

下水処理場の流入および処理水質の確率統計的解析

Stochastic analysis of influent and treatment water quality data in municipal waste water treatment plant

函館高専 社会基盤工学科 ○正 員 大久保孝樹 (Takaki Ohkubo)
函館高専 環境都市工学科 学 生 水野裕基 (Hiroki Mizuno)

1. はじめに

下水処理の方法として、一般に標準活性汚泥法およびそれらの変法が用いられている。活性汚泥法などの高度な制御技術を用いた処理方法でも、流入下水水質の変動や環境(水温・pH など)によって処理水質の安定性が影響を受ける。流入下水水質などの時系列変動は、ランダムな変動を示すことが知られており、そのランダム変数(流入下水水質・処理水質)はある確率分布(正規分布・対数正規分布など)を示すことが知られている。この確率分布を調べることによって、下水処理場の処理安定性(標準偏差)と排水基準値を超えるリスク確率(超過確率)を確定することができる。また、活性汚泥処理場を簡単な数学モデルとして一つのシステムと考えると、システムを通したインプット(流入水質)とアウトプット(処理水質)の関係が成り立つものと考えられる。

本研究では、函館市の某処理場の平成10年4月～平成20年4月の10年間の水質データ(流入・処理水)を確率統計的に処理し、下水処理場の安定性と排水基準を超えるリスク確率を推定するとともに、活性汚泥法のシステムモデルにおける確率論的考察をモンテカルロシミュレーションによって解析した。

2. 函館市の某下水処理場の概要

処理方法：標準活性汚泥法(嫌気好気処理法)

下水集水の種別：合流式および分流式

供用開始：昭和49年7月、

全体計画：処理区域面積 2872ha、処理区域人口 136700人、処理能力 81200m³/日

函館市は、水産加工で有名であり、その排水が下水道に流入しており、他の都市の一般的流入BOD濃度100～200mg/lの2倍以上のBODが流入していることがある。

3. 解析方法

本研究では、確率統計的にデータを解析するために、フリーソフトであるRを用いた。Rの特徴として、Rの名前付きのデータフレームにEXCEL等のデータ(CSV形式)を変換すれば、後は全て水質データがベクトルデータとして並列的に計算され、モンテカルロシミュレーションにおいても特に威力を発揮する。以下に、本論文に載せた解析について列挙する。

- ① 水質データの時系列表示
- ② 水質データのヒストグラム表示と推定確率密度分布表示および正規分布または対数正規分布の表示
- ③ 超過確率の計算と超過確率に対する確率点の計算
- ④ システムのモンテカルロシミュレーション

Rに用いたデータは、各種水質の10年間のデータ(流入水：約290(データ数)×9(項目数)、処理水：290(データ数)×12(項目数))を保存してあるEXCELより、csv形式からRのデータフレームとして読み取った。

4. 下水処理場の時系列データ表示

ここでは、下水処理場の流入下水水質(BOD, NH₄-N, NO₃-N, T-N)と処理水質(BOD, NH₄-N, NO₃-N, T-N)の時系列表示した結果を示す。但し、BODに関しては、流入BODは硝化抑制剤を加えないで測定しているが、ほとんどの成分が高濃度の炭素系有機物と考えられ、希釈倍率も高いので硝化の影響は少ないと考えられる。処理水BODは、硝化抑制剤を添加したC-BODと添加しないBODを測定しており、それらの差からN-BODを計算している。処理水BODは、C-BODを用いて評価している。

4.1. 流入および処理水BODの時系列変化

図-1は、流入下水のBODと処理水BOD(C-BOD)の時系列変化を示したものである。流入BODは、表-1に示すように、最大540mg/l、最小120mg/lで平均273mg/lであり、水産加工場の影響もありかなり大きなBODが流入している。トレンド的な変化はあるが、季節的な変化はほとんど見られなく、ランダムな変化が大きいと考えられる(Rによるトレンド・季節変化・ランダム変化の分解：本論文には結果を示していない)。処理水C-BODは、最大14mg/l、最小2.3mg/l、平均4.17mg/l(表-1)であり、放流水基準15mg/lをクリアしている。処理水BODの変動は平成10年～13年の3年間の初期に大きく変化しているが、以降はほぼ安定している。処理効率は平均で約98%である。

4.2. 処理水のBOD、C-BOD、N-BODの時系列変化

図-2は、処理水のBOD、C-BOD、N-BODの時系列変化を示したものである。平成10年～13年の3年間のBOD、N-BODの変動は大きくなっており高い値を示し、C-BODは低い値を示している。図-3の流入・処理水の総窒素(TN)を見ると平成10年～13年の3年間はほとんど窒素除去がなく、また図-4のNH₄-N、NO₃-Nの変動をみると、その3年間でNO₃-Nが高い値を示しており、この3年間は嫌気好気処理法が行われていなかったことが伺われ、脱窒素がほとんど行われていなかったことが推察できる。このことが、N-BODとN-BODを含んだBODが高い値を示し変動が大きくなっていた理由と考えられる。

4.3 流入・処理水の総窒素(TN)の時系列変化

図-3は、流入TNと処理水TNの時系列変化を示したものである。流入TNは、最大170mg/l、最小20mg/l、平均49.3mg/lであり、最大170mg/lは突発的な現象で

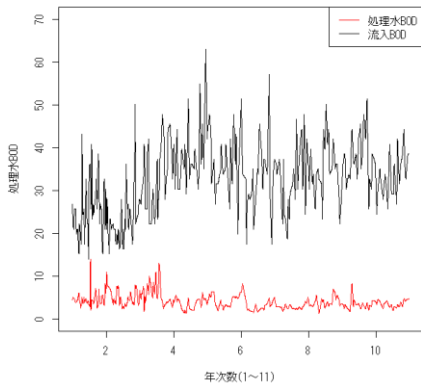


図-1 流入・処理水 BOD の時系列変化

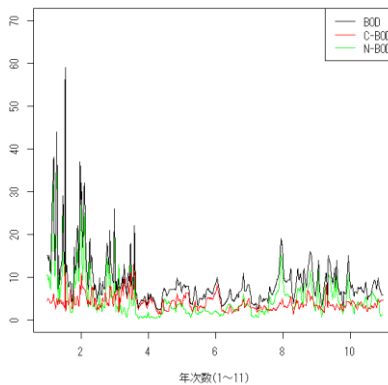


図-2 処理水 BOD・C-BOD・N-BOD の時系列変化

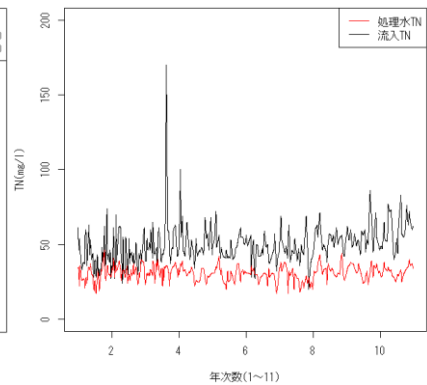


図-3 流入・処理水 TN (総窒素) の時系列変化

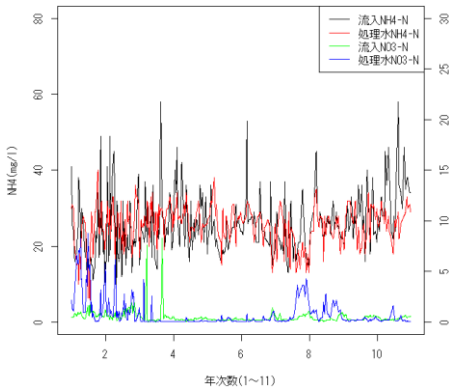


図-4 流入・処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ ・ $\text{NO}_3\text{-N}$ の時系列変化

表-1 流入・処理水水質項目の最大値・最小値・平均値・標準偏差

水質項目	最大値	最小値	平均値	標準偏差
流入BOD(mg/l)	540	120	273	76.3
処理水BOD(mg/l)	59	2.3	9.65	6.92
処理水C-BOD(mg/l)	14	1.2	4.17	1.93
処理水N-BOD(mg/l)	45	0.3	5.61	6.1
流入TN(mg/l)	170	20	49.3	13.4
処理水TN(mg/l)	46	17	30.8	5.2
流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)	58	9.8	25.5	8.43
処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)	40	5.8	25.4	5.5
流入 $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/l)	8.3	0.02	0.523	0.719
処理水 $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/l)	8.8	0.04	0.942	1.56

あり、水産加工場の影響が大きいものと考えられる。処理水 TN は、最大値 46mg/l、最小値 17 mg/l、平均 30.8、標準偏差 5.2 mg/l であり安定している。初期の 3 年間で過ぎた以降は、嫌気好気処理法の効果が出ており、脱窒が行われていることが示唆される。

4.4. 流入・処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の時系列変化

図-4 は、流入・処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の時系列変化を示したものである。流入および処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ がほぼ同じ値で変動し、図-3 に示す TN のある程度の除去を考慮すれば、活性汚泥処理システムにおいて、流入 TN から $\text{NH}_4\text{-N}$ が生成されていることがわかる。さらに、初期の 3 年を過ぎた以降において、 $\text{NO}_3\text{-N}$ がほとんど微量な検出しかされていないことを考慮すれば、嫌気好気処理法において効果的に脱窒が行われていることがわかる。

5. 水質データの確率統計的解析

4 節において、水質データの時系列変化を示したが、この時系列変化にはある程度の傾向は伺われるが、ある規則をもったランダムなデータとして扱うことが可能である。すなわち、単なる白色雑音ではなく、ある分布をもったランダム変数として考えることが可能である。ここでは、水質がどのような確率分布を持っているかを調べるために、ヒストグラム表示をして、さらに R による密度分布を表示し、正規分布、対数正規分布の適合性を評価した (R による分布適合チェックはここでは表示していない)。さらに、ある数値の水質値を超える超過確率、特に BOD は処理場の放流水質基準が 15mg/l であり、超過確率は処理場の処理性能を評価する対象となり得る。また、逆の表示である超過確率に対する確率点も

有用な指標となり得る。ここでの確率点は、水質濃度を表す。確率分布の広がりを表す標準偏差は、処理場の安定性を示すことになる。以下に、これらの概念をもとに、結果を表示して考察を行う。

5.1. 流入・処理水 BOD の確率密度分布

図-5 は流入 BOD のヒストグラムと R による確率密度分布推定、正規分布を表示したものである。流入 BOD の確率分布は、正規分布に近く、平均 273mg/l、標準偏差 76.3 mg/l である。ここでは表示していないが、R による正規分布のチェックでは、ほぼ正規分布に従っていることが確認されている。平均 273mg/l に対して標準偏差が 76.3 mg/l であることから幅広く分布していることがわかり変動が大きいことも時系列表示(図-1)によって示されている。この変動の大きい流入 BOD に対し、図-6 に示してある処理水 BOD (C-BOD) のヒストグラムは、対数正規分布に従っており、平均 4.17 mg/l、標準偏差 1.93 mg/l で標準偏差は小さく、変動の大きい流入 BOD に対して、安定した処理水 BOD が排出されていることが確認できた。表-2 に示すように、処理水 BOD の 0.5% 超過確率点は 11.7 mg/l であり、放流水基準の 15mg/l の超過確率は 0.0855% で 10 年間 (3650 日) に 3 日 (3 回) 基準を満たさない確率を示しており、非常に安定した処理場であると評価できる。

流入と処理水の BOD 分布の変化に関しては、活性汚泥システムを通ることによって正規分布が対数正規分布に変化することが示されており、このことについては 6 節のモンテカルロシミュレーションのところで論じている。

5.2. 流入・処理水 TN (総窒素) の確率密度分布

図-7 は、流入 TN のヒストグラムと R による確率密度

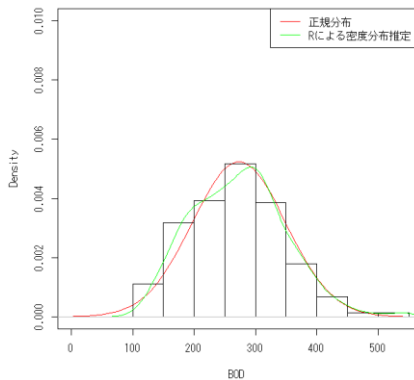


図-5 流入 BOD の確率分布

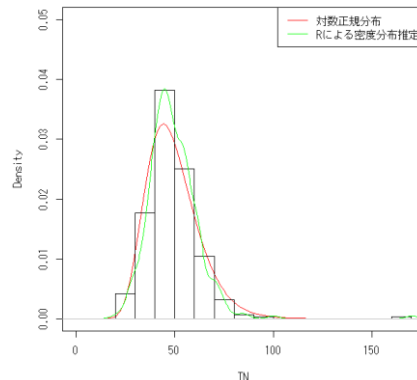


図-7 流入 TN(総窒素) の確率分布

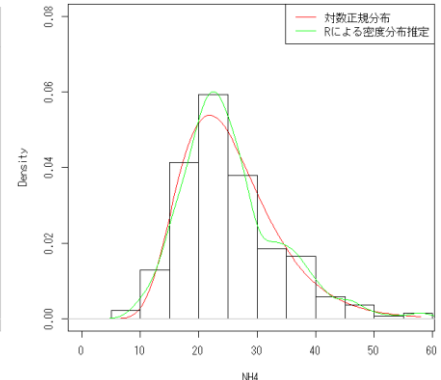


図-9 流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ の確率分布

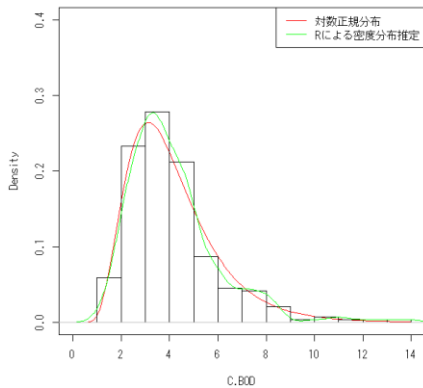


図-6 処理水 BOD の確率分布

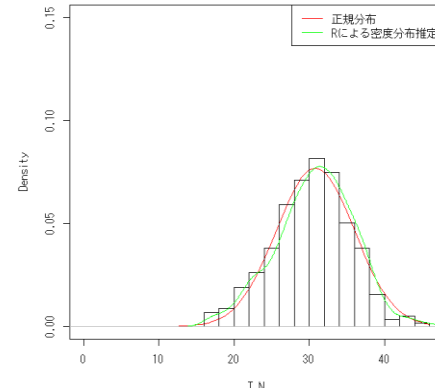


図-8 処理水 TN(総窒素) の確率分布

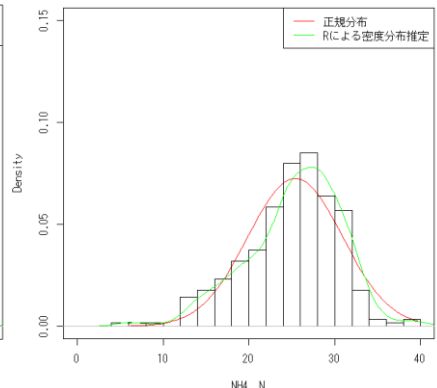


図-10 処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ の確率分布

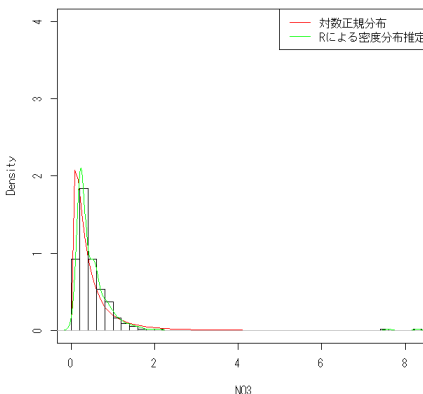


図-11 流入 $\text{NO}_3\text{-N}$ の確率分布

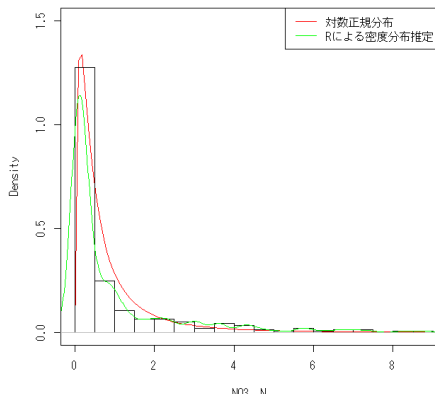


図-12 処理水 $\text{NO}_3\text{-N}$ の確率分布

表-2 処理水水質項目の超過確率および確率点

水質項目	確率項目	(mg/l) %
C.BOD	(1%)超過確率点	10.5mg/l
	(0.5%)超過確率点	11.7mg/l
	(10mg/l)超過確率	1.35%
	(15mg/l)超過確率	0.0855%
	(20mg/l)超過確率	0.0075%
TN(総窒素)	(1%)超過確率点	42.9mg/l
	(0.5%)超過確率点	44.2mg/l
	(30mg/l)超過確率	56.0%
	(40mg/l)超過確率	3.81%
	(50mg/l)超過確率	0.011%
$\text{NH}_4\text{-N}$	(1%)超過確率点	38.2mg/l
	(0.5%)超過確率点	39.6mg/l
	(30mg/l)超過確率	20.1%
	(40mg/l)超過確率	0.394%
	(50mg/l)超過確率	0.00038%

分布推定、対数正規分布を示したものである。流入 TN は、図-6 の流入 BOD とは異なり、対数正規分布を示すことがわかった。一方、処理水 TN の分布を示した図-8 では、正規分布を示しており、流入の分布が処理場の活性汚泥システムを通ることによって、確率分布が変化するものと考えられる。処理水 TN の 0.5%超過確率点は 44.2 mg/l となっており、水質汚濁防止法の一律排水基準 100 mg/l を十分クリアしており、50 mg/l 超過確率は、わずか 0.011%となっている。

5.3. 流入・処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ の確率密度分布

図-9 は、流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ のヒストグラムと R による確率密度分布推定、対数正規分布を表示したものであり、図-10 は処理水 $\text{NH}_4\text{-N}$ の分布を示しておりほぼ正規分布となっている(正確に言えば対数正規分布の逆形状に近い分布となっている)。表-1 より平均値では流入が 25.5 mg/l、処理水が 25.4 mg/l でほぼ同じで、標準偏差は 8.43 mg/l、5.5 mg/l で標準偏差のみに差がある。一方、

分布形状は全く異なっている。このことは、活性汚泥システムを通ることによって、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が変化しないのではなく、有機性窒素からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成、硝化の反応が生じて、このような分布の変換が行われたものと考えられる。

5.4. 流入・処理水 $\text{NO}_3\text{-N}$ の確率密度分布

図-11 と図-12 は、それぞれ流入と処理水の $\text{NO}_3\text{-N}$ のヒストグラムと R による確率密度分布推定および対数正規分布を表示している。ほぼ対数正規分布に従っていることがわかり、処理水 $\text{NO}_3\text{-N}$ の平均値と標準偏差は 0.942 mg/l、1.56 mg/l であり、嫌気好気処理を 3 年以降に行っていることと標準活性汚泥法の滞留時間(6 時間)のことを考えると、 $\text{NO}_3\text{-N}$ がわずかであることは当然であるといえる。

6. 活性汚泥システムのモンテカルロシミュレーション

エアレーションタンクが、細長い折り返しの水路になっている場合、その流体挙動は押し流れと考えてよい。

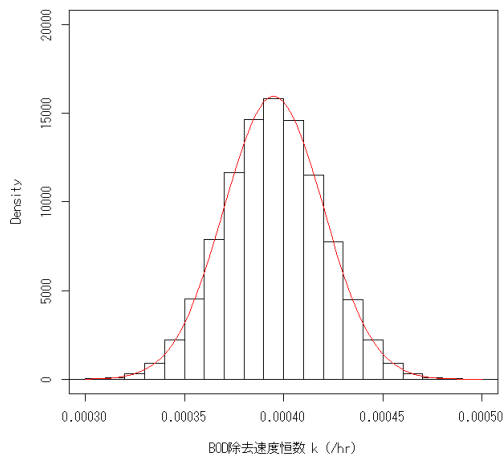


図-13 BOD 除去速度恒数の仮定確率密度分布

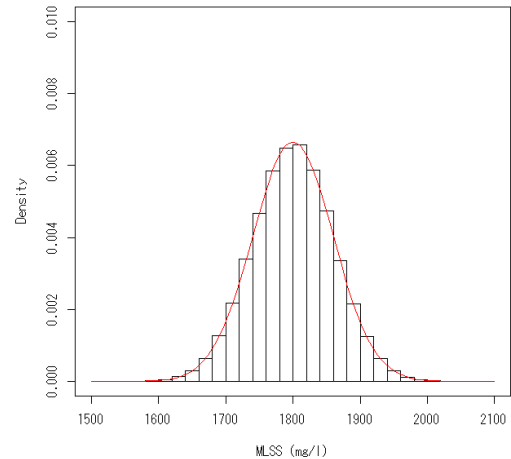


図-14 MLSS の仮定確率密度分布

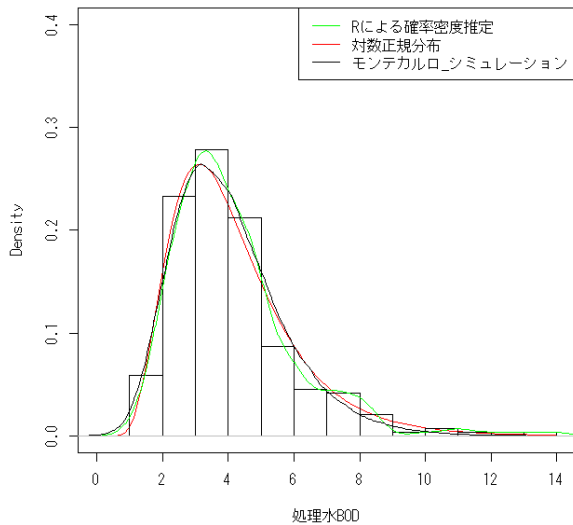


図-15 モンテカルロシミュレーションによる処理水 BOD の再現

押し出し流れ（ピストンフロー）の BOD 除去反応式は BOD 反応を 1 次反応と考えると以下の式で表される。

$$-\frac{dS}{dt} = k_1 X S$$

S:曝気槽内の BOD (mg/l)

k_1 :BOD除去速度恒数 (l/mg・hr)

X:曝気槽内平均汚泥濃度 MLSS(mg/l)

$$S = S_0 e^{-k_1 X t}$$

S_0 :流入BODの分布とする

k_1 :正規分布とする

X:正規分布とする

上式を用いて、 S_0 として実データより求めた流入 BOD の正規分布乱数(平均 273 mg/l、標準偏差 76.3 mg/l)を発生させ、さらに、BOD 除去速度恒数(k_1)の正規乱数(平均 $3.95e-4$ 、標準偏差 $0.25e-4$)(図-13)と MLSS(X)の正規乱数(平均 1800mg/l、標準偏差 60mg/l)(図-14)を発生させ、数学モデル式に代入して、モンテカルロシミュレーションを行った。乱数は 200000 発生させており、十分収束していることを確認した。試行錯誤で、 k_1 と X を調整して、処理水 BOD の分布(図-15) に合わせるように

した結果、妥当な k_1 と X の平均値が求められ、分布も妥当な範囲に収まっていることが確認できた。図-15 は、処理水の BOD の実データの分布とモンテカルロシミュレーションを行って得られた確率密度分布を示したものであるが、ほぼ処理水 BOD の実データを再現できている。数学モデル式を厳密にいうと、嫌気好気処理法を用いた標準活性汚泥法の変法であることを考えれば、正確でないことは言うまでもないが、嫌気好気を通して一連の BOD 除去反応が 1 次反応の押し出し流れに従っていることを容認できたことを示すものである。

7. まとめ

函館市の某下水処理場の流入および処理水の水質データを確率統計的に解析した結果、以下の知見が得られた。

- ①水質データの時系列表示をすることによって、処理場の操作の状況がわかり、嫌気好気処理法の変法に切り替えた状況を推察できた。
- ②処理水水質データの超過確率点の水質濃度やある水質濃度(放流基準など)に対する超過確率を調べた結果、この処理場は放流基準を維持している良好な処理場といえる。
- ③処理水水質データ分布の標準偏差は小さく、安定した処理を行っていると考えられる。
- ④押し出し流れの数学モデルを用いてモンテカルロシミュレーションを行った結果、処理水 BOD の確率密度分布を良好に再現できた。このことは、嫌気好気処理法の標準活性汚泥変法にも、理論的には厳密ではないが 1 次反応の押し出し流れの理論を用いることができることを示している。

8. 今後の展望

処理場のデータは、現在、利用されずにビッグデータとして残されているのが現状であると思われる。フリーソフトの R を用いれば、その処理上の管理操作状況を詳細に調べることができる。今後は、道内の処理場のデータを収集して解析していく考えである。

文献：

- 1) Richard Damiecki:Efficiency and process stability of Western-German municipal waste water treatment plant :Thesis published at Achen University in 1982