

〈特集〉

「ICT を活用した効率的な硝化運転制御技術」の導入手法について

西田 佳記¹⁾, 山野井 一郎¹⁾, 武本 剛¹⁾, 中村 信幸¹⁾
片倉 洋一²⁾, 辻井 優樹³⁾, 塚原 晋吾³⁾, 道中 敦子⁴⁾

¹⁾ (株)日立製作所

(〒 319-1292 茨城県日立市大みか町 7-1-1 E-mail: yoshinori.nishida.js@hitachi.com)

²⁾ 茨城県土木部都市局

(〒 310-8555 茨城県水戸市笠原町 978 番 6 E-mail: gesui3@pref.ibaraki.lg.jp)

³⁾ 茨城県流域下水道事務所

(〒 300-0032 茨城県土浦市湖北 2 丁目 8 番 1 号 E-mail: ryuge_kasumi@pref.ibaraki.lg.jp)

⁴⁾ 国土交通省 国土技術政策総合研究所

(〒 305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地 E-mail: michinaka-a92ta@nilim.go.jp)

概要

平成 26, 27 年度 B-DASH プロジェクトにおいて, アンモニア計を活用し, 処理水水質の安定化と省エネルギーを両立する硝化制御システムを実証した。本実証の成果を踏まえ, 自治体向け技術導入ガイドライン(案)が国土技術政策総合研究所より平成 28 年 12 月に発刊された。本報ではガイドライン(案)に基づき, 技術の概要や導入検討・設計・維持管理手法についてまとめる。

キーワード: 硝化制御, 省エネ, ICT, アンモニア計, 技術導入ガイドライン(案)

原稿受付 2017. 4. 26

EICA: 22(1) 26-30

1. はじめに

下水道事業における省エネ, 水質管理などの課題解決のため, 国土交通省では「下水道革新的技術実証事業(B-DASH プロジェクト)」を推進している。平成 26, 27 年度 B-DASH プロジェクト「ICT を活用した効率的な硝化運転制御の実用化に関する技術実証研究」において, 茨城県と日立製作所は $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーを用いた硝化制御技術(以下, 開発制御)を実証した¹⁾。また, 実証成果を踏まえ, 自治体向け技術導入ガイドライン(案)(以下, ガイドライン(案))²⁾が国土技術政策総合研究所より平成 28 年 12 月に発刊された。本報では, ガイドライン(案)を基に, 開発制御の概要, および導入手法について概説する。詳細についてはガイドライン(案)²⁾を参照されたい。

2. 硝化運転制御技術の概要

2.1 技術の目的

開発制御では, 下水中のアンモニア性窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)の除去(以下, 硝化)に係る制御において, 処理水質($\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度)の安定化, 風量削減に伴う消費電力の低減, 維持管理業務の軽減を実現することを目的としている。

2.2 技術実証の概要及び特徴

開発制御の概要を Fig. 1 に示す。開発制御では, 好気タンクの上流(標準活性汚泥法(以下, 標準法)の場合, 最上流の好気タンク)に設置した第 1 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサー, および好気タンク中間地点に設置した第 2 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーを用いた風量制御機能, 処理特性見える化機能, 風量演算モデル(処理特性モデル)の自動更新機能を実装する。以下, 各機能について説明する。

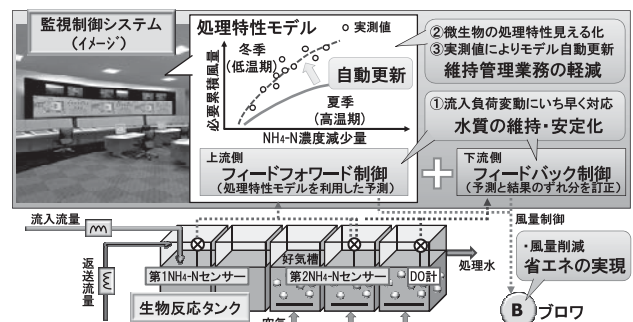


Fig. 1 The schematic diagram of the developed technology

(1) 2 台の $\text{NH}_4\text{-N}$ センサーを用いた風量制御機能

風量制御機能は, 好気タンクへの流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度(第 1 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサー計測値)から必要な風量を予測するフィードフォワード (FF: Feed Forward) 制御, 第 2 $\text{NH}_4\text{-N}$ センサー設置位置での $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の予測値

と実測値とのずれを是正するフィードバック (FB: Feedback) 制御の考え方をを用いる。FF 制御では、風量演算モデルとして処理特性モデルを用い、所望の NH₄-N 濃度減少量に対する必要な風量を演算する。開発制御では、流入変動にいち早く対応する FF 制御、制御精度を確保する FB 制御の組み合わせにより、水質の維持・安定化、過剰曝気の抑制を図る。

(2) 処理特性の見える化機能

開発制御では、第 1NH₄-N センサーから第 2NH₄-N センサーまでの NH₄-N 濃度減少量と、その処理に要した累積風量の実績値を処理特性としてプロットしていく。その実績値から近似式として処理特性モデルを導出する。処理特性の変動を追跡していくことで、活性汚泥の性状変化や処理異常の傾向を早期に発見できる。

(3) 風量演算モデル (処理特性モデル) の自動更新機能

例えば DO 一定制御の場合、冬期には DO 設定値を高くするなど、管理者の知見・ノウハウに基づき手動で制御設定値を調整する場合があった。これに対し、開発制御では、直近の運転実績から処理特性モデルを自動的に更新していくため、最新の処理特性を風量演算に反映でき、必要風量の演算精度を自動的に維持できる。これにより、制御設定値の調整を効率化し、維持管理業務を軽減できる。

2.3 複数系列への適用方法、システム適用範囲

開発制御を複数の処理系列、処理池に適用する場合、導入コスト低減のため、系列の処理を代表する一つの池 (以下、代表池) のみに NH₄-N センサーを設置し、NH₄-N センサー計測値により風量を制御する。同一系列もしくは他系列の池 (以下、展開池) では、代表池の制御結果 (DO 濃度) の補正值に基づき、風量を制御する。これにより、最低限の NH₄-N センサーの設置で、複数系列・池を制御できる。

開発制御では、代表池とそれに付随する展開池を一つの制御システムの適用範囲とする。適用範囲に含まれる展開池は、代表池と同一の躯体構造仕様、処理方式であり、流入条件や運転条件が代表池と同様に調整

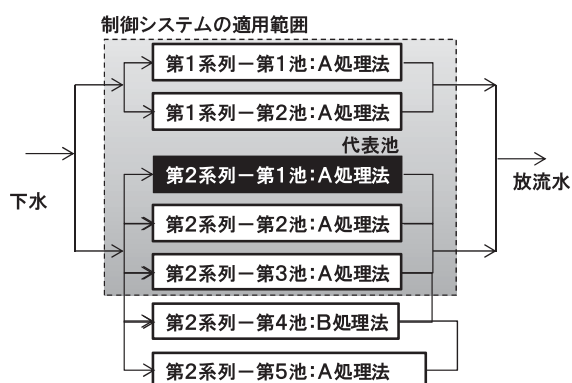


Fig. 2 The example of selection of control units

されている池とする。適用範囲の選定例を Fig. 2 に示す。この例では、適用範囲を A 処理法で処理する第 1 系列および第 2 系列の合計 2 系列 5 池までとする。処理法が異なる第 2 系列第 4 池、同じ処理法でも躯体構造が異なる第 2 系列第 5 池の 2 つの池に開発制御を適用する場合は、それぞれシステムを導入する必要がある。

2.4 技術実証の評価結果

実証研究では、処理水質 (NH₄-N 濃度)、風量削減効果、消費電力量、温室効果ガス排出量、コストの 5 つの評価項目を設定し、実証実験及びケーススタディにて評価した。評価結果を Table 1 にまとめており、目標を全て満足する結果が得られた。以下に、実証研究、ケーススタディの内容及び評価結果の概略をまとめる。

Table 1 Summary of the results in the B-DASH project

評価項目	目標	成果	備考
処理水水質 (NH ₄ -N 濃度)	平均濃度 ≤1.0 mg-N/L	○: 平均 0.33 mg-N/L (合計 98 日間の運転結果)	—
風量削減効果	風量削減率 ≥10%	○: 風量 16.9% 減 (合計 98 日間の運転結果)	従来 DO 一定制御比 (目標値 2.0 mg/L)
経費回収年 (ケーススタディ)	経費回収年 ≤5.1 年	○: 経費回収年: 3.1 年	【導入先処理場の既存設備・制御】 ・処理方式: 標準活性汚泥法 ・処理規模: 50,000 m ³ /d ・風量制御: DO 一定制御 【導入タイミング】 ・監視制御システムの新設・更新時

(1) 実証実験による評価

実証実験では、処理水質 (NH₄-N 濃度)、風量削減率を評価した。実証実験は、茨城県流域下水道事務所霞ヶ浦浄化センターの凝集剤併用型循環式硝化脱窒法 (以下、循環法) の 2 系列で実施し、うち 1 系列には開発制御を適用し、もう一つの系列 (従来 DO 一定制御) での運転結果と比較した。その結果、開発制御適用により、合計 98 日間の運転で、平均処理水 NH₄-N 濃度を 0.33 mg-N/L (目標 1.0 mg-N/L 以下) に維持しつつ、風量を 16.9% 削減した (目標 10% 以上)。

(2) ケーススタディによる評価

ケーススタディでは、全 18 ケースの仮想処理場を設定し、開発制御による導入効果を試算した。本報では、計画汚水量 50,000 m³/日、標準法、DO 一定制御の処理場に適用するケースでの評価結果を Table 2 に示す。風量削減率は、実証結果より 16.9% とした。消費電力量および CO₂ 排出量は 13.2% 削減でき、電力費を年間 739 万円低減できる見込みを得た。また、

導入タイミングとして、監視制御システムの新設・更新工事に合わせて導入する場合（ケース①）と、既存設備を改造して導入する場合（ケース②）で試算した結果、ケース①では建設費の一部を監視制御システムの新設・更新工事と共通化でき、ケース②に比べて経費回収年を短縮できた。

Table 2 Results of the case-study of B-DASH project

項目	DO一定	開発制御	削減効果
風量 (m ³ /d)	405,000	337,000	16.9% 減
消費電力量 (kWh/d)	10,200	8,850	12.9% 減
CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /d)	7,180	6,250	
電力費 (百万円/年)	55.8	48.5	年間 739 万円低減
経費回収年	ケース① (新設・更新)	—	3.07
	ケース② (改造)	—	9.22

3. 硝化制御技術の導入検討

3.1 導入検討手法フロー

詳細設計に先立ち、既存設備や運転状況、更新計画に応じた導入効果を試算する。導入検討は、処理場の状況に応じた風量削減率の試算方法の検討、実態調査、導入効果の試算、導入判断の順に実施する。

3.2 風量削減率の試算方法の検討

開発制御の導入にあたり、処理プロセスや運転方針の変更の有無、流入・運転条件に応じて試算方法を選択する。本報では、NH₄-N 処理に関する実態調査結果に基づく方法を例として、導入検討手順を概説する。

3.3 実態調査

実態調査では、開発制御の適用範囲の確認、NH₄-N センサーを設置する代表池の選定、現行での処理状況の把握を行う。処理状況の把握では、特に NH₄-N に関して処理の過不足が無いか確認する。

3.4 導入効果の試算

(1) 導入効果試算の概略

実態調査結果を基に、開発制御導入により期待される風量削減率、電力削減量、温室効果ガス削減量に加え、導入に係るコスト（建設費・維持管理費・電力削減費・経費回収年）を試算する。

(2) 風量削減率の試算方法

風量削減率の試算方法の概念図を Fig. 3 に示す。まず、実態調査における好気タンクでの NH₄-N 濃度推移から、処理水 NH₄-N 目標値との交点を求める。この交点以降の曝気は過剰であり、風量削減の余地があるとす。この交点は硝化目標達成位置と定義され、

好気タンク全長のうち交点以降の好気タンクの長さの割合で表される（ここでは 36%）。風量削減率は、実証研究により構築した試算式（式(1)）に硝化目標達成位置を入力して算出する。

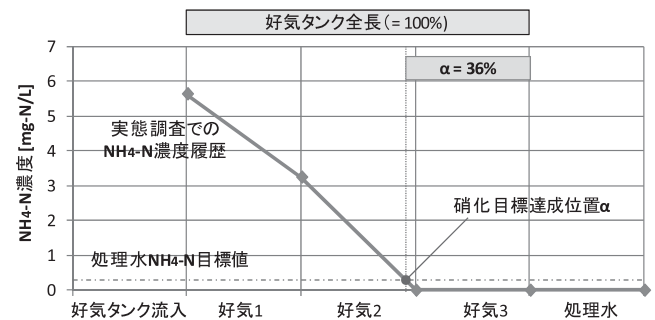


Fig. 3 Evaluation of over-blowing based on NH₄-N treatment

$$\text{風量削減率} = 0.51 \times \text{硝化目標達成位置} \quad (1)$$

(3) 消費電力量・温室効果ガス排出量の試算方法

(2)における風量削減率の試算値から、ブロー電力原単位（単位風量当たりの消費電力量）、もしくはブロー性能曲線（風量と軸動力の関係）を用いて、電力削減量を試算する。さらに、電力由来の CO₂ 排出原単位（ガイドラインでは 0.579 kg-CO₂/kWh³⁾）を用い、電力削減量から温室効果ガス削減量を算出する。

(4) コスト試算方法

建設費・維持管理費は、導入ケース、導入システム数に応じて算出する。監視制御システムの新設・更新時（ケース①）、既存設備を改造して導入する場合（ケース②）での建設費・維持管理費を式(2)～(4)に示す。式(2)～(4)に記載の費用はあくまで参考値であり、導入検討時は対象処理場の状況に応じて設定する。電力削減費は、(3)で算出した電力削減量に電力単価（ガイドラインでは、15 円/kWh）を乗じて算出する。そして、式(5)に基づき経費回収年を算出し、導入可否を判断する。

$$\begin{aligned} \text{設費費(ケース①)} &= \text{導入システム数} \\ &\quad \times 1850 \text{ 万円} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{建設費(ケース②)} &= \text{導入システム数} \\ &\quad \times 1850 \text{ 万円} + 2700 \text{ 万円} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{維持管理費} = \text{導入システム数} \times 137 \text{ 万円} \quad (4)$$

$$\text{経費回収年} = \text{建設費} / (\text{電力削減費} - \text{維持管理費}) \quad (5)$$

3.5 導入効果の検討例

(1) 試算条件

本節ではモデルケースでの試算結果を示し、導入検討方法についてまとめる。Table 3 にモデルケースと

して設定した仮想処理場の条件を示す。導入タイミングとして2つのケースを検討する。

Table 3 Virtual wastewater treatment plant conditions

項目	施設条件
処理方式	標準活性汚泥法
処理規模	50,000 m ³ /日 (日最大), 40,000 m ³ /日 (日平均)
系列数	2系列, 計8池 (処理方式・躯体構造: 同一, 流入・運転条件: 同様)
ブロウ仕様	鋳鉄製多段ターボブロウ, 2台
風量調節機構, 制御方式	インレットバーン制御・台数制御, DO一定制御方式
電力原単位	0.025 kWh/m ³
処理プロセス変更	なし
処理水 NH ₄ -N 目標値	0.25 mg-N/L で, 変更なし
導入目的	処理水 NH ₄ -N 目標値を超過することなく, 送風量を削減
検討中の導入タイミング	ケース①: 監視制御システムの更新に併せて導入 ケース②: 既存の監視制御システムを改造して導入
導入判断の目安	経費回収年 6年以内
実態調査結果	硝化目標達成位置: 36%

(2) 試算結果

実態調査の結果を **Table 4** に示す。経費回収年を見ると, ケース①では目安の6年を下回る 2.07年となっており, 監視制御システムの更新時に本技術を導入することとし, 具体的な計画・設計に移行する。

Table 4 Introduction effects of the developed system

項目	試算結果		備考
	ケース① (監視制御:更新)	ケース② (監視制御:改造)	
風量削減率	18.4%	18.4%	—
電力削減量	1,880 kWh/日	1,880 kWh/日	—
温室効果ガス削減量	1,090 kgCO ₂ /日	1,090 kgCO ₂ /日	—
建設費	1850万円/年	5550万円/年	導入システム数:1
維持管理費	137万円/年	137万円/年	導入システム数:1
電力削減費	1030万円/年	1030万円/年	—
経費回収年	2.07年	6.22年	—

4. 硝化制御技術の維持管理手法

4.1 NH₄-N センサーの設置および維持管理方法

NH₄-N センサーの設置例を **Fig. 4** に示す。第1NH₄-N センサーは, 好気タンク流入前, もしくは流入時点の NH₄-N 濃度を計測できるように, 標準法や AO 法では最上流の好気タンクもしくは嫌気タンク, 循環法や A2O 法では硝化液が循環する無酸素タンクに設置する。第2NH₄-N センサーは, ある程度硝化が進んだ好気タンク中間地点に設置する。NH₄-N センサーの維持管理については, 電極の洗浄や校正を月1回実施するなど, 使用するセンサーのメーカ推奨方

法に従う。

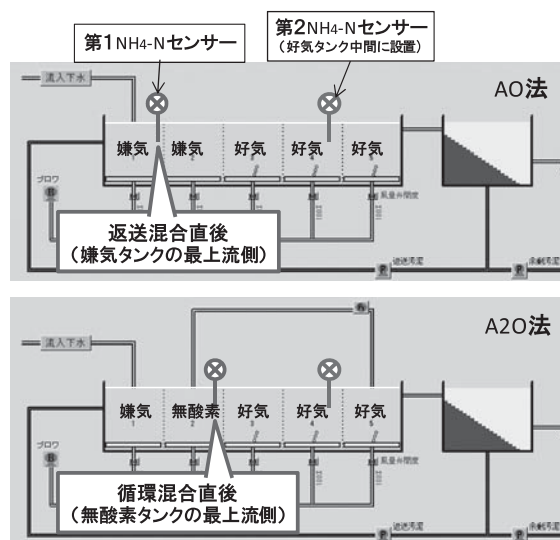


Fig. 4 Examples of the NH₄⁺-N sensor installation

4.2 制御システムの運転管理

開発制御では, 処理特性モデルを用いて, 処理特性の見える化を図っている。例として, 流入停止時の処理特性モデルを **Fig. 5** に示す。流入停止時に異常なプロットがあるのが分かる。このように, プロット値や処理特性モデルの傾向変化を追跡することで, 運転異常等の傾向を早期に発見でき, センサー点検や制御パラメータの調整など対応を取ることができる。

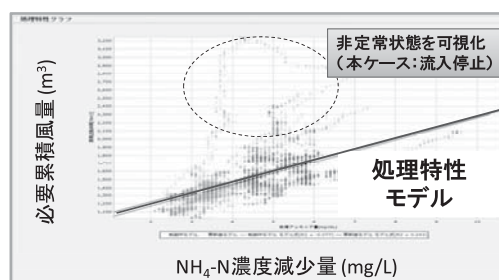


Fig. 5 Example of treatment model in the unusual condition

5. 普及展開に向けて

5.1 適用が効果的な条件

開発制御の適用が効果的な条件 (推奨条件) を **Table 5** に示す。例えば, 過剰曝気の時間帯がある処理場に適用することで, 硝化を適正化でき, 風量削減・消費電力低減が期待できる。

5.2 導入シナリオ例

開発制御の導入シナリオ例を **Table 6** に示す。先

Table 5 Effective conditions for this system introduction

項目	推奨条件
流入	・流入水質（負荷）の変動が大きい
ブロワ	・風量削減時に運転台数の低減が見込まれる
現状の運用	・DO 制御が安定して運用されている ・過剰曝気の時間帯がある ・処理特性の季節変化が大きく、制御設定値を頻繁に調整している
計装設備	・開発制御に必要な各計測器が設置済み
処理場設備	・同一の方式、躯体構造で、同様な流入・運転条件の系列が多い（複数系列制御方式の適用範囲を拡大可）

述のとおり、監視制御システム更新時に導入することで、工事費の一部を共通化でき、導入コストを低減できる。また、処理水目標値変更時や系列の増設・廃止時など流入・運転条件の変更時は、処理特性モデルの自動更新機能により、効率的に運転管理手法を構築できる。

Table 6 Effective cases for this system introduction

導入タイミング	具体例	期待される効果
既存設備の更新・変更時	・監視制御システムの新設・更新時	・導入コスト低減
	・ブロワの更新時	・運用コスト低減
処理水 NH ₄ -N 目標値変更時	・散気装置の更新時 ・下水処理施設の変更時（系列の増設・廃止など）	・新規運転管理手法を効率的に構築
	・処理プロセスの変更時（段階的高度処理化など） ・能動的管理（季節別運転）適用時	

6. おわりに

B-DASH プロジェクトにて実証した硝化制御技術は、所望する水質を満足しつつ、消費電力低減を実現する技術であり、さらには運転管理の効率化を図っている。省エネ推進に加え、能動的栄養塩管理や準高度処理など、近年の多様な運転管理手法の実現に貢献できるように、本技術の普及展開を進めていく所存であります。

参考文献

- 1) 西田佳記ほか：アンモニア計を活用した効率的な硝化制御システムの長期実証，環境システム計測制御学会誌，Vol. 21, No. 2/3, pp. 51-55 (2016)
- 2) 国土技術政策総合研究所ホームページ (2017/4/7 アクセス)
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoku/tnn/tnn0938.htm>
- 3) 環境省地球環境局地球温暖化対策課：平成 26 年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について (2014)