

〈研究発表〉

回転繊維ユニット RBC-OD 法による処理能力増強効果とその有機物除去機構

胡 錦 陽¹⁾, 小 原 卓 巳¹⁾, 柿 沼 建 至²⁾
高 田 祥 暉³⁾, 糸 川 浩 紀³⁾

¹⁾ 東芝インフラシステムズ(株) インフラシステム技術開発センター
(〒 183-8511 東京都府中市東芝町 1 E-mail: hu.jinyang@toshiba.co.jp)

²⁾ 東芝インフラシステムズ(株) 社会システム事業部
(〒 212-8585 神奈川県川崎市幸区堀川町 72-34 E-mail: kenjil.kakinuma@toshiba.co.jp)

³⁾ 日本下水道事業団 技術開発室
(〒 113-0034 東京都文京区湯島 2-31-27 E-mail: Takata01@jswa.go.jp)

概 要

筆者らは回転繊維ユニット RBC を OD 槽の前段に設置することで、既存処理能力を増強する RBC-OD 法の実証を進めてきた。本報では、下水処理場に設置した実規模の実証試験装置により、OD 槽へ流入する下水量を従前の 2 倍とした負荷増強の通年試験を実施し、性能評価を行った結果を報告する。加えて、酸素利用速度 (OUR) 試験を用いて、汚泥に吸着している有機物量を推定することで、同 RBC 装置における有機物除去メカニズムについて考察した結果も合わせて報告する。

キーワード: RBC, OD, 下水, 能力増強, OUR

原稿受付 2024.7.9

EICA: 29(2・3) 50-54

1. 背景と目的

オキシデーションディッチ (OD) 法は維持管理が容易で負荷変動に強いことから国内下水処理場の約半数、処理能力 1 万 $\text{m}^3/\text{日}$ 未満の小規模下水処理場の約 7 割を占める。一方、本処理法の更なる省エネルギー化や広域化・共同化などに伴う処理能力増強を可能とする技術のニーズが高まっている。本課題を解決するために、筆者らは短い水理学的滞留時間 (HRT) で有機物、窒素を低減可能な回転繊維ユニット RBC (Rotating Biological Contactor; 以下、RBC 装置) の開発・実証を行ってきた。本 RBC 装置は網目状構造の繊維体を用いる回転生物接触法の処理装置で (Photo. 1)、繊維体に形成される生物膜の肥大化を防ぐ程度の弱い散気と繊維体の回転に要する少ない動力で有機物や窒素の低減を行う^{1,2)}。本装置を OD 槽の前処理に用いることで、OD 法の省エネルギー化や処理能力増強を図る新たな水処理技術 (RBC-OD 法) について、下水処理場に実規模設備を設置して実証試験を行ってきた。実証試験は OD 槽の曝気時間を減らす省エネルギー試験と OD 槽 1 池の流入水量を従来比で 2 倍とした能力増強試験の 2 つの試験で構成されており、本報告では実証試験の一環として実施した能力増強試験、ならびに RBC 装置の前後における有機物の挙動を把握するために実施した酸素利用速度 (OUR; Oxygen Uptake Rate) 試験の結果について報告する。



Photo. 1 Appearance of full-scale RBC equipment

2. 研究方法

2.1 対象施設

Fig. 1 に示すフローの OD 法の下水処理場にて、処理能力が $1,160 \text{ m}^3/\text{d}$ の 1 系 ($580 \text{ m}^3/\text{d} \times 2$ 池) を実証系列、 $1,230 \text{ m}^3/\text{d}$ (1 池) の 2 系を対照系列として処理能力増強試験を実施した。流入下水は No. 1 分配槽を経由し、No. 2 分水槽で実証系列と対照系列に分配される。実証系列に関して、No. 2 分水槽の後段に実規模の RBC 装置 (実証機) を設置し、実証試験設備を構築した。本実証機内部には直径 2 m の円板が 30 枚設置されており、円板の総表面積は 750 m^2 、RBC 装置の有効容積は 10.9 m^3 である。全量の流入下水と一部の返送汚泥を RBC 装置に流入させる。返送

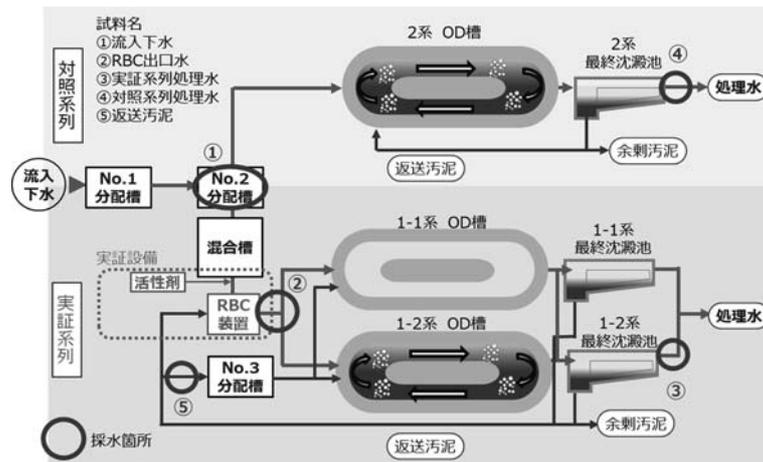


Fig. 1 Outline of full-scale demonstration facility and sampling locations

汚泥の一部を流入させるのは、円板に付着する微生物量を一定以上確保するために行っている。また、処理性能の安定化を目的としてミネラル分を主成分とした活性剤をRBC装置へ連続的に添加した¹⁾。流入原水と上記返送汚泥が回転円板と接触した後に、同装置の流出水（以降、RBC 出口水）が既設のOD槽、最終沈殿池で処理され、最終処理水として排出された。

2.2 能力増強試験

2023年1月10日～12月28日の12か月間、実証系列において、2池のOD槽のうち1池（1-1系）を停止させ、残り1池（1-2系）のみで運転を行うことによりOD槽への流入水量を倍増させ、最終沈殿池は従来通り2池を使用した。能力増強試験の運転条件をTable 1に示す。実証系列の流入下水平均流量は1,141 m³/dayで、設計流量580 m³/dayの約2倍であった。最終沈殿池からの返送汚泥の一部をRBC装

置へ分配し、Table 1に示すように、本期間の分配比は平均13%（残りの87%は従来通りOD槽へ返送）とした。両系列のOD槽のMLSS濃度は、実証系列で平均2,780 mg/L、対照系列で平均2,895 mg/Lと同等レベルで運転を行った。流入下水の水温は15.1～25.3℃で変動し、平均水温は20.3℃であった。OD槽のHRTに関しては、実証系列の流量を従来の2倍としたため、実証系列平均HRTが16.5 h、対照系列平均HRTは33.5 hとなり、実証系列は対照系列と比較して高負荷での運転となった。

水質の測定に関してはBOD、SS、T-N、NH₄-N、NO_x-N、T-P、PO₄-P等を週1回の頻度で流入下水、RBC出口水、実証系列と対照系列の終沈流出水（以降処理水）、返送汚泥のサンプリングを実施した（Fig. 1参照）。ここで、RBC出口水については返送汚泥を含むため、10分間の静置後の上澄み水を試料として水質測定に供した。

Table 1 Operating conditions for demonstration and control trains in capacity enhancement test

項目	単位	実証系列	対照系列
流入下水 ※()内の数値は施設設計値			
流量	m ³ /d	1,141 (580/池)	880 (1,230/池)
BOD濃度	mg/L	272 (230)	
RBC装置			
汚泥返送量 (A)	m ³ /d	143	—
RBC汚泥分配比 (A)/(B)	%	13	—
HRT (返送汚泥不含)	min	13.8	—
OD槽			
HRT	hr	16.5	33.5
MLSS濃度	mg/L	2,780	2,895
曝気時間	hr/d	18	10.8
曝気装置		横軸型 7.5 kW×2台/池	横軸型 15 kW×2台/池
最終沈殿池			
仕様		φ 8.6 m×2池	φ 14 m×1池
水面積負荷	m/d	9.8	5.7
汚泥返送量 (B)	m ³ /d	1,102	1,181
返送比	%	97	134

2.3 OUR 試験を用いた RBC 装置における有機物挙動

Table 1 に示すように、能力増強試験期間中の RBC 装置における流入下水量ベースの HRT は平均 13.8 min と、非常に短い滞留時間の前処理装置である。RBC 装置の運転方法として、流入下水と一部の返送汚泥を RBC 装置内に流入させることが特徴であり、RBC 装置の入口と出口のサンプルの測定結果から求めた有機物低減率は同装置に流入した返送汚泥への吸着分を含めた低減率である。非常に短い HRT であることから、RBC 装置からの流出汚泥に一部の有機物が吸着したまま OD 槽に流出している可能性が示唆されるため、RBC 装置内で実際に除去されている有機物量（以降、真の有機物低減効果）を推定するために OUR 試験の結果を活用することにした。さらに OUR 試験結果から RBC 装置の入口と出口のマスバランスを評価することで、RBC 装置で除去された有機物量と返送汚泥に吸着した状態で OD 槽に流出する有機物量を推定した。水温の影響を評価するために、2023 年 7 月（夏期）と 2024 年 2 月（冬季）の計 2 回実施した。

2.3.1 OUR 試験

OUR 試験は、活性汚泥に有機物を添加し、溶存酸素消費速度をモニタリングすることで、被処理水の生分解性や活性汚泥による有機物分解速度を推定する試験である³⁾。本報告では、RBC 装置の流入・流出汚泥（返送汚泥）に吸着されている有機物量を把握するために、OUR 試験の結果を用いた。具体的には、被測定汚泥溶液に酸素を供給した後、DO 値の経時データを取得し、上記データから酸素消費速度（OUR）を算出し、Fig. 2 の酸素消費速度曲線を利用して、OUR の積分値（点線部分の面積）を求めることで、汚泥試料に吸着されていた COD の消費に伴う酸素消費量を求めた。更に、式 1 を用いることで、汚泥試料が吸着している COD 量を推定する。

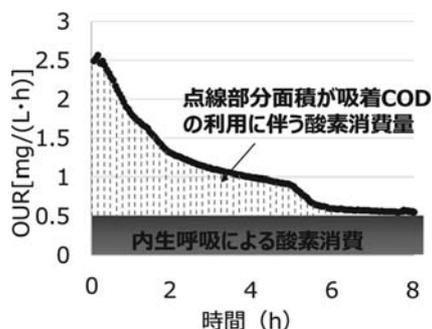


Fig. 2 Image of respirogram for estimating the amount of COD captured in sludge sample

汚泥に吸着された有機物量＝

$$(\text{汚泥 OUR 曲線の面積} - \text{空曝気汚泥 OUR 曲線の面積}) \div (1 - \text{増殖収率}^4) \dots \text{式 1}$$

OUR 試験では、対象汚泥を 200～500 mg/L（VSS 濃度 160～400 mg/L 程度）まで希釈し、アリルチオ尿素（ATU）を 8 mg/L 添加した。室温を 25℃ に保ち、エアポンプで DO 濃度を 6 mg/L まで上げてから、エアポンプを止めて容器を密閉し、スターラーで攪拌しながら DO 計で DO 濃度の経時変化を測定した。DO 濃度が 1 mg/L 以下になったら、再びエアポンプを始動し、DO 濃度を 6 mg/L まで戻して、上記の操作を繰り返し、10 秒間隔で DO 濃度をモニタリングした。約 8 時間の試験を実施し、DO 濃度データから OUR 値を算出した。採取直後の返送汚泥、RBC 出口汚泥、RBC 装置の円板に付着している生物膜汚泥に加えて、内生呼吸による酸素処理量を把握するために 20 時間曝気した活性汚泥を準備し、これらの 4 種類の汚泥に対して OUR 試験を実施した。OUR 試験の結果に基づき、返送汚泥に吸着している有機物量と生物膜に吸着されている有機物量の推定を行った。

2.3.2 有機物マスバランスの推定

RBC 装置における有機物マスバランスの推定については、本装置の流入、流出有機物量を COD_C 測定により求めるとともに、OUR 試験の結果を活用し、RBC 装置に流入する返送汚泥及び RBC 出口汚泥に吸着している有機物量を推定することで、評価を実施した。マスバランス推定の結果に基づき、RBC 装置の真の有機物低減率の推定を実施した。

3. 結果と考察

3.1 能力増強試験

Fig. 3 に評価期間中の実証系列の流入下水、RBC 出口水、処理水の BOD 濃度、RBC 装置の BOD 低減率の推移を示す。流入水の BOD 濃度は平均 272 mg/L（範囲 170～450 mg/L）に対して、RBC 出口水の BOD 濃度は平均 80 mg/L（範囲 39～130 mg/L）であり、処理水の BOD 濃度は平均 3 mg/L（範囲

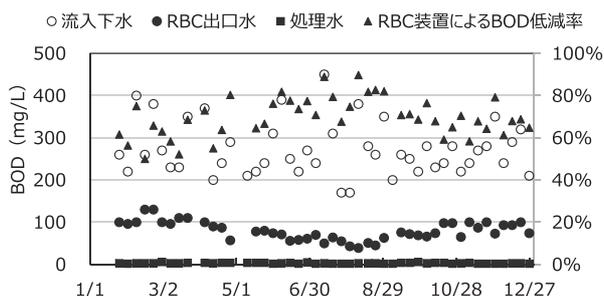


Fig. 3 BOD concentrations for influent wastewater, RBC effluent, OD effluent and BOD reduction efficiency in RBC reactor

2~6 mg/L)であった。

実証期間中のBOD低減率は平均69.8% (範囲50.0~89.7%)であった。水温が高い夏期の低減率が高く、水温の低い冬季の低減率が低い傾向がみられ、水温がRBC装置の性能に影響を与えることがわかる。2章で記載したように、RBC装置における流入下水ベースのHRTは平均13.8 minと非常に短時間であるにもかかわらず、BOD低減率の平均69.8%であった。しかしながら、このBOD低減率は必ずしもRBC装置にて除去されたものではなく、一部が返送汚泥に吸着された状態でOD槽に流出していると考えられることから、これを3.2節のOUR試験で明らかにすることで、RBC装置における真のBOD低減率を推定する。

Fig. 5 に実証系列、対照系列処理水BOD濃度の推移を示す。実証期間中、実証系列における処理水の

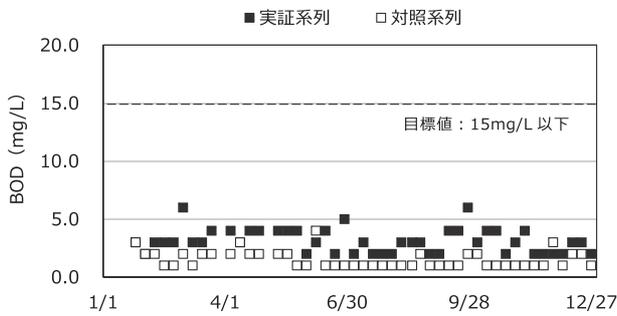


Fig. 4 BOD concentrations of secondary effluent from demonstration and control trains

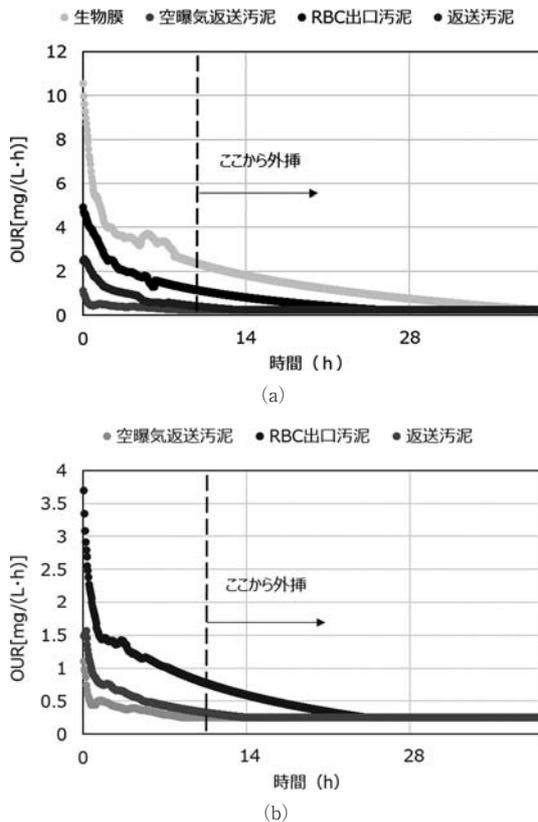


Fig. 5 OUR respirogram of each sample

BOD濃度は3 mg/L (範囲2~6 mg/L)に対して、対照系列は2 mg/L (範囲1~4 mg/L)であり、実証系列の方がわずかに高くなったものの、OD法の処理水質としては十分に低濃度であった。また、RBC装置の設置によりOD槽1池の運転を停止し同池分の曝気装置等の消費電力が不要となったことから、下水処理量当たりの消費電力量原単位が、対照系列と比較して年間平均で33.7%削減された⁵⁾。以上のことから、開発RBC-OD法が年間を通じて、OD槽従来比約2倍の処理能力増強を達成しつつ、省エネルギー化も可能な水処理システムであることを実証できた。

3.2 OUR試験

Fig. 5 に2回OUR試験のレスピログラムグラフを示す。8時間までのOUR値は測定DO値から算出し、8時間以降のOUR値は空曝気汚泥の内生呼吸速度と同等レベルになるまで、近似曲線で外挿した。OUR試験の結果に基づき、各汚泥サンプルに吸着した有機物量を推定した。7月の試験では返送汚泥の有機物吸着量0.04 mg COD_{Cr}/mgVSSに対して、RBC出口汚泥の吸着量は0.20 mg COD_{Cr}/mgVSSで、生物膜汚泥の吸着量は0.44 mg COD_{Cr}/mgVSSで、RBC出口汚泥では返送汚泥の5倍程度、RBC生物膜汚泥では返送汚泥の11倍程度の有機物を吸着していることが示された。2月の試験に関しては返送汚泥の有機物吸着量0.06 mg COD_{Cr}/mgVSSに対して、RBC出口汚泥の吸着量は0.21 mg COD_{Cr}/mgVSSと7月と同等レベルの結果であった。上記結果に基づき、RBC装置内における有機物のマスバランスを推定した結果をFig. 6に示す。

7月の試験 (Fig. 6(a)) に関して、RBC装置に流入

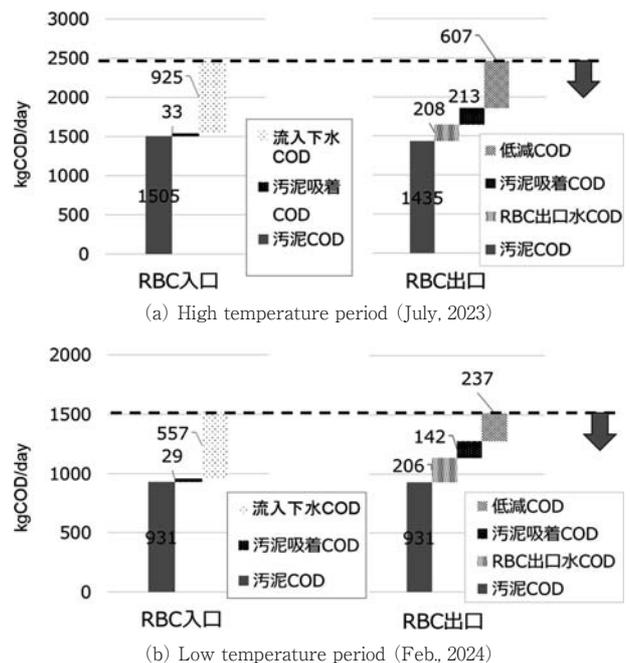


Fig. 6 Estimated fate of COD in RBC reactor

する COD は 958 kg/d であり、208 kg/d が RBC 出口水で流出し、213 kg/d が返送汚泥に吸着され、RBC 装置にて低減した COD は 607 kg/d との推定結果となった。RBC 入口と出口で汚泥吸着分有機物に大きな変化はなく、無視できると仮定すると、流入下水由来の COD (925 kg/d) に対して、20.8% が RBC 出口汚泥に吸着した状態で OD 槽に流出する一方、59.0% が RBC 装置によって低減したと推定された。2 月データ (Fig. 6 (b)) に関しては、夏季データと同様の考え方で評価し、RBC 装置にて低減した COD は 237 kg/d という推定結果となった。低減割合に関しては、流入下水由来 COD の 24.3% が RBC 出口汚泥に吸着したまま OD 槽に流出、40.5% が RBC 装置によって低減したと推定された。

2 回の評価試験はそれぞれ夏と冬に行われており、夏季の流入下水水温は約 22℃、冬季の流入下水水温は約 16℃であり、水温として 6℃の差があった。能力増強試験結果においても、夏 (2023 年 6 月~9 月) の平均有機物低減率は 77.4%、冬 (2023 年 1 月, 2 月, 12 月) の平均有機物低減率は 63.5% で、水温の低下に伴って RBC 装置の有機物低減率が低下する傾向が確認されており、水温が有機物低減率に影響していると考えられる。また、RBC 装置の生物膜に多くの有機物が吸着していることが確認されたことから、同装置において、有機物はまず円板上の生物膜汚泥により捕捉され、その後、時間をかけて生物学的に分解されていくことで、高い有機物低減率を達成していると考えられる。

RBC 装置に流入する返送汚泥による有機物吸着量を推定することで、RBC 装置の真の有機物低減率を推定できた。2 回の試験の平均では RBC 装置の真の有機物低減率は流入下水由来有機物の 49.8% であり、22.5% の有機物が汚泥に吸着されたまま OD 槽に流出したことになる。すなわち、能力増強試験で得られた見かけの RBC 有機物低減率から約 2 割を割り引いた値は RBC 装置における真の有機物低減率として推定可能と考えられる。能力増強試験における RBC 装置の見かけの BOD 低減率が 69.8% であることから、RBC 装置による真の BOD 低減率は 50% 程度であると推定される。また、RBC 装置における真の有機物の低減率は水温によって変動する一方で、汚泥に吸着される有機物量は水温依存性が大きくないことが示唆された。

4. ま と め

RBC-OD 法による能力増強効果及び RBC 装置内の有機物マスバランスを推定し、以下の知見が得られた。

- (1) 2023 年 1 月 10 日~2023 年 12 月 28 日までの約 1 年間で実施した RBC-OD 法による能力増強試験において、RBC-OD 法における処理水の平均 BOD 濃度は、3 mg/L であり、OD 法として十分に低濃度であった。開発 RBC-DO 法が年間を通じて、従来比 2 倍の処理能力増強を達成しつつ、省エネルギー化も可能な水処理システムであることを実証できた。
- (2) OUR 測定を利用して RBC 装置における有機物の挙動を推定したところ、能力増強試験で得られた見かけの RBC 装置による有機物低減率から約 2 割を割り引いた低減率が RBC 装置における真の低減率として推定可能であることが分かった。上記結果により、能力増強試験における RBC 装置の真の低減率は 50% 程度と推定した。

謝 辞

本研究にあたり、ご協力いただいた下水処理場の関係者各位に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) T. Ito, Y. Yamanashi, N. Noguchi, N. Miyazato, T. Aoi: Microbial Communities and Nitrogen-Utilizing Bacteria of Rotating Biological Contactors and Activated Sludge Treating Public Sewage and Night Soil/Johkasou Sludge, *Journal of Water and Environment Technology*, 19 (3), pp.109-119 (2021)
- 2) 柿沼建至, 胡錦陽, 小原卓巳, 大月伸浩, 福井智大, 糸川浩紀: 回転繊維ユニット RBC-OD 法の省エネ及び能力増強性能, 第 60 回下水道研究発表会講演集, pp.904-906 (2023)
- 3) 日本下水道協会: 下水試験法, pp.688-689 (2012)
- 4) M. Henze, W. Gujer, T. Mino, M. van Loosedrecht: *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, STR No. 9, IWA Publishing, London (2000)
- 5) 柿沼建至, 胡錦陽, 小原卓巳, 大月伸浩, 高田祥暉, 糸川浩紀: 回転繊維ユニット RBC-OD 法による処理能力増強効果の長期実証, 第 61 回下水道研究発表会講演集 (発表予定) (2024)