

〈研究発表〉

遠隔監視システムによる制御性能改善技術の実証と有効性評価

難波 諒¹⁾, 平岡 由紀夫¹⁾, 橋本 敏一²⁾, 糸川 浩紀²⁾
井上 英男³⁾, 矢野 洋一郎⁴⁾, 板倉 舞⁵⁾

¹⁾ (株)東芝 (〒183-8511 東京都府中市東芝町1 E-mail:ryo.namba@toshiba.co.jp)

²⁾ 日本下水道事業団 (〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-27 E-mail:Hashimotot@jswa.go.jp)

³⁾ 福岡県 (〒812-8577 福岡県福岡市博多区東公園7-7 E-mail:inoue-h3900@pref.fukuoka.lg.jp)

⁴⁾ (公財)福岡県下水道管理センター

(〒812-0893 福岡県福岡市博多区那珂4-5-1 E-mail:y-yano@fukuoka-spc.or.jp)

⁵⁾ 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1 E-mail:itakura-m92ta@nilim.go.jp)

概要

B-DASH プロジェクト「ICTを活用したプロセス制御とリモート診断による効率的な水処理運転管理技術実証研究」の成果として、実証技術の中の要素技術の一つである制御性能改善技術を実証した結果を報告する。本技術は、下水処理場の運用データをもとにフィードバック制御の性能を改善する制御パラメータの推奨値を提示することで制御性能を向上させる技術である。実証研究の結果を通じて、本技術が制御性能の改善および消費電力低減効果の維持に有用であることを示す。

キーワード：B-DASH (Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology), ICT, 運転管理, PID 制御, パラメータ調整

原稿受付 2016.7.7

EICA: 21(2・3) 60-64

1. はじめに

上下水道施設の運用においては、地球温暖化の進展や人口減少に伴う自治体の財政状況の変化といった背景から、消費電力をより一層低減することが求められている。上下水道施設のプロセスの運用には、PID制御に代表されるフィードバック制御が多く用いられており、このフィードバック制御の性能が施設の消費電力に与える影響は少なくない。したがって、消費電力を低減するために、プロセスの変化に応じてPID制御の制御パラメータを調整し、制御性能を維持していくことは消費電力低減の観点から好ましいと考えられる。

しかしながら、一般的に化学反応や生物反応を対象とするプロセス制御では、制御パラメータの調整に必要なステップ応答を得るまでの時間が長くなる傾向にあり、調整に時間と手間がかかる。加えて、施設運用の現場では熟練技術者の減少といった課題にも直面しており、水処理および制御工学といった専門知識を要する制御パラメータの調整を高い頻度で実施することは容易ではなかった。このため、簡便かつ有効なPID制御パラメータ調整へのニーズは高く、近年では、監視制御システムで収集した運用データから直接PID制御パラメータの調整を可能とするVRFT (Virtual Reference Feedback Tuning)¹⁾ や FRIT (Ficti-

tious Reference Iterative Tuning)²⁾ が提案されており、いくつかの適用事例も報告されている^{3,4)}。Nambaらも水処理プロセスへの適用を目的として、水温や処理量といった日変動にあたる外乱信号を利用したFRITの改良技術を過去に提案し、シミュレーション評価している⁵⁾が、実プロセスによる評価はなされていなかった。

本報告は、過去にNambaらが提案した文献5)の技術を、国土交通省のB-DASHプロジェクト[†]の実証研究において評価した結果を報告するものである。「ICTを活用したプロセス制御とリモート診断による効率的な水処理運転管理技術」と題した本実証研究⁶⁾では、消費電力の低減を主な目的とした①NH₄-Nセンサを活用した曝気風量制御技術(以下、NH₄-N/DO制御⁷⁾)を下水処理施設の運用に適用すると共に、遠隔監視システムとして、その消費電力低減効果の維持を目的とした②制御性能改善技術と③多変量統計的プロセス監視技術を組合せた運転管理システムを提案し、実規模での実証を行なった。①NH₄-N/DO制御は消費電力を低減するために、NH₄-Nセンサの計測値に応じてDO制御の目標値を最適化する技術であり、②制御性能改善技術はNH₄-N/DO制御が利用

[†] Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project

する DO 制御の制御性能を改善・維持していくことで消費電力低減効果の維持を図る技術である。

2. 実証研究の概要

2.1 実証施設

実証を実施したのは、Fig. 1 に示す福岡県宝満川浄化センター内の標準活性汚泥法の水処理施設 2 系列 (I-1 系, I-2 系; 処理能力 2,700 m³/(日・系)) である。

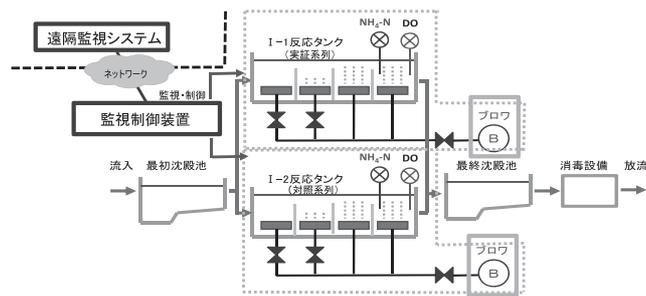


Fig. 1 Flow diagram of facilities for full-scale evaluation

各系列にブロワと水質センサを設置し、連続運転を行った。また、実証施設の運用データを監視制御装置経由で遠隔監視システムに伝送し、制御性能改善技術による制御パラメータ値の診断に使用した。算出された制御パラメータはメールで結果通知すると同時に実証施設の監視制御装置に表示できるように電気設備を構築した。

水処理施設の運転管理は、両系列共に流入流量 2,600 m³/日程度 (HRT8.5 h 程度), MLSS 2,000 mg/L 程度, 汚泥返送比 0.5 程度となるよう運用し、以降に示す試験においても本条件で試験を実施した。

2.2 実証技術

実証研究に適用した制御性能改善技術と NH₄-N/DO 制御の関係を Fig. 2 に示す。消費電力低減に直接

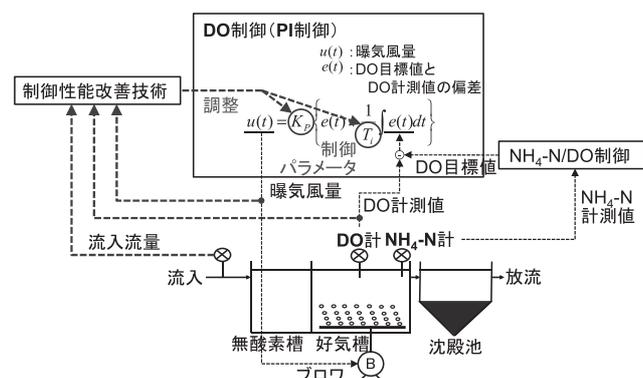


Fig. 2 Schematic diagram of the control parameter tuning technologies and NH₄-N/DO control evaluated in the B-DASH project

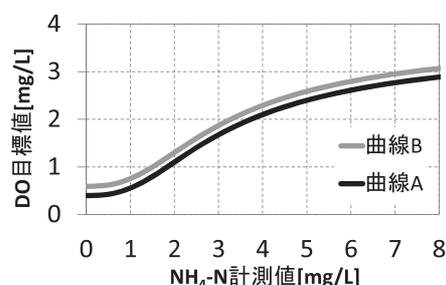


Fig. 3 DO reference curve applied to NH₄-N/DO control

寄与するのは NH₄-N/DO 制御が DO 制御の目標値を最適化することで得られる曝気風量低減効果であり、制御性能改善技術は DO 制御の制御パラメータを調整することで消費電力低減効果の維持に寄与している。以降、各技術の詳細について説明する。

(1) NH₄-N/DO 制御

NH₄-N/DO 制御は活性汚泥法の反応タンク下流側区画に設置する NH₄-N センサの計測値に基づき DO 目標値 (SV) を変化させる目標値可変の DO 制御である。このとき、Fig. 3 のような NH₄-N 計測値と DO 目標値の関係 (以降、制御目標曲線と呼ぶ) を利用する。Fig. 3 の制御目標曲線を変更することで、硝化機能の維持と消費電力低減のバランスを考慮した DO 目標値設定を実現でき、曝気風量の低減を重視した制御目標曲線を設定することで、DO 一定制御や送風量一定制御と比較して消費電力低減を図ることができる⁷⁾。

(2) 制御性能改善技術

NH₄-N/DO 制御で使用する DO 制御では、曝気風量を操作量 (MV), DO 計測値を制御量 (PV) とした PI 制御を利用している (Fig. 2)。制御パラメータが適切な値に調整されていないと DO 目標値と実際の DO 濃度の偏差 (以降、DO 偏差) が大きくなり、制御性能が劣化した場合、DO 濃度が NH₄-N/DO 制御が設定した DO 目標値に従わないため、消費電力の低減効果を維持できない場合がある。制御性能改善機能はこの PI 制御の制御パラメータを調整することで、DO 偏差を抑制し、消費電力低減効果の維持を図る技術である。

具体的には、反応タンク流入流量を測定可能な外乱として利用した外乱抑制型 FRIT⁴⁾をベースにした技術を使用している。FRIT は運用データ (DO 計測値, 曝気風量, 流入流量) から擬似参照信号を生成し、モデルマッチングの考え方で定式化した最適化問題を解くことで調整すべき制御パラメータを演算する⁵⁾。制御パラメータの推奨値はネットワークを通じて、監視制御装置に表示されるため、運転員は制御パラメータを確認し、DO 制御器へ制御パラメータを設定することで制御性能を改善できる。

3. 実証方法

第2章で述べたように、直接的な消費電力低減効果に寄与するのは、NH₄-N/DO 制御であり、制御性能改善技術は消費電力低減効果の維持に間接的に寄与する。今回の実証では、制御性能改善技術の消費電力低減を維持する効果を確認するため、以下の2段階の実証試験を実施した。

まず、評価を容易にするため、制御性能改善技術をNH₄-N/DO 制御と切り離して、目標値一定のDO 制御とし、制御性能改善技術がDO 偏差を抑制することを確認した。その後、NH₄-N/DO 制御と制御性能改善技術を組み合わせ、得られた消費電力低減効果とDO 偏差の抑制効果の関係を整理し、消費電力低減効果のうち、DO 偏差を抑制する効果に相当する消費電力低減効果を維持効果として確認した。以降では、各実証試験の詳細について説明する。

3.1 DO 偏差の抑制効果評価試験

DO 偏差を評価し易くするため、DO 一定制御とし、制御性能改善前後でDO 偏差が改善される効果の評価した。以下に試験内容と評価指標をまとめる。

(1) 試験内容

I-1 系にてDO 一定制御による運転を約2週間実施した。前半の1週間は制御性能が明らかに低下している期間とするため、DO 計測値の応答が約30分周期でハンチングするように制御パラメータを設定した。その後、前半1週間で収集した運用データによる制御性能改善技術で制御パラメータを調整し、後半1週間は運転した後、調整前後でDO 偏差を比較した。以上の試験をDO 目標値5.0, 2.5 mg/Lとして2ケース実施した。

(2) 評価指標

DO 制御の目的はDO 計測値をDO 目標値に追従させることであるため、式(1)、(2)に示すDO 偏差の最大値 e_{\max} 、平均2乗誤差 RMSE を評価指標とした。

$$e_{\max} = \max_T (|DO(t) - DO_{SV}(t)|) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (DO(t) - DO_{SV}(t))^2 dt} \quad (2)$$

ただし、DO : DO 計測値、DO_{SV} : DO 目標値、T : 評価期間。

3.2 消費電力低減の維持効果評価試験

先に述べたようにNH₄-N/DO 制御の消費電力低減効果はPI 制御の制御性能に影響される。制御性能改善技術の有用性を明確にする観点から、制御性能が低下した際のNH₄-N/DO 制御の消費電力低減効果と制

御性能を改善した後のNH₄-N/DO 制御の消費電力低減効果を比較することで、消費電力低減の維持効果を確認した。

(1) 試験内容

I-1 系にてNH₄-N/DO 制御による運転を約2週間実施した。前半1週間の運用データで制御パラメータを調整し、制御性能改善前後の消費電力低減効果を比較した。ただし、制御性能が低下したDO 偏差が大きい期間は、DO 計測値の許容下限を遵守する観点から、制御性能が良好な場合と比較して目標値を高めを設定することとした。具体的には、制御性能低下時はFig. 3に示すように制御目標曲線を曲線Aから曲線Bへ上方向にシフトした。シフト幅はDO 偏差の抑制効果評価試験の結果に基づいて決定した。

(2) 評価指標

また、曝気風量は運転時の流入負荷や水温に依存することから、異なる運転期間の結果を一様に取り扱うため、対照系列としてI-2系をDO 一定制御で運転した。試験期間内のI-1系の平均曝気風量および平均電力をI-2系の平均曝気風量および平均電力で除して正規化した相対風量および相対電力を評価指標とした⁶⁾。

4. 結果と考察

4.1 DO 偏差の抑制効果

Table 1に評価指標であるDO 偏差の最大値およびRMSEの値を示す。また、DO 目標値5.0 mg/LとしたケースのDO 計測値および曝気風量の制御パラメータ調整前後のトレンドをFig. 4に示す。

Table 1 Results of DO difference between set-point variables and measured variables around the time of control parameters tuning

	調整前 1/16~1/21	調整後 1/23~1/27	調整前 2/20~2/24	調整後 3/4~3/8
DO 目標値 [mg/L]	5.0		2.5	
比例ゲイン [-]	5.0	2.30	3.0	1.49
積分時間 [min]	5.0	6.90	5.0	17.15
DO 偏差 最大値[mg/L]	0.8	0.5	1.0	0.8
DO 偏差 RMSE[mg/L]	0.23	0.16	0.12	0.12

Fig. 4に示すとおり、DO 目標値5.0 mg/Lの場合、制御パラメータを調整することにより、DO 偏差が小さくなることが確認できた。Table 1に示すように、DO 偏差の最大値、RMSEともにそれぞれ0.8 → 0.5, 0.23 → 0.16 mg/Lと改善された。

一方、DO 目標値2.5 mg/Lでは、DO 偏差の最大値は1.0 → 0.8 mg/Lに改善されたものの、RMSEは

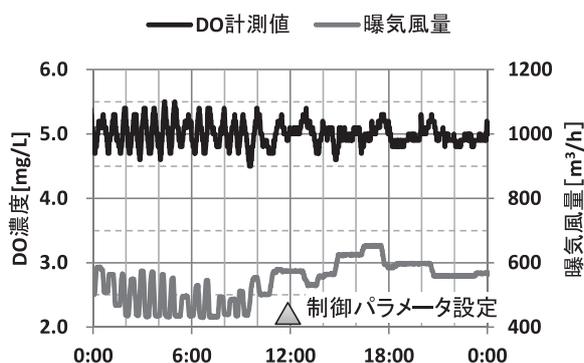


Fig. 4 Time series data of DO and airflow at tuning of control parameter

変化しなかった。これは対象プロセスの時間遅れといった特性が、動作点となる DO 値によって異なっているためと考えられる。以下にその理由を示す。

DO 目標値が 5.0 mg/L と高い場合、反応タンク内は十分に曝気されており、DO 目標値が 2.5 mg/L と比較してプロセスのゲインが大きいと考えられる。比例ゲインに関する PID 制御パラメータの調整則では、プロセスゲインと比例ゲインの積が特定の値に近づいたとき制御性能が向上すると考えられる⁸⁾。つまり、プロセスゲインが大きい場合は、比例ゲインに対する制御性能 (DO 偏差) の感度が高くなると考えられる。積分時間についても同様に考えることができ、DO 目標値が 5.0 mg/L の場合は制御パラメータに対する DO 偏差の感度が高いと考えられる。逆に、DO 目標値が 2.5 mg/L の場合は、制御パラメータに対する DO 偏差の感度が低くなっていると考えられ、そのため RMSE に変化がなかったと考えられる。以上から、DO 偏差の感度は動作点となる DO 値によって異なるが、DO 偏差の最大値は制御性能改善技術によって 0.2~0.3 mg/L 改善されることを確認できた。

また、DO 目標値 2.5 mg/L の場合、RMSE に変化はなかったが、トレンドを確認すると Fig. 5 に示すとおりに制御パラメータ調整後は、操作量である曝気風量の変化を抑制することができている。一般に操作量が短い周期で振動する場合は、操作する機器の性能劣化をもたらすと言われており、制御性能改善技術は消費電力低減だけでなく機器保護の観点からも有効であると考えられる。

4.2 消費電力低減の維持効果

4.1 節の結果から DO 偏差の最大値が 0.2~0.3 mg/L 改善されたため、Fig. 3 の制御目標曲線を 0.3 mg/L 上方向にシフトし、試験を実施した。Table 2 に評価指標である正規化した相対風量および相対電力を示す。

調整前後で相対風量および相対電力がそれぞれ約

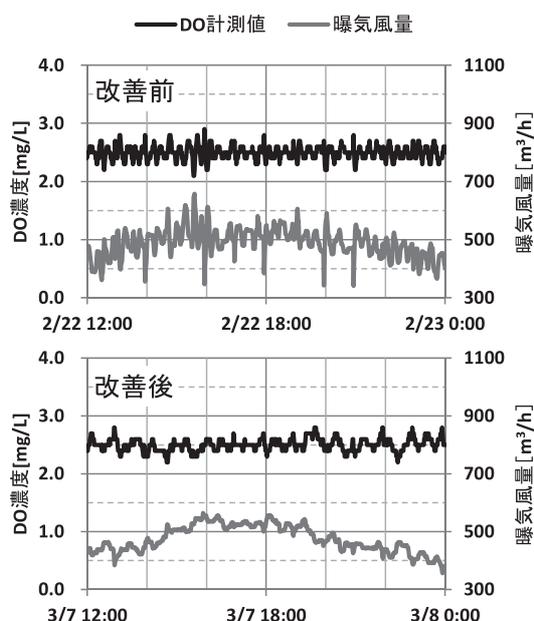


Fig. 5 Time series data of DO and airflow (top: before tuning, bottom: after tuning)

Table 2 Average airflow and power by evaluation test

	相対風量	相対電力
調整前 2/5~2/11	1.187	1.143
調整後 2/12~2/18	1.170	1.131
改善率	1.43%	1.08%

1.4%, 1.1% 改善されており、制御性能の低下が NH₄-N/DO 制御の DO 目標値を引き上げることになった場合、省電力低減効果が低下すること、つまり、制御性能の継続的な改善が消費電力低減効果の維持に有用であることを確認できた。文献 6) において、直接的な消費電力低減を図る NH₄-N/DO 制御の曝気風量低減効果が約 10.3% であったことと比較しても、制御性能改善技術による消費電力低減の維持効果は小さくなく、制御性能改善技術により制御パラメータを調整し、制御性能を改善・維持していくことは有用であると考えられる。

5. ま と め

運用データから直接 PID 制御パラメータの調整を可能とする制御性能改善技術の有用性を下水処理プロセスで実証した。実証試験の結果、PID 制御をベースにした技術の消費電力低減を維持する上で制御性能改善技術が有用であることを示した。

謝辞

本研究は、国土交通省国土技術政策総合研究所の委託により、(株)東芝・日本下水道事業団・福岡県・(公)福岡県下水道管理センターによる共同研究体にて実施

した。

参考文献

- 1) M. C. Campi, A. Lecchini and S. M. Savaresi : Virtual reference feedback tuning : a direct method for the design of feedback controllers, *Automatica*, Vol. 38, No. 8, pp. 1337-1346 (2002)
- 2) 相馬将太郎, 金子 修, 藤井隆雄 : 一回の実験データに基づく制御器パラメータチューニングの新しいアプローチ—Fictitious Reference Iterative Tuning の提案, システム制御情報学会論文誌, Vol. 17, No. 2, pp. 528-536 (2004)
- 3) 加納 学 : プロセス産業における操業データ活用の実例, 電気学会論文誌. C, Vol. 131, No. 4, pp. 710-717 (2011)
- 4) 加納 学, 増田士朗, 小河守正, 滝波明敏, 吉井清次, 大寶茂樹 : 化学プロセス産業における E-FRIT の展開, 計測と制御, Vol. 52, No. 10, pp. 898-903 (2013)
- 5) R. Namba, O. Yamanaka, K. Yokokawa and T. Sugino : A Fictitious Reference Iterative tuning for disturbance attenuation based on disturbance feed-forward and PID control, *Proc. of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems* (2014)
- 6) 小原卓巳ほか : ICT を活用した革新的な水処理運転管理技術の実証, 下水道研究発表会講演集, Vol. 52, pp. 1105-1107 (2015)
- 7) 山中 理, 小原卓巳, 川本直樹, 山本浩嗣, 萩原大揮, 江口義樹 : 風量削減と窒素除去の両立を図る曝気風量制御の実プロセスへの適用, 環境システム計測制御学会誌, Vol. 18, No. 2/3, pp. 14-22 (2013)
- 8) 須田信英 : PID 制御, 9/38, 朝倉書店 (1992)