ロバスト性からみた 浄水処理プロセスの安定性評価手法の構築

和田昌寬¹·平山修久²·Victor Shinde³·伊藤禎彦⁴

¹ 学生会員 京都大学工学部地球工学科 (〒 615-8246 京都市西京区京都大学桂 C クラスター C1 棟 237 号室) E-mail: wada@urban.env.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 京都大学准教授 大学院工学研究科 (〒 615-8246 京都市西京区京都大学桂) E-mail: hirayama@hse.gcoe.kyoto-u.ac.jp

> ³ 京都大学大学院工学研究科(〒615-8246 京都市西京区京都大学桂) E-mail: victorshinde@urban.env.kyoto-u.ac.jp

⁴ 正会員 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒 615-8246 京都市西京区京都大学桂) E-mail: itoh@urban.env.kyoto-u.ac.jp

本研究では、気候変動の浄水プロセスに対する水源水質変動リスクに着目して、ロバスト性の観点から 浄水処理プロセスの処理安定性の評価手法を構築する.ここでは、まず、カーネル部分最小二乗法を用い て、流入水質、運転条件、浄水濁度の関係を定量的に記述するための数値解析モデルを、急速ろ過や膜処 理などの浄水処理プロセス単位で構築した.そのうえで、構築したモデルを用いて、ロバスト最適化条件 の下で、浄水処理プロセスが、流入濁度の変動をどの程度制御することが可能であるのかについて、確率 論的アプローチを用いて検討した.その結果、ロバスト性を用いた浄水処理プロセスの安定性評価を導入 することにより、水源水質の変動影響を低減することができることを指摘しえた.

Key Words: water purification process, robust optimization, kernel partial least squares, turbidity, numerical simulation

1. 背景と目的

我が国の水道を取り巻く環境が大きく変化している. 社会環境の視点からは、これまでの右肩上がりの人口の 趨勢は終焉を迎え、人口減少社会を迎えている中、グロー バリゼーション、官と民、国と地方の役割分担の見直し、 市町村合併などの地方自治の枠組みを巡る動き、水道事 業者、水道用水供給事業者および専用水道の設置者にお ける若年技術者の減少などが問題視されている.さらに、 現在の我が国では、20世紀に整備された水道施設の多 くが老朽化しつつあり、その更新が課題となっている. 21世紀は、今後幾度となく繰り返される水道施設の大 規模更新・再構築を初めて経験する世紀となる.このよ うな社会環境のもとで今後とも持続可能な水道事業を実 現させるためには、各水道事業者などが、人口減少・負 担能力低下などの社会情勢の変化に適切に対応すべく、 長期的な視野に立って、技術的基盤に基づく施設の更新 計画を策定する必要がある.また、必要に応じて新しい 資金源も活用しつつ、自己資金確保を計画的に行うとと もに、施設の改築・更新のためには相応の負担が必要で あることについて需要者や議会などの理解を得るための 情報提供を実施していく体制を早期に築き上げなければ ならない¹⁾.

また,自然環境も大きく変化している.2007年に 公表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)²⁾では,地 球全体の平均気温は,1980~1999年と比較した今世 紀末の上昇は,環境の保全と経済の発展が地球規模で両 立した社会では、約1.8 ℃ (1.1~2.9 ℃) である一方, 化石エネルギー源を重視する社会では、約4.0 ℃ (2.4 ~ 6.4 ℃)に達すると予測されている。このような地球 温暖化の結果、異常気象の頻発、気象システムの急激な 転換といった影響を起こすのみならず、生態系への影響 に加え、数億人規模の水不足の深刻化、農業への打撃、 感染症の増加、災害の激化など私たちの経済・社会活動 に様々な悪影響が複合的に生じる可能性が指摘されてい る³⁾ 水道事業体は上述の気候変動に対応するために, 長期的な視点からみた戦略対応が求められている. これ までは東京都4などによって、個別技術や位置エネル ギーを活用した水道事業の可能性について検討がなされ ている。また、これからは長期的かつ戦略的対応におい ては、水道システムがどの程度、不確実性をもつ外的環 境要因変動に対してどの程度強靭なのか、不確実性に対 するシステム評価が必要となっている。しかし、水質変 動等の不確実性に対する水道システムの安定性評価手法 については検討があまりなされていない.

そこで本研究では、浄水プロセスに対する水源水質変 動リスクに着目して、ロバスト性の観点から水源水質変 動リスクを定量的に把握する評価手法を構築することを 目的とする.まず、浄水プロセスの濁度除去性を把握す るために、実データを用いて数値解析モデルを構築す る.次に,水質の変動が浄水水質に与える影響を把握し、 その影響を軽減するためのロバスト最適化を行い、得ら れた解のロバスト性をモンテカルロ法による数値シミュ レーションにより評価する.なお、本研究では、水源水 質変動に着目することから、取り扱う外的環境変化の要 因は気候変動のみとし、社会変化は取り扱わないものと する.

2. 浄水処理プロセスの数値解析モデル構築

(1) 浄水処理プロセスの概要

本山浄水場は,供用開始から 50 年以上経過し機器の 老朽化が問題になるとともに,水需要も最大 2000 m³/ 日にとどまっていたため,平成 22 年 4 月に改築ととも に処理方法を急速ろ過方式から膜ろ過方式へ変更してい る.原水は住吉川表流水であり,給水区域は東灘区西部 と灘区の西部で,酒造メーカーにも供給されている.河 川水質は概ね安定しており平常時の濁度は 5 度未満であ る.

平成22年以前の本山浄水場の処理方式は急速ろ過処 理方式であった。浄水場の運転時間は午前10時から午 後16時15分であり,平常時は約1400 m³/日を取水し て処理を行っていた。当時の浄水プロセスでは,取水し た原水が調整池,着水井,混和池,フロック形成池,沈 殿池, ろ過池に流入, 処理され, 塩素消毒された後, 浄 水池及び配水池に送水されていた. 凝集剤にはポリ塩化 アルミニウムが, 消毒剤には次亜塩素酸ナトリウムが使 用されていた. 処理水の移送はすべて自然流下によるも のであり, 動力は利用していなかった. 水質に関する情 報は, 職員が日々記録した本山浄水場観測日報に記録さ れている.本研究では急速ろ過処理施設の中から, 凝集 沈殿プロセス, 急速ろ過プロセスを対象とする.

平成 22 年以降の本山浄水場の処理方式は膜ろ過処理 方式であった.処理方式の変更に伴い,自動運転が可能 となり、運転時間も24時間運転になった。1日の処理 水量は約 2000 m³/ 日であった。浄水プロセスは、調整 池、生物接触ろ過により前処理された後、いったん原水 槽に貯水され、膜ろ過処理された後に塩素消毒し、浄水 池及び配水池に送水される。消毒剤には次亜塩素酸ナト リウムが使用され、膜ろ過装置の洗浄にも利用されてい る。処理水の移送は、膜ろ過装置流入時にポンプを用い ている。膜ろ過処理では、生物接触ろ過および膜ろ過処 理装置に定期的な洗浄を必要としており、洗浄方法の条 件および運用方法が異なる。またこれらの装置は2系列 運転である。当浄水施設の膜ろ過装置は、片側のみでも 2系列運転時の75%を処理する能力があるため、1系列 停止時にも浄水量の75%を確保できるようになってい る.水質に関する情報は、本山浄水場運転監視日誌及び 運転管理日報に記録されている.本研究では膜ろ過処理 施設の中から、生物接触ろ過プロセス、膜ろ過プロセス を対象とする.

(2) 数値解析モデル構築手法

入力変数が線形従属に近い場合,通常の最小二乗法を 適用すると回帰係数推定値の分散が大きくなり,結果の 信頼性が低くなってしまう多重共線性という問題が発生 する.多重共線性に対処する方法として部分最小二乗法 (PLS:Partial Least Squares)が挙げられる.PLS は計量 化学の分野で Wold⁵⁾によって開発され,その分野で良 く用いられている回帰分析手法である.PLS では入力 変数の中から潜在変数を計算してから重回帰を行う.強 い共線性がみられる場合にも,PLS は安定な予測モデ ルを構築できるが,PLS では非線形な相関関係を十分 に表すことができない.

そこで、本研究ではカーネル部分最小二乗法 (KPLS:Kernel Partial Least Squares)⁷⁾を用いる. KPLS では入力変数 X はより高次元の $\Phi(X)$ に変換される. ここで $\Phi(X)\Phi(X)^{T}$ はカーネル関数 K という.

$$\phi(x_i)^T \phi(x_i) = K(x_i, x_i) \tag{1}$$

ここで x_i, x_j はそれぞれ i 番目, j 番目の入力ベクト ルである.また, K(x_i, x_j) はカーネル関数である.様々 んカーネル関数が存在するが,本研究では以下に示すガ

表 -2 計算アルゴリズム (PLS, KPLS)⁶

	PLS	KPLS
1.	a=1	a=1
2.	$t_a = X_{a-1} X_{a-1}^T y_{a-1}$	$t_a = \phi(X)_{a-1}\phi(X)_{a-1}^T y_{a-1} = K_{a-1}y_{a-1}$
3.	$t_a \leftarrow t_a / \parallel t_a \parallel$	$t_a \leftarrow t_a / \parallel t_a \parallel$
4.	$X_a \leftarrow X_{a-1} - t_a t_a^T X_{a-1}$	$K_a \leftarrow (I - t_a t_a^T) K_{a-1} (I - t_a t_a^T)$
5.	$y_a \leftarrow y_{a-1} - t_a t_a^T y_{a-1}$	$y_a \leftarrow y_{a-1} - t_a t_a^T y_{a-1}$
6.	a=a+1	a=a+1

I:Identity matrix, X:Input data, y:Output data

ウスカーネル関数を採用した.

$$K(x_i, x_j) = exp(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2})$$
(2)

ここで σ は任意で決められる.

KPLS では潜在変数の数と σ の値で数値解析モデル の自由度が変化する. そこで,最適な自由度を探索する ために K- 分割交差検定 (k-fold cross validation)を行う. K- 分割交差検定とは,標本群を K 個に分割し,そのう ちの1つをテスト集合に,残った K-1 個を訓練集合とし, K 個に分割された標本群それぞれがテスト集合となるよ うに K 回検定を行うことである. ここで,予測誤差と して PRESS(Prediction Residual Sum of Squares)を以下 のように求める.

$$PRESS = \sum_{test} (y_{obs} - y_{pred})^2 \tag{3}$$

ここでKは1から標本群数までの値をとるが,バイ アスと分散の観点から10~20分割交差検定が望まし いということが報告されている⁸⁾.また,一般によく用 いられるクロスバリデーションのPRESS 最小の基準は やや高次元のモデルに導く傾向があり⁹⁾,本研究では下 記の Wold の R 基準⁸⁾を用いた.

 $R_k = PRESS_{k+1}/PRESS_k < 1$ (4) 本研究ではまず,潜在変数の数を1に固定してクロス バリデーションを行い最適な σ の値を決定する.次に, 得られた最適な σ を用いてクロスバリデーションを行 い,最適な潜在変数の数を探索した.

(3) 浄水プロセスの数値解析モデル

ここで、浄水プロセスの数値解析モデルの対象は神戸 市水道局本山浄水場とした。目的関数にプロセスの出口 濁度、説明変数に水質条件、運転条件の重回帰モデルを 構築した。表-1に詳細をまとめた。数値解析モデル構 築のためのデータは、急速ろ過処理方式は平成 20 年、 膜ろ過処理方式は平成 22 年のデータを用いた。

まず、クロスバリデーションの結果は図-1から図-4 のようになった。ガウスカーネル関数のσの値は凝集 沈殿、急速ろ過、生物接触ろ過、膜ろ過プロセスそれぞ れで29,9,2,1であり、潜在変数の数はそれぞれ5,11,3, 1であった。また、数値解析モデルによる予測値と実測 値の散布図を示すことによって、数値解析モデルの精度 を示す。凝集沈殿、急速ろ過、生物接触ろ過、膜ろ過プ ロセスの予測値と実測値との重相関係数Rはそれぞれ 0.905,0.765,0.909,0.794となることから、得られた数値 解析モデルは十分な精度があるといえよう。しかし、モ デル構築に用いた観測データには本山浄水場特有の条件 が含まれていることから、ここで構築した数値解析モデ ルを他の施設に適用するには、必要に応じてその施設の データを用いてモデルを改良する必要がある。

				説明変数	
システム	プロセス	目的変数	水雪久川	運転条	6件
			小貝宋件	共通条件	特別条件
	怒焦油励			PAC注入率[mg/L]	
	凝果沉寂			前塩注入率[mg/L]	
同志迷り週	今 古 7 垣		流入濁度[度]	中塩注入率[mg/L]	ᇥᄮᅶᅘᇈᆈ
	忌迷つ迥	山口))[[[]][[]][[]][[]][[]][[]][[]][[]][[]]	「水温[C] pH	処理流量[m³/h]	[損大小與[cm]
喵ブロ	生物接触ろ過			加亚达县[3/4]	
限つ迥	膜ろ過			│処理流重[m / n] │	膜差圧[kPa]

表-1 数値解析モデル概要







(左上:凝集沈殿,右上:急速ろ過, 左下:生物接触ろ過,右下:膜ろ過)

3. ロバスト性からみた浄水プロセスの安定性評価 手法の構築

(1) ロバスト性とは

計画システム工学分野においては、数値シミュレー ションを通して、設計対象の解析・評価がなされてき ている.しかし、通常の決定論的最適化では、現実世 界でみられる設計問題に完璧に対応できる訳ではない. なぜなら、製造誤差や使用環境変化等といった実設計 問題に不可避的に存在する不確実性のない理想的環境 化において性能の改善を目標とした最適化でであるか らである¹⁰.

そこで、ロバスト性という考え方が注目されている.

ロバスト性とは頑強さ、頑丈さ等と訳される robust と いう形容詞からきている。つまり、ロバスト性とは、環 境の変化といったパラメータ変動が起こった場合、回の 性能の変化を防ぐ性質のことである。本研究では、流入 水質やプロセス内の条件の一部が確率的に変動するもの と仮定し、流入水質の変動に対する画浄水処理プロセス のロバスト性評価をするための手法の構築を試みる。

(2) ロバスト最適解探索のための計算手法

ロバスト最適化とは Mulvey¹¹⁾によって構築された計 算方法で、ロバストな解を得ることができる. ロバスト 最適化では想定される個々のシナリオに対して得られる 目的関数値の平均や分散やペナルティ関数を対象にして 最適化を行うことによってロバストな解を得る方法であ る、実際にロバスト最適化は以下のように定式化される.

Minimize $\sigma(\xi_1, \cdots, \xi_s) + \omega \rho(z_1, \cdots, z_s)$ (5)

Subject to Ax = b

> $B_s x + C_s y_s + z_s = e_s$ (7)

> $x, y_s \ge 0$ for all $s \in \Omega$ (8)

> > 急速ろ過

膜ろ過

ここでく、はシナリオsにおける目的関数の値, $\sigma(\zeta)$ は集計関数, ρ(ζ)はペネルティ関数とする. 様々な 集計関数やペネルティ関数が提案されている¹²⁾が、本 研究では目的関数値の平均を μ,標準偏差を σ とおき, μ+λ σ を採用する. 各浄水プロセスの出口濁度の値は 非常に小さく、構築した数値解析モデルにおいて、浄水 場で設定している基準を違反することはない. そのため, ペネルティ関数は考慮しないこととした.

(3) ロバスト最適化の計算結果

本研究では,流入水質の変動が大きい夏季に注目した. λの値が0と1のときのロバスト最適化問題によって 得られた解を表-3、表-4に示す。また、実際に浄水場 で行われている運転条件を比較のために表 -5 に示す.

次に得られた解が実際にどの程度ロバスト性を有して いるかを確認するためにモンテカルロ法による数値シ ミュレーションを行う. 具体的には、実データから得ら れた流入水質の平均と標準偏差による正規乱数を発生さ せて各浄水プロセスの流入水質とし、1000回の繰り返 し計算を行った。繰り返し計算によって得られた浄水濁 度の結果を図-6に示す。ここで、箱ひげ図は最小値、 第1四分位点,中央値,第3四分位点,最大値,外れ 値を示している.

凝集沈殿プロセスでは、λの値による最適解の違い は見られなかった、いずれの計算結果も、最適化計算の 際に設定した説明変数の上限値に近い値を解として示し ている。これは、薬品注入率を高くすることによって、 安定的に処理することができるといえ、浄水処理技術の 知見からは矛盾のないものと言えよう.一方,エネルギー 消費の観点からは、薬品注入率が高くなるほど、浄水処 理に係るエネルギー消費は増大しうるといえる.つまり, 処理水質のロバスト性とエネルギー消費量はトレードオ フの関係にあると推察され、このことは、エネルギー消 費の視点を組み込んだ形での水質のロバスト性確保のた めの最適化手法の検討が必要であるといえよう。

膜ろ過プロセスにおいても,数値シミュレーション結 果である浄水濁度において、λの値による違いはあま

表-3凝集沈殿システムの運転条件 $\lambda = 0$ $\lambda = 1$

(6)

					<i>/</i> (1	
プロセス	PAC	前塩注入率	中塩注入率	PAC	前塩注入率	中塩注入率
凝集沈殿	40	1.92	1.98	40	1.94	1.98
急速ろ過	24.1	1.96	0.401	20	2	1.5

			$\lambda =$	0	$\lambda = 1$	
	プロ	コセス	処理7	水量	処理水	量
	生物	妾触ろ過	69.	8	68.8	
	膜	ろ過	38.	6	96.4	
		表-5章	見状の追	運転乡	条件	
シス	テム	プロセ	こス		運転条	件
		凝集対	七殿		PAC	28

急速ろ過

生物接触ろ過

膜ろ過

前塩注入率

中塩注入率

処理水量

1.48

1.25

103.2

表-4 急速ろ過システムの運転条件

- 45 -



り見られなかった.また,数値シミュレーションは非 常に小さい値を示している.つまり,膜ろ過プロセスは, 流入水質の変動性からあまり影響を受けないシステム であると言えよう.

一方,急速ろ過プロセスと生物接触ろ過プロセスで は、λ=0のロバスト最適化により得られた解は入力変 数の変動の影響を十分に低減することができていない. しかしながら、λ=1のロバスト最適化により得られた 解は、入力変数の変動による影響を十分に低減するこ とができた.このことからλの値が大きいロバスト最 適化がよりロバストな解を探索することができると考 えられる.したがって、流入水質の変動幅が大きくな る場合においては、急速ろ過および生物接触ろ過プロ セスは、ロバスト最適化により、より安定した浄水処 理を行うことが可能であるといえよう.

4. 結論

本研究では、ロバスト性の観点から、気候変動によ る水源水質変動リスクに対する浄水処理プロセスの安 定性評価手法の構築を目的として、流入水質・運転条 件と浄水濁度の関係を定量的に把握するための数値解 析モデルを構築した. さらに、構築した数値解析モデ ルを用いて、ロバスト最適化問題を解くことによって、 不確実性を考慮した最適解を導出した. さらに、モン テカルロ法による数値シミュレーションによって、最 適解を適用したときの浄水濁度を計算して、各プロセ スのロバスト性を検討した. その結果、ロバスト性の 観点を導入することによって、水源水質の変動による 影響を低減することができることを指摘しえた.

謝辞:本研究の進行にあたり,神戸市水道局の職員の方々 から多大なご協力を賜りました.ここに感謝の意を表し ます.

参考文献

- 1) 厚生労働省:水道ビジョン,2008.
- 2)環境省,文部科学省,経済産業省,気象庁:IPCC 地球温暖化第四次レポート,2007.
- 環境省中央環境審議会:21世紀環境立国戦略に向けた提言,2007.
- 4) 社団法人 日本水道工業連合会:「首都圏における 低炭素化を目標とした水循環システム実証モデル事 業」『首都圏水循環検討委員会』報告書, 2011.
- Wold, H.:Partial least squares, *Intern. J. Cardiol.*, Vol.147, Iss.2, pp.581-591,1985.
- 廣松康一,高原淳一,西原力,岡本晃典,安永照雄, 大眉 佳大,高木 達也,中園 金吾:Kernel Partial Least Squares による化学物質の生分解性予測, Journal of Computer Aided Chemistry, Vol.10, 2009.
- Rosipal, R. and Trejo R. J.: Kernel Partial Least Squares Regression in Reproducing Kernel Hilbert Space, J. Mach. Learn. Res., Vol.2, pp.97-123, 2001.
- Wold, S.: Cross-validation esitmation of the number of components in factor and principal component analysis, *Technometrics* 24, pp.397-405, 1978.
- 9) 橋本淳樹,田中豊:PLS回帰におけるモデル選択, アカデミア 情報理工学編,Vol.10,pp.39-49,2010.
- 下山幸治,鄭信圭,大林茂:多目的ロバスト設計の ための方法論確立と実問題応用,日本信頼性学会 誌, Vol.32, No.2, pp.105-112, 2010.
- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., Zenios, S. A.: Robust Optimization of Large-Scale Systems, *Oper. Res.*, Vol.43, No.2, pp.264-281, 1995.
- Watkins, D. W. Jr. and McKinney, D. C.: Finding robust solutions to water resources problems, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, Vol.123, No.1 pp.49-58, 1997.

(2012. 7.18 受付)

ESTABLISHMENT OF EVALUATION PROCEDURE FOR RELIABILITY OF WATER PURIFICATION PROCESS FROM THE VIEWPOINT OF ROBUSTNESS

Masahiro WADA, Nagahisa HIRAYAMA, Victor SHINDE, Sadahiko ITOH

The purpose of this study is to establish the evaluation procedure for stability of water purification process from the viewpoint of robustness, considering the risk of changes in water resource quality under climate change conditions. The numerical simulation models of water treatment processes, which could describe the quantitative relationship between influent water quality, operating conditions, and the turbidity, were developed using the Partial Least Squares Kernel method. Then, using a probabilistic approach, the possibility of controllable for influent water quality changes in the water purification process under the robust optimization conditions was examined. As the results, it was indicated that a robustness stability evaluation of water purification processes could reduce the impact of changes in water resources quality caused by climate change.