* が求められると、生物処理の場合と同様に式 (5) からパラメータ K_m^z 、 (E_m^z/R) が $C(m)$ ごとに決定され、設計方程式が設定される。ただし、 $N=1-\exp(-M \cdot Z_E)$ の M は、津野が文献を整理し引用例も多い^{7), 12)} $K_L a = 1.1(G/S)^{0.82}$ を用いると¹⁰⁾、 $M=(1.1) \cdot \alpha \cdot (S/G)^{0.18}$ である (G の単位: $m^3/\text{分}$)。オゾン処理の設計変数は、 $\eta=G \cdot Y^*/L$ である。

3.4 粒状活性炭処理施設

データ入手の関係から生物活性炭の流動床方式とする¹³⁾。流動状況は上向流で GAC を流動化させ栓流である^{14), 15)}。静止時の充填高さを Z_E 、流動化による膨張率を λ 、処理水量を L 、流動層の底面積を S とすると、空塔接触時間 τ は $S \cdot Z_E/L$ である。生物活性炭であるので、生物処理と同様に 1 次反応と仮定し¹⁵⁾、微小体積 $S \cdot dZ$ の物質収支を、底部 $C(m)=C^*(m)$ 、頂部 $C(m)=C^1(m)$ の境界条件で解くと、次式を得る。

$$\ln C_1(m) - \ln C_0(m) = K_m^0(S \cdot \lambda \cdot Z_E) / L$$

反応速度定数のパラメータは、生物処理の場合と同様に、 $C(m)$ ごとに決定される。GAC 施設の設計変数は τ である。各施設の設計方程式を表-1 に示す。反応速度定数を設定した決定係数は 0.66~0.91 であり、これを適用した計算値と実測データとの相関係数は大略 0.81~0.99 であるので、表-1 の設計方程式による $C(m)$ の除去反応の再現性は十分担保されている。

表 -1 設計方程式

設計方程式		反応速度定数 _b	
		_m	_a
生物	$C_B^*(m) = C_B^1(m) \div [1 + K_B / \{L/A\}]$	NH ₄ -N	6.2579×10 ⁷
		THM-FP	5.5026×10 ¹⁶
		2-MIB	2.8137×10 ³⁵
物	$K_B(m) = a \times \exp(-b/T)$		-6.1589×10 ³
			-1.3647×10 ⁴
			-2.5349×10 ⁴
通常	$C_D^*(m) = a + b \times C_D^1(m)$ $C_D^*(m) = a \times [C_{DH}^1(m)]^b$	NH ₄ -N	-1.7655×10 ⁻²
		THM-FP	0.73202
		2-MIB	0.93894
オ	$C_Z^*(m) = C_Z^1(m) \div \{1 + \tau_z \times K_Z(m) \times X^*\}$ $K_Z(m) = a \times \exp(-b/T)$	NH ₄ -N	1.8879×10 ²⁶
		THM-FP	2.6994×10 ¹⁷
		2-MIB	9.7420×10 ¹⁸
γ	$X^* = N \cdot \eta / \{ \tau_z \cdot J(T) + (G/L) \cdot (N/\alpha) + 1 \}$ $N = 1 - \exp(-M \cdot Hz)$, $M = (1.1) \cdot \alpha \cdot (60 \cdot S/G)^{0.18}$ $\alpha = \{0.604 \times (273 + t_w)\} \div \{273 + 17.199 \times t_w\}$, $\tau_z = V_z / L_0$, $V_z = S \times Hz$		
ソ	$J(T) = 3.5893 \times 10^{25} \times \exp\{-1.61481 \times 10^4 / T\}$		
GAC	$C_G^*(m) = C_G^1(m) \div \exp\{ \tau \times K_G(m) \times \lambda \}$ $K_G(m) = a \times \exp(-b/T)$ $\lambda : 1.4(10 > t_w), \lambda : 1.3(20 > t_w > 10), \lambda : 1.2(t_w > 20)$	NH ₄ -N	3.1359×10 ²⁶
		THM-FP	1.2346×10 ¹⁰
		2-MIB	1.9057×10 ²²
			-1.7306×10 ⁴
			-6.4369×10 ³
			-1.4522×10 ⁴

3.5 費用関数式

後述するとおり計算対象とするシステムの規模は、max{L(t)}=4500 m³/hr である。その規模について実施設計の経験者から聴取した建設費式及び運転費式は、設計変数 {A, η, τ} の関数として表-2 に示す。建設費は国庫補助金(補助率 1/3)の残額に起債を充当し、減価償却(残存率 10%)の仮定を置く^{12, 22)}。各施設の建設費 {E_R:原水調整池, E_B:生物処理, E_D:通常処理, E_Z:オゾン処理, E_G:GAC} の総額を年間負担額 φ₁ に換算し、各運転費 {M_B:生物処理, M_D:通常処理, M_Z:オゾン処理, M_G:GAC} に L(t) を乗じた総和 φ₂ と併せ年間総負担額 φ = φ₁ + φ₂ を後述の計算手順により最小化する。用地は手当済とし建設費には含めない。

表 -2 建設費・運転費関数式

	建設費(×10 ⁶ 円) L ₀ =max{L}	運転費(円/m ³)
生物処理	E _B =8.3243×10 ⁻² ×A ^{0.7503}	M _B =3.24-(7×10 ⁻⁸)×A
通常処理	E _D =1.5915×10 ³ +1.1853×L ₀	M _D =18.469×L ^{-0.1558}
オゾン処理	E _Z =9.165×10 ² +2.8964×10 ² ×η	M _Z =0.515+0.6264×η
GAC処理	E _G =1.5862×10 ³ ×exp(1.9643×τ)	M _G =0.9799×exp(5.821×τ)
原水調整池:E _{Q1} =32.06×(Q ₁ /1000) ^{0.7711} , 浄水池(既設):E _{Q2} =0		

4. 計算対象の入力データ

1) 水量：送水量 $L(t)$ は、筑後川水系の用水供給事業の例 [日最大送水量 $100 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$ 、時間最大送水量 $\max\{L(t)\}=4500 \text{ m}^3/\text{hr}$] による。半旬 (5 日間) 単位、一年間 (73 半旬) を 1 サイクルで計算する。

2) 水質：① 目標水質は $C_M^T=0.3 \text{ g/m}^3$ (ジクロロミンなどによる異臭味の発生限界)、 $C_H^T=30 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$ (水質基準の健康項目)、 $C_N^T=10 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ (水質基準の快適項目、さらに臭気閾値 $5 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ についても検討する)。② 原水水質及び水温は、淀川水系下流の浄水場の例のうち、濃度が高い年次を参考にする。

5. 計算手法と留意点

1) 計算手法 初期値 $\{A_0, \eta_0, \tau_0\}$ を設定し、表-1, 2 の式を用いて、Box のコンプレックス法 (Nelder & Mead によるシプレックス法の制約条件付き)^{16, 17)} により、 Q_1 (ピッチ: $\Delta Q_1=5 \times 10^3 \text{ m}^3$) ごとに、 ϕ_{\min} とする最適値 $\{A_{\text{opt}}, \eta_{\text{opt}}, \tau_{\text{opt}}\}$ を探索する。その場合、 $C_2(m) \leq C^T(m)$ に必要な τ_{req} のうち $\max\{\tau_{\text{req}}\}$ を τ_{opt} とするが、空塔接触時間を確保するために、 $\min\{L(t)\} \leq (S \cdot V / \tau) \leq \max\{L(t)\}$ の制約条件を付す。

2) 計算上の留意点 (a) 原水調整池：① 原水調整池を活用して $C_0(m, t)$ 、 $T_0(m, t)$ の平準化を図る。② 池内を完全混合と仮定して微分方程式を差分形に直し、 $C_1(m, t)$ 、 $T_1(m, t)$ を得る。③ 試行錯誤により $C_1(0) = C_1(73)$ 、 $T_1(0) = T_1(73)$ と設定する。(b) 浄水池：平準化は原水調整池の場合と同様に差分形による。

6. 計算結果

1) 最適値の存在と費用構成

Q_1 ごとに求めた ϕ_{\min} ならしめる設計変数と ϕ_{\min} を表-3 に示す。

$C_M^T=10 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ (以下、前者と表記し $\times 10^{-6} \text{ g/m}^3$ を省略する) では、 $Q_1=45 \times 10^3 \text{ m}^3$ (以下、 $\times 10^3 \text{ m}^3$ を省略する) において $\phi_{\text{opt}} = \min\{\phi_{\min}\}$ とする最適値が存在するが、 $C_M^T=5$ (以下、後者と表記する) では単調増大となり $Q_1=0$ で ϕ_{opt} となる。後者はオゾン処理を常に必要とするが、前者は $40 \leq Q_1$ で不要となる。前者の ϕ_{opt} の費用構成割合は、図-2 から建設費は 70%、運転費は 30% である。建設・運転費ともに通常処理がその大半を占め残りが高度処理である。

なお、前・後者の ϕ_{opt} の場合 $C_2(m)$ の最大値は、 $\max\{C_M, C_H, C_N\} = \{0.29, 25.8 \times 10^{-3}, 9.99 \times 10^{-6}\}$ (後者では、 $C_M=4.99 \times 10^{-6}$) となり目標水質を全て達成する。最適設計変数である A_{opt} 、 τ_{opt} は前・後者ともにほぼ同じレベルであるが、 η_{opt} は前者で $0 \sim 0.5 \text{ g/m}^3$ 、後者はその 4~5 倍を要する。前者では浄水池の平準化効果を評価しない ($Q_2=0$) 場合に比べ、① η は 0.2 g/m^3 低い。② $\eta=0$ となる Q_1 は 5 小さく、 ϕ_{opt} となる Q_1 は 15 小さい。

なお、前・後者の ϕ_{opt} の場合 $C_2(m)$ の最大値は、 $\max\{C_M, C_H, C_N\} = \{0.29, 25.8 \times 10^{-3}, 9.99 \times 10^{-6}\}$ (後者では、 $C_M=4.99 \times 10^{-6}$) となり目標水質を全て達成する。最適設計変数である A_{opt} 、 τ_{opt} は前・後者ともにほぼ同じレベルであるが、 η_{opt} は前者で $0 \sim 0.5 \text{ g/m}^3$ 、後者はその 4~5 倍を要する。前者では浄水池の平準化効果を評価しない ($Q_2=0$) 場合に比べ、① η は 0.2 g/m^3 低い。② $\eta=0$ となる Q_1 は 5 小さく、 ϕ_{opt} となる Q_1 は 15 小さい。

表-3 最小総費用と設計変数(原水+浄水調整池)

原水池 $Q_1, 10^3 \text{ m}^3$	$C_M^T=10 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$				$C_M^T=5 \times 10^{-6} \text{ g/m}^3$			
	設計変数 $A10^4 \text{ m}^2$	$\eta \text{ g/m}^3$	$\tau \text{ hr}$	総費用 $\phi_{\text{opt}} \text{ } 10^6 \text{ ¥/Y}$	設計変数 $A10^4 \text{ m}^2$	$\eta \text{ g/m}^3$	$\tau \text{ hr}$	総費用 $\phi_{\text{opt}} \text{ } 10^6 \text{ ¥/Y}$
0	53	0.7	0.209	1134.35	51	2.9	0.224	1216.72
20	53	0.6	0.205	1149.53	51	2.6	0.223	1227.34
40	66	0	0.225	1113.54	52	2.2	0.225	1231.18
45	53	0	0.224	1090.23	51	2.2	0.223	1232.80
50	52	0	0.224	1091.10	51	2.1	0.224	1233.42
60	53	0	0.218	1095.34	51	2.0	0.223	1235.73
75	53	0	0.212	1100.32	51	1.8	0.223	1238.40
100	53	0	0.204	1108.55	51	1.5	0.222	1241.06

総費用 $1090.2 \times 10^6 \text{ ¥/Y}$

建設費 71.15%	運転費 28.85%
---------------	---------------

建設費 $775.7 \times 10^6 \text{ ¥/Y}$

原水池 5.2%	生物 14.1	通常 59.5	オゾン -	GAC 21.2%
-------------	------------	------------	----------	--------------

運転費 $314.5 \times 10^6 \text{ ¥/Y}$

原水池 -	生物 19.5	通常 54.4	オゾン -	GAC 26.1%
----------	------------	------------	----------	--------------

図-2 最適設計における費用の構成

2) ϕ_{opt} の挙動特性

前者は、 $35 \leq Q_1$ で Q_1 の増大に伴い η, τ が減少し建設費と運転費が減少するので、 $d\phi_{min}/dQ_1$ は単調減少である。 $40 \leq Q_1$ になると $\eta=0$ であるので、 τ の減少にも拘らず Q_1 の増大に伴い建設費は増加するが運転費は減少を続け、 $45 \leq Q_1$ の数値微分により、正の dE_{min}/dQ_1 が負である dM_{min}/dQ_1 の3倍であるので、 ϕ_{opt} は建設費に支配され、 $Q_1=45$ で $\phi_{opt}=\min\{\phi_{min}\}$ となる。一方、後者は、正の dE_{min}/dQ_1 が負である dM_{min}/dQ_1 の2倍であるので、 ϕ_{min} は単調増大となり、 $Q_1=0$ で $\phi_{opt}=\min\{\phi_{min}\}$ となる。

7. おわりに

臭気や安全性と関連が深い3項目の水質である状態変数に水温も考慮した物質収支から設計方程式の定式化並びに費用関数式の設定を行った。それを用いて目標水質を達成し且つ総費用を最小ならしめる最適設計変数が求められ、本報で提示した方法により多成分系への展開の可能性が確認された。また、水道システムに原水調整池や浄水池の平準化効果を考慮することにより、 $C_M^T=10$ の場合は $Q_1=40$ 以上において、オゾン処理を不要とするシステム特性を有することも判明した。

以上のことから、本報で述べた水質汚濁の場合に加え、既報²⁾の濁水などにより取水制限が実施された場合でも、目標とする水量と水質の両方に制約条件がある場合について、水道サイドで対処可能な方法論を提示出来た。貴重なデータをご提供下さった淀川下流から取水する水道事業をはじめ多くの水道事業の方々、また、種々アドバイスを相談いただいた方々に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

1. 早貸外幸 et al: 水量及び水質の安定供給システムにおけるコスト最小化に関する一考察, 水道協会雑誌, No. 12, pp. 3~11, (1990)
2. 早貸外幸 et al: 濁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)
3. 化学工学協会: 化学工学便覧 (改訂5版), 丸善, 3. 化学反応速度, pp. 185, (1988.5)
4. 浜野守 et al: 大阪府における生物処理実験, 水道協会雑誌, Vol. 54, No. 9, pp. 12-31, (1985)
5. 平田彰 et al: 生物膜法における好気性生物処理特性の評価, 水質汚濁研究, Vol. 12, No. 6, pp. 373-379, (1989)
6. 出口富男編: ガンを中心とした高度浄水処理技術, 三鉄書房, pp. 127-159, (1990)
7. 森岡崇行 et al: 横流式接触池のガン吸収特性, 水道協会雑誌, Vol. 60, No. 7, pp. 7-17, (1991)
8. 中道裕治 et al: (4-21) 相模川下流水のガン処理, 第42回全国水道研究発表会講演集, pp. 154-156, (1991)
9. 津野洋: ガン処理とガンの水への吸収特性, 水質汚濁研究, Vol. 13, No. 12, pp. 786-791, (1990)
10. 宗宮功 et al: ガン処理によるかび臭物質の除去特性に関する研究, 水道協会雑誌, No. 7, pp. 2-9, (1988)
11. 田畑則一: 浄水のガン処理における気液接触装置の特性, 水道協会雑誌, Vol. 43, No. 11, pp. 16-27, (1974)
12. 森岡崇行: 横流式ガン接触池の水理及びガン吸収特性, 第1回日本ガン協会年次研究講演会, pp. 51-54, (1992)
13. 渡辺茂樹 et al: (4-25) 相模川下流の生物活性炭の基礎特性, 第42回全国水道研究発表会, pp. 166-168, (1991)
14. 熱田誠一 et al: 石油系球状微粒炭による流動床処理実験, 水道協会雑誌, No. 489, pp. 39-60, (1975)
15. 平田彰 et al: 三相流動層によるフェノール廃水処理の生物処理特性, 水質汚濁研究, No. 9, pp. 561-568, (1988)
16. M. J. Box et al: Non-linear Optimization Techniques, Nomograph No. 5, I. C. I., pp. 20-24, 52-54, (1969)
17. 化学工学協会編: BASICによる化学工学プログラミング, 培風館, pp. 88-92, 129-134, 261-262, (1985)