〈研究発表〉

多変量統計的プロセス管理手法を応用した下水処理場の省エネルギー診断

山中 理1), 長岩 明弘1), 平岡 由紀夫2), 山本 勝也3), 佐野 勝実4), 佐々木 稔4)

- 1)(株) 東芝 電力・社会システム技術開発センター(〒183-8511 府中市東芝町 1, E-mail: osamu2.yamanaka@toshiba.co.jp)
- 2)(株) 東芝 社会インフラシステムソリューション部(〒183·8511 府中市東芝町 1, E·mail: yukio.hiraoka@toshiba.co.jp)
- 3)(株) 東芝 水・環境ソリューション技術開発部(〒105-8001 港区芝浦 1-1-1, E-mail: katsuya.yamamoto@toshiba.co.jp)
- 4) 日本下水道事業団 技術開発研修本部 (〒335-0037 埼玉県戸田市下笹目 5141, E-mail: Sano05@iswa.go.jp)

概要

本論文では、多変量統計的プロセス管理(MSPC)を応用した下水処理場運用の省エネルギー診断手法を提案する。MSPCは、高次元のプロセスデータから各種の異常を検出し、その要因となる変数を抽出する技術である。本論文では、MSPCとエネルギーの利用効率を示すエネルギー原単位の監視を組み合わせることにより、エネルギーを過剰消費している運用の要因を発見できることを実際の下水処理場の実データを用いて示す。また、エネルギーの過剰消費の因果関係を明らかにすることにより、省エネルギー運用のための運転改善案を容易に提示できることを示す。

キーワード: 異常診断,省エネルギー診断,下水処理プロセス,運用改善

はじめに

下水処理場の安定運用と効率的な維持管理が求められる中、我々は、流量、各種水質、運転操作量(ポンプやブロワ運転)など下水処理場で連続計測しているプロセス監視データを用いた異常診断技術の開発を進めてきた「1)-4)。この技術は、数十~数百項目におよぶ多数のプロセス監視データから検出し得る様々な異常状態や非定常状態を、各監視項目の管理上下限値に到達する前に素早く検出し、その主要因と考えられるプロセス監視項目を抽出する多変量統計的プロセス管理

(MSPC:Multivariate Statistical Process Control) に基づくものであり ^{1),2),5)}, 異常時の迅速な対応の支援や日常運転の改善点を発見することを目的としている。本技術の実用化に向けて, 平成 20 年度から共同研究を通じて, 本技術を実際の下水処理場に適用する際の課題と具体的な適用方法の検討を行ってきた ³⁾⁻⁴⁾。

本論文では、開発した異常診断技術を下水処理プロセスの省エネルギー診断に応用した事例を報告する。 具体的には、単位処理量当たりの電力消費量であるエネルギー原単位に着目して異常診断技術を応用することにより、エネルギー過剰消費の要因発見が可能であることを示す。また、これに基づいて異常発生メカニズムを明らかにすることにより、省エネルギー運用のための運用改善法を提示できることを示す。

2. 対象プロセス

対象とする下水処理場は、計画水量 211,800m 3 /日の処理場であり、1 系 \sim 5 系の 5 系列で水処理を行って

いる。

本論文では、嫌気・好気活性汚泥法(AO 法)を採用している4系を診断対象とし、Table 1のプロセス監視項目(計測周期:1分)を用いて診断を行った。なお、Table 1の50、51のエネルギー原単位は、プロセス計測データから算出した演算データである。ブロワは配管が4系と5系で共通であるため、ブロワ関連のエネルギー原単位は4系と5系共通で計算している。ブロワ以外のエネルギー原単位は4系の汚水ポンプ等に関するものである。

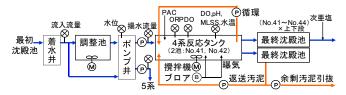


Fig. 1: Principal Layout of Full-Scale Wastewater Treatment Plant

Table 1 Monitoring Variables for Energy Saving Diagnosis

No.	プロセス監視項目	No.	プロセス監視項目
1	No.41-1 反応タンク曝気風量	27	No.44下段終沈汚泥引抜量
2	No41-2 反応タンク曝気風量	28	No.40余剰汚泥流量制御
3	No.42-1反応タンク曝気風量	29	No.40返送汚泥流量制御
4	No.42-2 反応タンク曝気風量	30	有機汚濁モニタUV計UV値
5	No.41反応タンク前段DO	31	有機汚濁モニタUV計UV-VIS値
6	No.42反応タンク前段DO	32	有機汚濁モニタUV計VIS値
7	No.41反応タンク後段DO	33	次亜塩注入量(高度処理水)
8	No.42反応タンク後段DO	34	高度処理量
9	No.41反応タンクORP	35	No.01動力変圧器1次電力量
10	No.42反応タンクORP	36	次亜塩注入量制御(高度処理水)
11	No.41反応タンクpH	37	総ブロワ風量
12	No.42反応タンクpH	38	総ブロワ風量制御
13	No.41反応タンクMLSS	39	No.01流入調節弁流入流量
14	No.42反応タンクMLSS	40	No.01流入調節弁流入調節弁開度
15	No.41反応タンク温度	41	No.40汚水ポンプポンプ井水位
16	No.42反応タンク温度	42	No.40汚水ポンプ揚水流量
17	No.40返送汚泥流量	43	No.40汚水ポンプポンプ回転数
18	No.40返送汚泥濃度	44	No.40汚水流量制御
19	No.40余剰汚泥流量	45	No.50汚水ポンプポンプ井水位
20	No.41上段終沈汚泥引抜量	46	No.50汚水ポンプ揚水流量
21	No.42上段終沈汚泥引抜量	47	No.50汚水ポンプポンプ回転数
22	No.43上段終沈汚泥引抜量	48	No.50汚水流量制御
23	No.44上段終沈汚泥引抜量	49	No.11~13ブロワ電力量総和
24	No.41下段終沈汚泥引抜量	50	ブロワ関連エネルギー原単位(49/(42+46
25	No.42下段終沈汚泥引抜量	51	ブロワ以外エネルギー原単位(35/42)
26	No.43下段終沈汚泥引抜量		

3. MSPCを応用した省エネルギー診断手法

3.1 MSPC に基づく異常診断技術の概要

プロセス監視データ間には, 物理的な因果関係や人 工的な操作に起因した相関があることが多く 1),2), 本 異常診断技術は、この相関を利用した多変量統計的プ ロセス監視 (MSPC) という技術を利用している 2),5)。 MSPC では、多数のプロセス監視データの相関軸から の距離を示す Q 統計量(=相関関係の崩れを示す) と分布の中心からの距離を示す T2 統計量 (=プロセ スの変動を示す)を生成し、これらの統計量の大小に よってプロセスの異常や非定常状態を検出し、異常検 出時にその要因と考えられるプロセス監視データを推 定する 1),3)。この異常診断の原理と手順を Fig.2 に示す。 Fig.2 において、上から下への矢印は通常時の監視の 流れであり、プラント管理者はQ統計量やT²統計量 (以下,診断統計量)でプラント状態を監視する。一 方,下から上への矢印は異常時の流れを示しており, 異常時の診断統計量への監視項目の貢献度(=寄与量 5) の大きいものを抽出して要因を推定する。なお, 異常診断を実施する前に, サーバに蓄積された過去の データから診断統計量や寄与量の計算式や異常判定し きい値を算出する異常診断モデル構築が必要である。

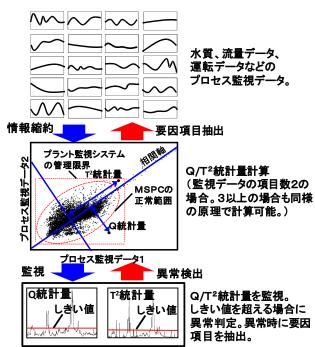


Fig. 2: Fault Detection and Isolation Procedure Based on MSPC

3.2 省エネルギー診断への応用

この異常診断技術は、プラントで生じる様々な異常 状態の汎用的な診断を目的としているが、実用化に向 けて解決すべき課題として、処理場等へのインタビュ ーの結果、次の意見や要望を得た。

- (i) 診断統計量は、プラント監視データの様な物理量で 無いため、意味を理解しづらい。
- (ii) 省エネルギー運用や放流水質の安定化の知見につながる状態の診断(検出と要因推定)に特に興味があり,通常のプラント監視システムで検出可能な異常(例:センサ指示値0等)を本技術で改めて検出する必要は無い。

これに応えるため、Fig.2 の診断統計量の監視に替えて、エネルギー消費量や放流水質と直接関係する指標に診断統計量の異常点を重ねて監視する様に MSPC を修正した。そして、診断統計量の異常と指標自身の異常との論理和により異常検出を行う様にした。ここでは、特に省エネルギー診断を目的とし、エネルギー原単位を指標とした。このイメージを Fig.3 に示す。

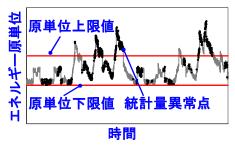


Fig. 3: Modified MSPC-Based Monitoring

Fig.3 の様にエネルギー原単位という物理量で監視を行うことにより、実際にプラントを監視する人は監視対象を明確に理解でき、エネルギー消費に関わる異常要因を選択的に診断することが容易になる。なお、エネルギー原単位異常時の要因抽出には診断統計量の寄与量を用いた(Fig.2 参照)。これは、エネルギー原単位に対するものではないが、エネルギー原単位を異常診断モデルの入力項目(Table 1 参照)に含めることにより、エネルギー原単位異常が診断統計量の異常として検出されることを期待して、これを利用した。

4. 省エネルギー診断結果と運用改善の可能性

4.1 省エネルギー診断評価方法

Fig. 1 の処理場のデータを用いて 3 章で示した方法 により、下記の条件で省エネルギー診断を行った。

(1) 診断モデル構築データと評価データ

診断対象期間を2009年5月7日~2009年12月27日とし、その期間におけるTable 1に示す項目のプロセス監視データ(計測周期:1分)を用いた。診断モデル構築用データと評価用のデータは同一のものとし、各月毎にモデル構築を行い、月毎に評価した。なお、この方法は、過去の運転データから運用改善点を抽出するオフラインの解析の場合にのみ適用できる。

(2) データ処理方法

計測データから欠側値や異常値除去を行う前処理 を行い,5分単位の時系列データを合成した。

(3) エネルギー消費の異常点検出法

以下の2つのエネルギー原単位を用いてエネルギー消費の異常点を検出した。原単位の異常判定しきい値(上下限)は、上下限内のデータが大半のデータをカバーする様に、若干の試行錯誤の上設定した。一ブロワ関連原単位(kWh/m³)(Table 1 内 No.50)式:4系+5系ブロワ総電力量/4系+5系流入量異常判定しきい値:上限0.19、下限0.14

-ブロワ以外原単位(kWh/m³) (Table 1 内 No.51) 式:4系ブロワ以外電力量/4系流入量 異常判定しきい値:上限 0.073,下限 0.04

(4) エネルギー原単位異常要因変数の抽出法

エネルギー原単位あるいは診断統計量の異常が認められた点で、Q統計量および T²統計量の各々について、その寄与量が大きい上位3つのプロセス監視項目 (Table 1) の検出時刻付近の時系列データを観測することによって、要因変数を抽出した。

4.2 省エネルギー診断評価結果

(1) エネルギー原単位異常要因の分類

Fig.4~Fig.6 に, Q 統計量および T^2 統計量の異常点を重ねてプロットしたエネルギー原単位時系列データ (Fig.4, Fig.6:ブロワ関連, Fig.5:ブロワ以外)の例を示す。Fig.5 と Fig.6 には,各々,10月17日3:00~20:00,11月11日0:00~17:00の主な異常要因として挙げられた監視項目の時系列データを併せて示す(ただし,Fig.5 の曝気風量は要因として抽出されなかったが,後述の説明のために示す。)。Fig.4~Fig.6 に示した \blacksquare , \blacksquare , \blacktriangle , \diamondsuit は,対象となる下水処理場付近の日降雨量(気象庁データ)であり,各々,10mm未満,10mm~30mm,30mm~100mm,100mm以上の降雨が観測されたことを示す。また,図中の枠内に示す A,B,C の記号は後述するパターン A~C に対応している。

対象期間の全データについて Fig.4~Fig.6 と同様の解析を行い、異常点とその要因項目を分析した結果、エネルギー原単位異常のパターンは、主に以下の3パターンに分類できることがわかった。

パターン A: 早朝における 4 系への流入量急減に 起因するエネルギー原単位の上昇

パターン B:降雨後の流入下水希釈に起因するエネルギー原単位の低下

パターン C: プロセス異常に起因するエネルギー 原単位異常

以降では、各々のパターンの異常要因を考察する。

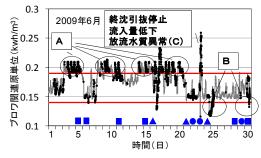
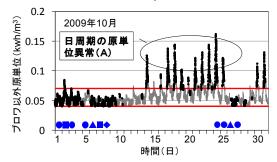


Fig. 4: Result of Fault Detection by Modified MSPC(June. 2009)



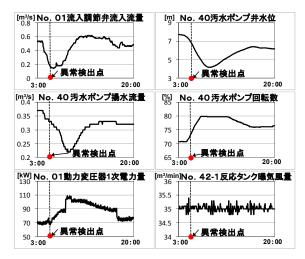
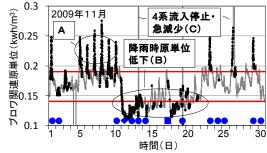


Fig. 5: Result of Fault Detection by Modified MSPC(Oct., 2009)



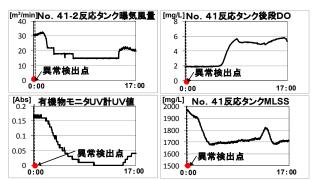


Fig. 6: Result of Fault Detection by Modified MSPC(Nov., 2009)

(2) エネルギー原単位異常に対する考察

① パターンA:この異常は、着水井後の流入量の急減に伴って日単位の周期で現れる。そのメカニズムは、Fig.7のとおりである(Fig.5 異常要因データ参照)。着水井後の流入量急減に伴い、ポンプ井水位が低下し揚程が高くなり、ポンプ駆動電力が上昇するが、4系への流入量は減少する。そのため、電力量/流入量で定義されるエネルギー原単位が急上昇する。ブロワ関連原単位は、曝気風量がほぼ一定のためブロワ動力は変化しないが4系への流入量が減少するため、上昇する。なお、この現象は、夜間の下水流入低下時に、最初沈殿池と着水井の間にある固定堰により対象系列への流入が遮られることが原因で生じていることが、対象下水処理場へのインタビューでわかった。

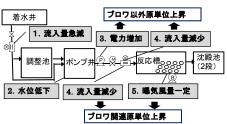


Fig. 7: Cause and Result for Periodical Low Energy Efficiency

② パターンB:これは、雨天時および雨天後に現れるエネルギー原単位が低下する異常であり、省エネルギー運用のための改善にはつながりにくいが、Fig.8 のメカニズムで生じると考えられる(Fig.6 の異常要因データ参照)。降雨により処理場の流入水が希釈されるが、流入量は最大処理量を維持するため、流入負荷が低下する。これに伴い、曝気風量を低減させるため、ブロワ関連エネルギー原単位は小さくなる。ブロワ以外エネルギー原単位は、ポンプ井の高水位が維持されるため揚水駆動電力がほぼ最小になるので、原単位も最小値付近を推移する。

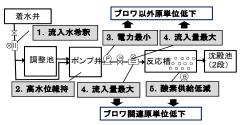


Fig. 8: Cause and Result for Rain-dependent Abnormal Energy Efficiency

③ パターンC:この異常は、何らかのプロセス異常やその対処の結果としてエネルギー原単位異常が引き起こされるものであり、そのメカニズムは原因となるプロセス異常に依存する。典型的なプロセス異常としては(A)最終沈殿池汚泥引抜停止、(B)着水井流入停止の2つのパターンが認められた。例えば、Fig.4 中に示した異常は、最終沈殿池の汚泥引抜量が停止し、それに伴い、着水井後の流入量を

絞ることによって原単位が上昇している。この際, 反応槽内のDO濃度の上昇や放流水質の悪化も同時 に観測されている。

4.3 運用改善案の可能性

これらの中でパターンAの日周期の異常については、 以下の2つの運用改善によってエネルギー原単位の低 減が可能であると考えられる。

- 可動堰や調整池を活用して汚水ポンプ井の水位を 高く保つ流入量制御の導入
- -流入量減少時に必要酸素量を適切に供給するため の DO 制御やブロワの起動台数制御などの導入

具体的な実現方法は別途検討する必要があるが、エネルギー原単位異常要因を発見し、そのメカニズムを解明することにより、このような運用改善の可能性を容易に例示できる。なお、検証期間中に DO 制御が導入されたが、酸素供給量は効果的に低減できたものの原単位低減は十分ではなく、ブロワの台数制御等を同時に検討することが必要であることがわかっている。

5. まとめ

本論文では,文献 1),2)の異常診断技術を活用して,下水処理場の省エネルギー運用のための改善点を発見できることを,実際の下水処理場のデータを用いて実証した。具体的には,エネルギー原単位に着目して,本異常診断技術を用いて要因分析を行うことで,エネルギー原単位異常が生じるメカニズムを明らかにできる例を示した。また,これにより,容易に運用改善の可能性を提示できること示し,本異常診断技術が運用改善点発見のツールとして利用できることを示した。

謝辞

本評価にあたりデータのご提供を頂きました関係各位に感謝の念を表します。

参考文献

- 1) 山中理:主成分分析と離散ウェーブレット変換を用いた下水処理 プロセスの異常診断, H17年電気学会 D部門大会予稿集, II-73-76, 2005.
- 2) 山中理: プロセスデータの相関を利用した異常診断技術の下水処理プロセスへの適用,環境システム計測制御学会誌,pp.41-44,, Vol.11, No.2/3, 2006.
- 3) 長岩他:プロセス監視情報を利用した異常診断技術の下水処理場 への適用事例,第 46 回下水道研究発表会講演集, II-8-1-6, pp.850-852, 2009.
- 4) 山中他:プロセス監視情報を利用した放流リン水質悪化診断,第 47回下水道研究発表会講演集(発表予定),2010.
- 5) C.Rosen: A Chemometric Approach to Process Monitoring and Control -with Application to Wastewater Treatment Operation, PhD.Thesis, IEA, Lund University, Lund, Sweden 2001.