

経済産業大臣賞

「二点 DO 制御を用いた省エネ型 OD 装置」

前澤工業株式会社／国立大学法人 高知大学／日本下水道事業団

1. 装置の詳細説明

1. 1 はじめに

近年、我が国の下水道事業では、人口減少による流入水量の減少やこれに伴う使用料収入の減少、老朽化施設の増大に伴う改築更新費用の増加、熟練技術者の減少に伴う維持管理の脆弱化、消費電力量や温室効果ガス排出量の削減に対する社会的要請の高まりなど、様々な課題を抱えており、持続可能な下水道経営を実現するための方策の一つとして、水処理施設の運転の効率化が求められている。

二点 DO 制御を用いた省エネ型 OD 装置（以下、「本装置」という。）は、我が国の小規模下水処理場（処理能力 10,000 m³/日未満）で最も多く採用されているオキシデーションディッチ法（以下、「OD 法」という）を対象とした技術であり、安定した処理水質と省エネルギー・省コストを同時に実現する装置である。また、本装置は、水温や水質等の流入条件によっては、従来の OD 法よりも高負荷条件、すなわち、処理時間を短縮することが可能であり、既存施設を活用した処理能力増強も可能とする装置である。

1. 2 本装置の構成

本装置は、図 1 に示すとおり、縦軸水流発生装置、散気装置、溶存酸素計（以下、「DO 計」という）、送風機、並びに、本装置の特徴である「二点 DO 制御」を実装したコントロールユニットから構成される。

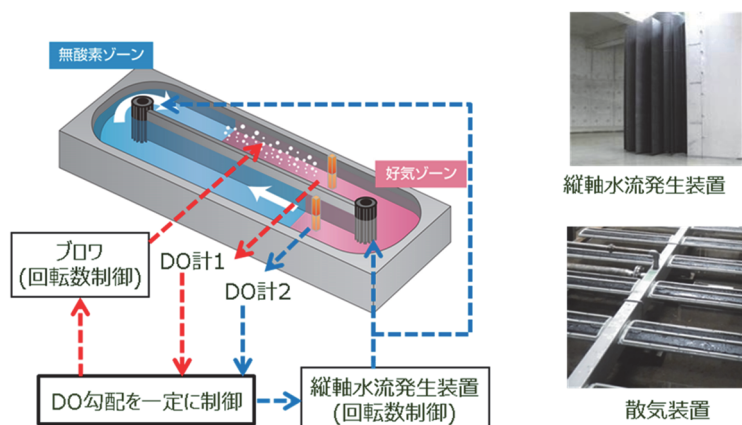


図 1 本装置の概略フロー（左）と主要構成機器（右）

1. 3 本装置の特徴及び原理

OD 法は、無終端水路の反応タンクにおいて、主に機械式エアレーション装置を用いて、汚水を循環させながら曝気・攪拌を行う下水処理方式である。OD 法は、他の下水処理方式と比べて、低い負荷条件で処理を行うのが特徴であり、水理学的滞留時間（HRT）は 24～36 時間を標準としている。また、OD 法は、反応タンク内の活性汚泥浮遊物質（MLSS）濃度が高く、固形物滞留時間（SRT）が長いことから、硝化反応が進行する。そこで、従来の OD 法では、一般的にタイマー制御を基本とする間欠曝気運転を行うことで反応タンク内に時間的に好気状態と無酸素状態を交互に形成させ、硝化に伴う pH 低下を防ぎ、処理の安定化を図っている。そのため、流入負荷量の変動に対して、エアレーション装置の運転を柔軟に追従させることが難しく、省エネルギー化を図ることが困難であった。

本装置の特徴である「二点 DO 制御」は、図 1 に示すとおり、反応タンク内に設置した 2 箇所の DO 計の値を用いて、当該 2 点間の溶存酸素（DO）濃度の勾配が一定となるよう、曝気風量（送風機の回転数）と循環流速（縦軸水流発生装置の回転数）を独立して自動制御を行う。これにより、流入負荷変動とこれに伴う活性汚泥の酸素消費速度の変動によらず、反応タンク内に空間的に好気状態と無酸素状態を安定して形成させることが可能となり、連続曝気の条件下でも安定した処理が可能になるとともに、流入負荷量に応じた酸素供給が行われることにより、省エネルギー化も可能となる。

流入負荷量が増大した高負荷時の場合を例に二点 DO 制御の概念図を図 2 に示す。

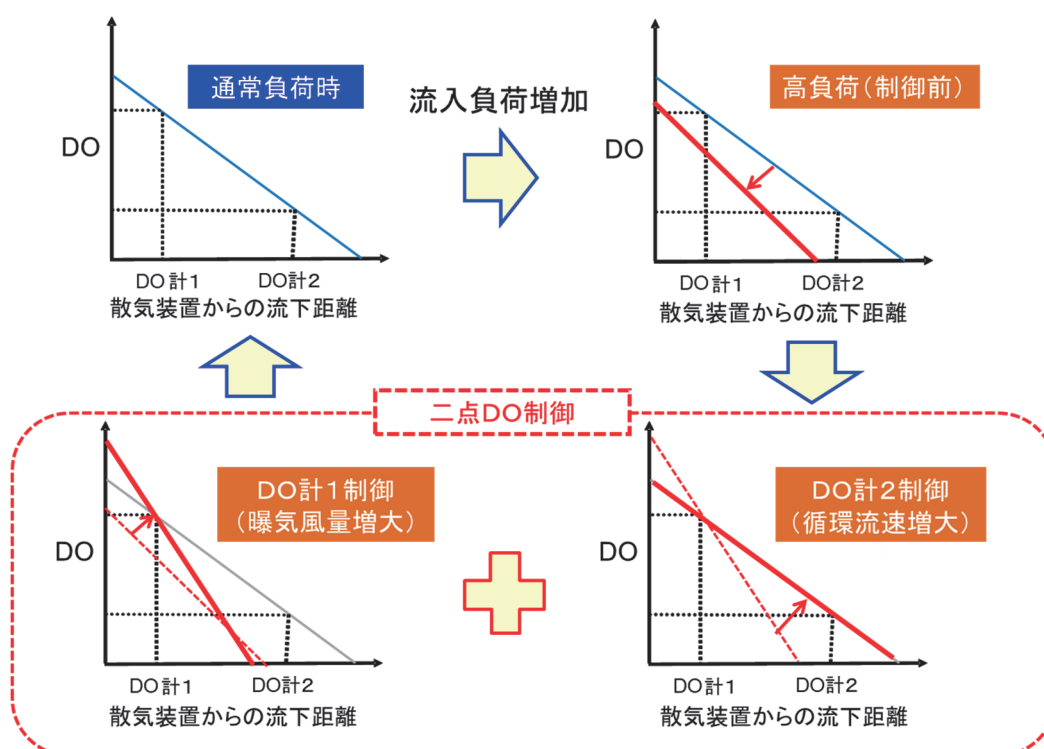


図 2 二点 DO 制御（高負荷時の場合）の概念図

流入負荷変動により、反応タンク内の酸素消費速度が変化し、D0 計を設置した二点間の D0 濃度の勾配は、通常時と比較して、高負荷時には急に、低負荷時には緩くなる。また、散気装置の下流に設置した D0 計 1 の値は、高負荷時には低く、低負荷時には高くなる。二点 D0 制御では、図 2 に示すとおり、D0 計 1 の値により、当該地点の D0 濃度を一定に保つよう、曝気風量を制御する。さらに、好気ゾーン末端に設置した D0 計 2 の値により、当該地点の D0 濃度を一定に保つよう、循環流速を制御する。これらの制御を独立して自動で行うことにより、流入負荷変動に対して二点間の D0 濃度の勾配を一定に保つことで、好気ゾーンと無酸素ゾーンの比率（1:1 を基本とする）を一定に保ち、安定した処理を可能としている。

本装置では、縦軸水流発生装置と散気装置、蛍光式 D0 計を用いることにより、実規模の OD 法の反応タンクにおける二点 D0 制御を可能とした。

1. 4 本装置の構成機器

本装置の主要構成機器の名称及び形式・仕様等を表 1 に示す。

表 1 本装置の主要構成機器

機器名称	形式・仕様等
縦軸水流発生装置	縦軸型攪拌機（付属品：バッフルプレート）
散気装置	メンブレン式（ゴム製またはシリコン製）
D0 計	蛍光式（付属品：変換器、洗浄用空気圧縮機）
送風機	
コントロールユニット	

（1）縦軸水流発生装置

縦軸水流発生装置の構造を図 3 に示す。縦軸水流発生装置は、反応タンク内のコーナ一部に設置し、周波数制御により回転数を変化させることで、循環流量を制御する。

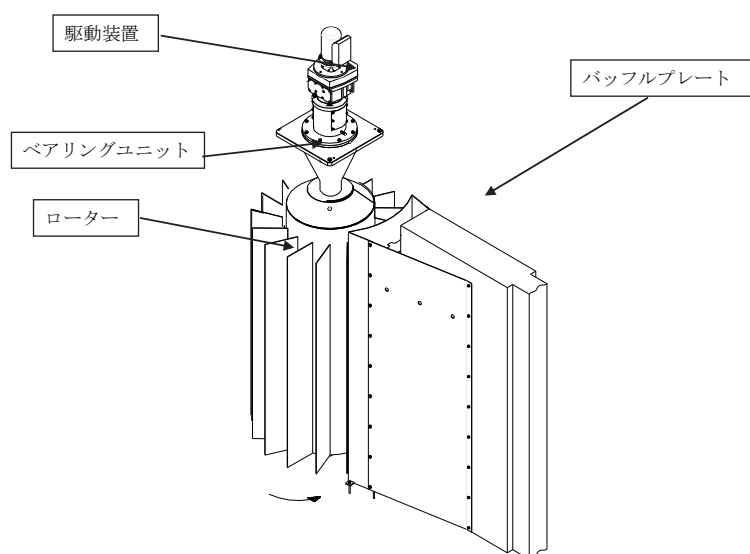


図 3 縦軸水流発生装置の構造

攪拌羽根は流れ方向に鉛直の平羽根で、水深方向の断面形状が同一のため、水面を表面曝気する一般的な機械式エアレーション装置と比較して、極めて水位変動に強い構造となっている。また、損失抵抗の大きいコーナー部に設置することで消費エネルギーの軽減を目指しているほか、水中に移動部品が無くメンテナンスが容易である。

(2) 散気装置

散気装置の参考図を図4に示す。散気装置には、酸素移動効率が良いメンブレン散気装置を用いる。送風機の運転は連続運転を基本とするが、低負荷時等には間欠運転を行うことがあるため、散気装置は目詰まりの生じない材質を選定する必要がある。そのため、セラミック製及び樹脂製の散気装置は、目詰まりの問題から間欠運転には不向きである。そこで、本装置では、材質は合成ゴム製またはシリコン製の低圧損で圧損上昇予防装置が不要なメンブレン散気装置を基本とする。

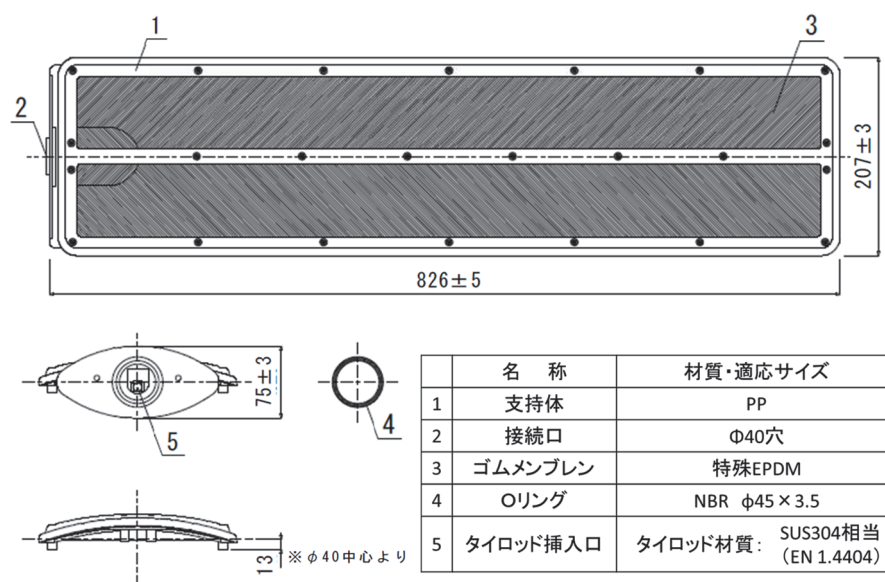


図4 散気装置（参考図）

(3) 送風機

送風機は、反応タンク内に設置した散気装置へ酸素供給を行うものである。送風機は、送風量及び送気圧に応じて選定する。

(4) D0 計

D0 計は、反応タンク内の D0 濃度を測定する装置で、散気装置の下流と好気ゾーンの末端の2ヶ所に設置する。本装置では、電解液や隔膜の交換が不要で、保守の必要がほとんどなく、測定毎に光学的なゼロ点補正を行うため、長期間にわたり安定した測定が可能であることから、蛍光式 D0 計を用いる。

(5) コントロールユニット

コントロールユニットは、プログラマブルコントローラ、タッチパネル等からなる箱型の装置で、反応タンク内の2箇所に設置された D0 計が設定値になるように PID 制御(二点 D0 制御)を行うものである。

2. 開発経緯

2. 1 開発の趣旨及び目標

OD 法は、下水中の有機物の除去に加えて、高度な窒素除去が可能であることや、標準活性汚泥法などと比較して維持管理が容易で、負荷変動にも強いことから、中小規模の下水処理場に適した下水処理方式として広く普及している。2017（平成 29）年度末現在、OD 法（高度処理 OD 法を含む）は、全国の下水処理場の約半数（2,145 箇所中 1,038 箇所）で採用されており、処理能力 10,000 m³/日未満の小規模下水処理場の約 7 割（1,445 箇所中 1,016 箇所）で採用されている¹⁾。

OD 法を採用する小規模下水処理場では、中短期的には下水道普及率の向上や広域化・共同化による施設統廃合に伴う流入汚水量の増加、し尿や浄化槽汚泥などの受入れに伴う流入負荷量の増加、設備更新に伴う一部施設の運転休止などにより、既存施設の処理能力の不足が想定される一方、長期的には将来の人口減少に伴う流入汚水量の減少が予想される下水処理場が少なくない（図 5 参照）。一方、下水道経営は、OD 法を採用する中小都市の方がより厳しい状況にあり、さらに今後は、人口減少に伴う使用料収入の減少や施設の老朽化による改築更新費の増大などにより、より厳しい経営環境となることが想定されるため、より一層のコスト縮減が求められている。

従来の OD 法では、1. 3 で述べたとおり、低い負荷条件（HRT24～36 時間）において、タイマー制御を基本とする間欠曝気運転を行うことにより、処理の安定化、維持管理の容易化を図っている。そのため、従来の OD 法では、上述した課題に対して、運転方法の変更などにより柔軟に対応するのが困難であることが実情であった。

そこで、上述した課題に対応するため、従来の OD 法よりも高負荷条件、具体的には 24 時間以下の HRT、最短で 12 時間の HRT において、従来の OD 法と同等以上の有機物・窒素の安定処理、消費電力の削減を目標として、本装置の開発を行った。

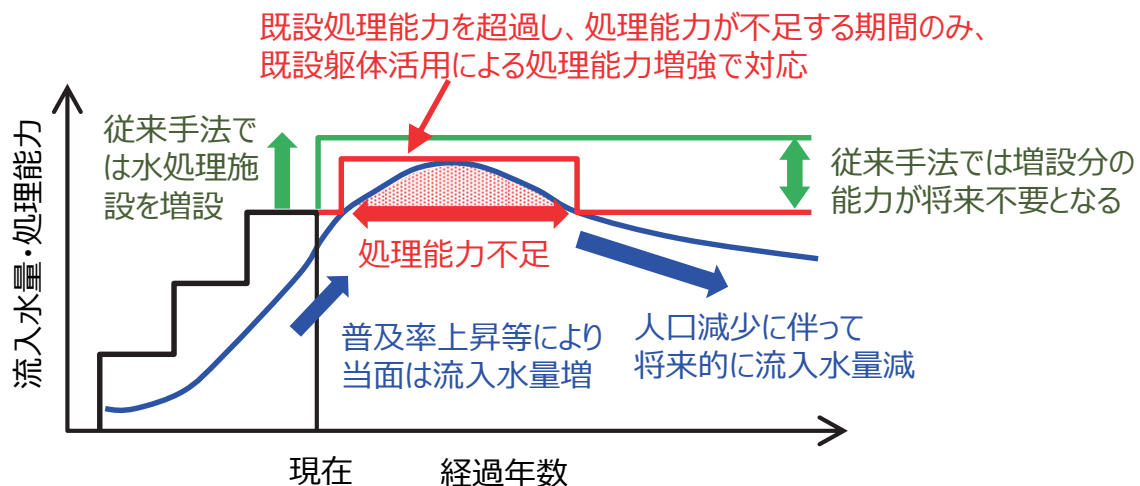


図 5 長期的な流入水量変動への対応の概念図

2. 2 開発の経緯

2000～2004 年度	高知大学により、人工下水を用いたラボスケール（装置容量 8 L）での基礎研究を実施。二点 DO 制御を考案。
2004～2008 年度	前澤工業と高知大学の共同研究により、実下水を用いたベンチスケール（装置容量 300 L）で、二点 DO 制御の特性の評価、実規模へのスケールアップに向けた検討を実施。
2008～2010 年度	前澤工業と高知大学、日本下水道事業団の共同研究により、実規模（反応タンク容量 1,750 m ³ ）での実証試験を実施。 ・共同研究名称：エネルギー消費抑制型下水処理技術の開発 ー高負荷二点 DO 制御を用いた効率的な OD 法の開発ー ・実証試験場所：高知県香南市野市浄化センター
2011 年 4 月	第 1 号機納入 ※ 香南市へ実証試験設備を引渡し、実運用を開始。
2014 年 7 月	日本下水道事業団の新技术 I 類に選定。

なお、本装置は、前澤工業株式会社、国立大学法人 高知大学、日本下水道事業団が共同で開発を行った。それぞれが担当した開発の内容は、次のとおりである。

- ・前澤工業株式会社：
実証試験設備の設計・建設、運転管理、水質分析、試験データの整理、実証試験成果のまとめ
- ・国立大学法人 高知大学：
各種調査・性能確認、試験データの解析、実証試験成果のまとめ
- ・日本下水道事業団：
実証試験成果の評価、設計手法・維持管理手法、普及展開方策の検討

3. 独創性

（1）二点 DO 制御の考案

本装置の開発は、高知大学・藤原拓教授（現・京都大学）の「二重管型反応装置の硝化脱窒プロセスへの適用に関する研究」に端を発する。藤原教授は、二重管型反応装置では、約 10 時間の HRT でゾーン運転による窒素除去が可能であることや、縦型の二重管型反応装置を横置きすれば OD 法の反応タンクとなることから、OD 法を高負荷運転することにより、反応タンク内の酸素消費速度を増加し、ゾーン運転による窒素除去が可能になると考え、本装置の基礎研究に着手した。

実験に先立つ理論解析の結果、操作因子として DO 循環速度（＝曝気部 DO 濃度×循環流量／反応タンク容量）が重要であることを明らかにし、人工下水を用いたラボスケール実験により実証した。この実験結果を踏まえ、DO 循環速度を制御する技術として、反応タンク内の 2 箇所の DO 濃度に基づき、曝気風量と循環流量を独立に制御する「二点 DO 制御」を考案し、特許を取得した²⁾。

（2）ゾーン運転の実現

従来の OD 法と本装置の比較を表 2 に示す。

低負荷条件での運転を前提とする従来の OD 法では、連続曝気によるゾーン運転は困難であり、タイマー制御による間欠曝気方式とすることで、時間的に好気状態と無酸素状態を形成させ、硝化・脱窒反応を進行させることにより、処理の安定化、維持管理の容易化を図っている。

これに対して、本装置では、1. 3 に示すとおり、反応タンク内の 2 箇所の DO 計の値を用いて、当該 2 点間の DO 濃度の勾配が一定となるように、曝気風量と循環流速を独立して制御することにより、流入負荷変動等の影響によらず、連続曝気式の反応タンク内に好気ゾーンと無酸素ゾーンを安定して形成させることを可能とした。これにより、本装置では、水質や水温などの流入条件によっては、従来の OD 法よりも高負荷条件、すなわち、短い HRT での運転が可能となった。

表 2 従来の OD 法と本装置の比較

項 目	従来の OD 法	本装置
HRT	24～36 時間(標準)	12(最短)～24 時間 ※流入条件による
曝気方法	間欠曝気	連続曝気
制御方法	タイマー制御 ※DO 制御との組合せもあり	二点 DO 制御
好気・無酸素状態の形成方法	時間的に形成	空間的に形成 (ゾーン形成)
有機物除去性能	同 等	
窒素除去性能	同 等	

(3) 消費電力の削減

本装置では、5. (3) で後述するとおり、一般的な縦軸型機械式エアレーション装置と比較して、30%程度の消費電力削減が期待できる。

本装置における消費電力の削減は、以下に示す二つの要因により達成される。

1) 二点 DO 制御による削減効果

本装置では、1. 3 で述べたとおり、流入負荷変動に応じた酸素供給が行われることにより、消費電力が削減される。

2) 高効率な機器による削減効果

曝気と攪拌を 1 台で行う従来の機械式エアレーション装置に比べて、散気装置の酸素供給効率が高く、消費電力が削減される(図 8 参照)。

(4) 高負荷運転による処理能力の増強

本装置は、(2) で述べたとおり、水質や水温などの流入条件によっては、従来の OD 法よりも高負荷条件、すなわち、短い HRT でも安定処理が可能である。

そこで、本装置では、污水处理施設の統廃合による流入水量増加やし尿・浄化槽汚泥などの受け入れによる流入汚濁負荷増加などの事象に対して、処理能力増強に伴う水処理施設の増設が不要になるなど、コストの縮減が可能となる。

4. 特許の有無

次のとおり、特許 3 件を取得済み。

特許番号：第 4230310 号 / 名称：排水処理装置及びその運転方法

特許番号：第 5725869 号 / 名称：排水処理装置及びその運転方法

特許番号：第 5863409 号 / 名称：排水処理装置

5. 性能

本装置の性能について、野市浄化センターにおける実証試験成果により説明する。

(1) 処理水質

実証試験期間中の有機物（生物化学的酸素要求量：BOD）及び窒素の反応タンクの流入水質及び処理水質の推移を図 6 に示す。

処理水 BOD は、実証期間中全てにおいて、下水道法施行令に定める OD 法が適合する計画放流水質区分の上限値 15 mg/L 以下であり、年間平均値は 3mg/L であった。

処理水の全窒素（T-N）濃度は、実証期間中全てにおいて概ね 3 mg/L 以下（年間平均値 1.3 mg/L）であり、安定して 90%程度の窒素除去率が得られた。

以上のとおり、本装置では、従来の OD 法よりも高負荷条件（短 HRT）でも、安定的に有機物及び窒素の除去が可能である。

(2) 高負荷運転

実証試験期間中の HRT は、平均で 16.5 時間、最短で 12.3 時間であり、標準的な HRT（24 時間）の約 1.5～2 倍の高負荷条件において、上述したとおり、安定した有機物及び窒素の除去が可能であった。

以上のことから、本装置では、水質や水温などの流入条件によっては、従来の OD 法よりも高負荷条件（短 HRT）を採用することが可能である。

(3) 消費電力量

実証設備設置前後の同一反応タンクにおける消費電力量原単位（処理水量 1 m³あたりの水処理消費電力量）の比較を図 7 に示す。当該反応タンクの定格の処理能力に相当する流入水量 1,750 m³/日における消費電力量原単位は、既設の従来装置（スクリー型エアレーション装置）では 0.38 kWh/m³であったが、本装置では 0.125 kWh/m³となり、従来装置の約 3 分の 1 に削減された。

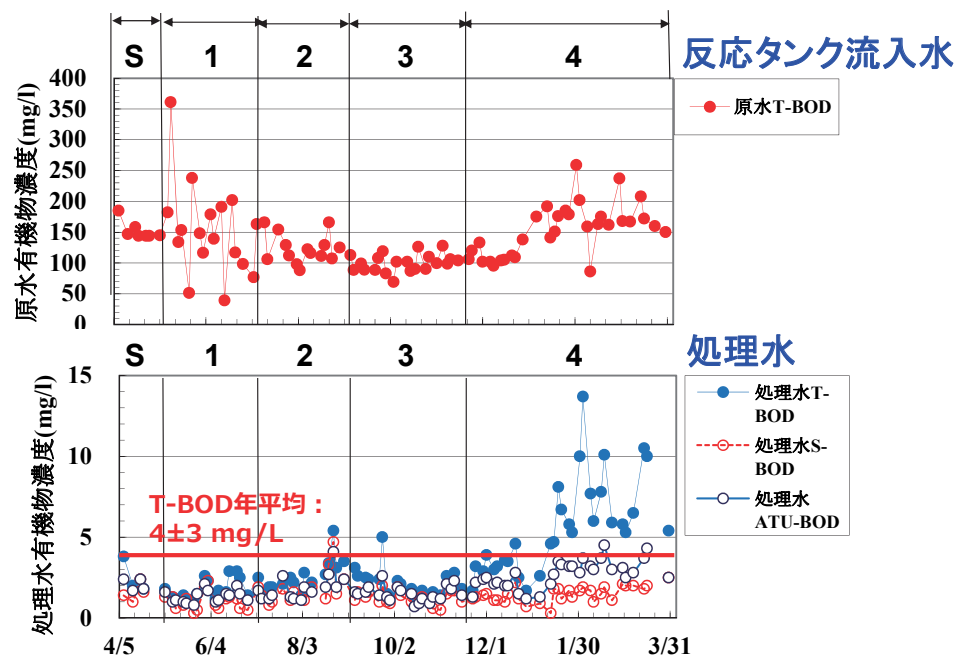
各種の OD 用エアレーション装置の消費電力量原単位（除去 BOD1 kg あたりの曝気装置電力消費量）の比較を図 8 に示す。本装置の消費電力量原単位は 1.0 kWh/kgBOD であり、従来の OD 用の各種エアレーション装置と比較して 2 割以上削減された。本装置では、従来の OD 法で広く使用されている縦軸型機械式エアレーション装置と比較した場合、約 30%の消費電力量の削減を期待できる。

(4) 運転操作性

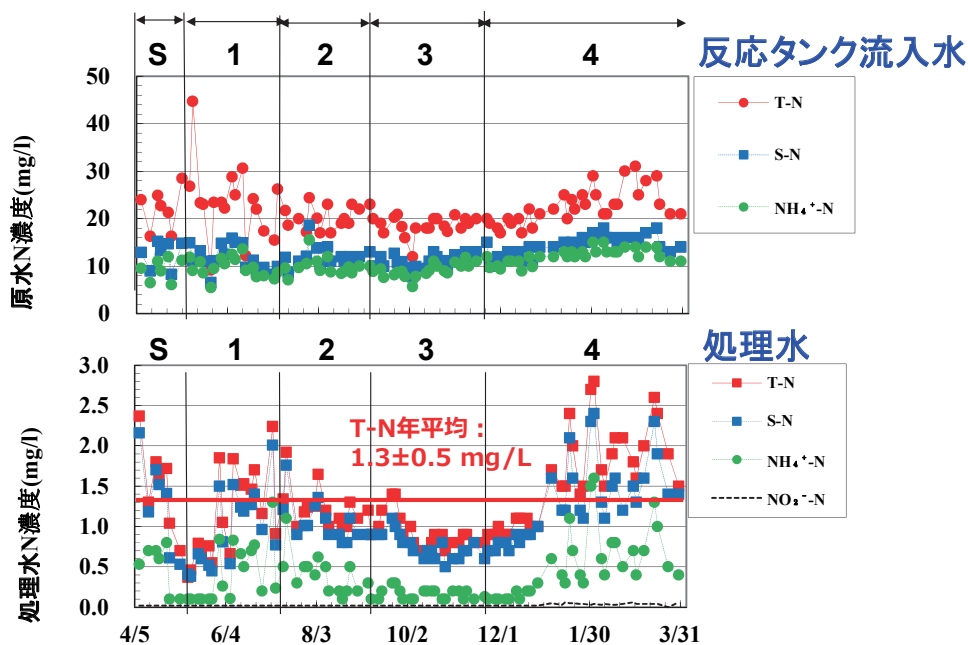
本装置は、反応タンク内に設置した 2 箇所の DO 計の値を用いて曝気風量と循環流速を独立して自動制御するため、経験豊富な運転管理技術者に頼らず、最適な運転が可能となり、日々の運転管理業務負担を軽減することが可能である。

(5) 維持管理性

縦軸水流発生装置は、駆動部が反応タンク外部にあり、水中部にメンテナンス箇所がないため、維持管理が容易である。また、DO 計は、蛍光式を採用しているため、電解液や隔膜の交換が不要で、保守の必要がほとんどなく、維持管理が容易である。



① 有機物濃度



② 窒素濃度

[各 RUN の平均 HRT] RUN1:15.4h、RUN2:14.8h、RUN3:15.4h、RUN4:18.3h

図6 実証試験における有機物及び窒素濃度の推移

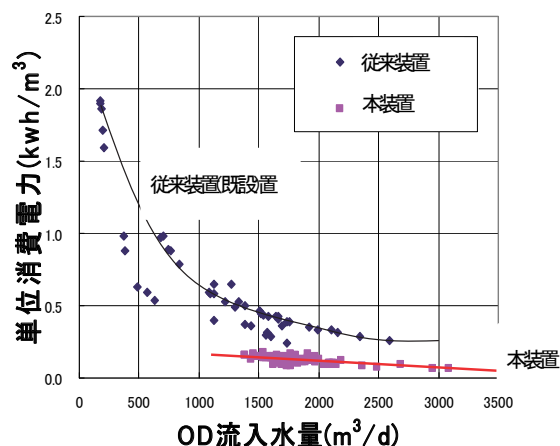


図7 実証設備設置前後の消費電力量原単位の比較

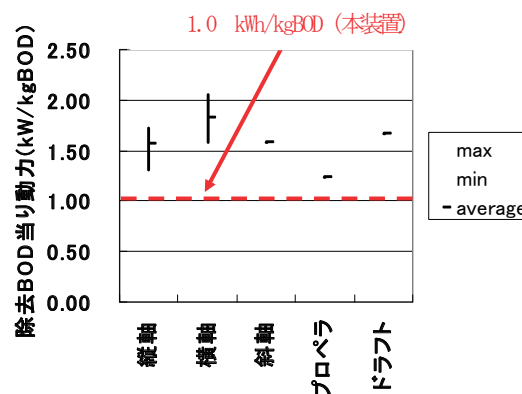


図8 各種OD用エアレーション装置との消費電力量原単位の比較

6. 経済性

本装置の経済性について、本装置を納入した下水処理場における本装置導入前後でのコスト比較を例に説明する。本装置導入前後の施設整備内容及び建設・維持管理コストの比較を表3に示す。

本下水処理場では、し尿や農業集落排水の受入れにより、流入負荷量が増加し、既存施設では処理能力が不足する一方、将来的には人口減少により流入水量の減少が予想されている。これに対して、既設と同じスクリー型エアレーション装置（以下、本章において「従来装置」という）を用いた既計画では、既設の水処理施設（反応タンク及び最終沈殿池、以下同じ。）1系列の設備増設に加え、新たに水処理施設1系列の増設が必要であった。これに対して、本装置を導入した新計画では、既設の水処理施設1系列の設備増設に加え、既設の反応タンク1池の従来装置を本装置に更新し、2池で高負荷運転（HRT 約20時間）を行うことにより、水処理施設の増設が不要となった。

この結果、新計画では、本装置導入により機械・電気設備はコスト増となるが、反応タンク（土木躯体）の増設が不要となるため、土木・建築工事がコスト減となり、建設コスト全体では5%減となった。また、本装置の消費電力量は、従来装置と比較して約2分の1となるため、既設を含む下水処理場全体の電力費は27%減となり、補修費と合わせた維持管理コストでは29%減となった。この結果、建設年価と合わせたライフサイクルコストでは、従来装置を用いた既計画と比較して、本装置を導入した新計画では14%削減となった。

以上のとおり、本装置は、従来装置と比較して、機械・電気設備の建設コストは若干割高となるものの、高負荷運転による処理能力増強に伴う土木躯体増設の回避による建設コスト縮減や消費電力量の削減などによる維持管理コスト縮減のため、ライフサイクルコストでは有利となる。

表 3 本装置導入前後のコスト比較例

項 目		既計画 (従来装置による増設)	新計画 (本装置導入による増設・更新)
施設整備イメージ図		全体処理能力：3,700m³/日	全体処理能力：3,700m³/日
施設整備内容		設備増設 1 系列 躯体・設備増設 1 系列	設備増設 1 系列 既設設備更(反応タンクのみ)新 1 池
建設コスト (増設・更新費 用)	土木・建築	100	69
	機械・電気	100	107
	合 計	100	95
維持管理コスト (年間)	電力費	100	73
	補修費	100	67
	合 計	100	71
ライフサイクルコスト(年 価)		100	86
注 1：新計画の建設コストおよび維持管理コストは、既計画を 100 とした場合の比率である。 注 2：建設コストは、既設 3 池に対して増設または改築に要する費用である。 注 3：維持管理コストは、既設の従来装置を含む下水処理場全体での費用である。 注 4：ライフサイクルコストは、建設年価(耐用年数：土木・建築 50 年、機械・電気 20 年)と維持管理コスト(年間)の合計を表す。			

7. 将来性

本装置は、これまでに9箇所の下水処理場で導入決定され、うち7箇所の下水処理場ですでに供用している（2021（令和3）年6月現在）。9箇所の下水処理場における本装置導入の目的は、以下に示すとおりであり、主に処理能力増強によるコスト縮減の観点から導入されていることが分かる。

- ① 既存施設の処理能力増強による水処理施設の増設回避 : 7/9 箇所
- ② 処理区統合に伴う既存施設の処理能力増強 : 4/9 箇所
- ③ し尿等受入れに伴う既存施設の処理能力増強 : 2/9 箇所
- ④ 既設処理方式からOD法変更に伴う設置面積や建設コストの縮減 : 2/9 箇所

下水道経営は、OD法を採用する中小都市の方がより厳しい状況にあり、さらに今後は、人口減少に伴う使用料収入の減少や施設の老朽化による改築更新費の増大などにより、より厳しい経営環境となることが想定されるため、より一層のコスト縮減が求められている。一方、事業運営の効率化を図る観点から、広域化・共同化の推進が求められており、今後、汚水処理施設の統廃合やし尿・浄化槽汚泥などの受入れなどに伴って既存施設の処理能力が不足するケースが増加することが予想される。本装置は、上述したとおり、既存施設を活用して処理能力を増強することで、このようなニーズに対応することが可能である、また、本装置は、公益社団法人日本下水道協会の「下水道施設計画・設計指針と解説」の最新版（2019（令和元）年9月発刊）において、OD法の省エネルギー化や処理能力増強を可能とする技術として掲載されている。以上のことから、本装置の国内における今後更なる普及拡大が期待できる。

一方、海外においても、都市部への人口流入に伴う汚水量増加により処理能力の増強が求められる地域、放流先が国際河川や閉鎖性水域などで高度な窒素除去が必要とされる地域などにおいて、本装置の導入が有効であり、今後、普及展開が期待できる。さらに、下水道技術者が育っていない新興国においても、本装置は自動制御により安定した処理性能を確保できるため、普及展開が期待できる。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会（2020）「平成30年度版下水道統計 第75号」
- 2) 藤原拓（2014）二点DO制御オキシデーションディッチ法の開発～着想から実用化まで～，化学工学，第78巻第12号，p.869-872.