

＜研究発表＞

高度処理プロセスのORPを用いた効率的制御手法の開発

三木理¹, 加藤敏朗¹, 高橋直哉¹, 村上孝雄²

新日本製鐵株式会社 技術開発本部(〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1 E-mail:omiki@re.nsc.co.jp)

日本下水道事業団(〒335-0037 埼玉県戸田市下笹目 5141 E-mail:murakamit@jswa.go.jp)

概要

著者らは、下水からの生物学的な窒素・りん除去プロセスを効率的に制御するため、各反応槽のORP(酸化還元電位)を指標とした運転管理手法の研究開発を行なっている。A₂O法のパイロットプラント規模の実験装置を用いた実証実験の結果、各反応槽のORPを連続的にモニタリングしながら各反応槽の運転を管理・制御する手法は、各反応槽での窒素・りんの除去の状態を推定でき、また、処理水質の安定化や省エネルギー化のためにも有効な手段であることを確認したので報告する。

キーワード: 窒素、りん、ORP、制御、嫌気・無酸素・好気法

1. はじめに

下水から窒素・りんを除去する方法として、嫌気—無酸素—好気法(以下、A₂O法という)などが開発・実用化されているが、今後は、窒素・りんを更に安定的に、かつ、省エネルギー的に除去するため、下水の水質及び水量変動に応じたきめ細かな運転管理が重要となると考えられる。筆者らは、生物学的な窒素・りん除去プロセスの安定化を図る手法として、従来の管理パラメータに加え、各反応槽のORP(酸化還元電位:Oxidation-Reduction Potential)を指標として運転管理を行うことが重要と考え、A₂O法の下水処理実験設備(処理水量:1m³/d)を用いた研究開発を行ってきた。これまでに、嫌気槽のORPを指標とした酢酸添加がりん除去の安定化に効果があることなどを報告した¹⁾⁵⁾。本報では、パイロットプラント実験装置(処理水量:12m³/d ~ 28m³/d)を用い、流入負荷が異なる複数の条件で通日採水を行ない、特に、一日を通したりん・窒素除去の安定化を評価した結果について述べる。

2. 実験方法

2.1 実験方法

Fig.1にA₂O法のパイロットプラント実験装置を示す。本装置は、原水槽(容量:0.13m³)、嫌気槽(容量:2.5 m³)、無酸素槽(容量:2.5 m³)、微好気槽(容量:2.5 m³)、好気槽(容量:2.5 m³×2槽)、沈殿槽(容量:5.7 m³)から構成される。微好気槽については、当初は無酸素槽として設置したが、使用した下水中のNH₄-Nの濃度変動が経時的に極めて大きいことから、アンモニア負荷上昇時の硝化安定化を図るため、微好気槽としたものである。

2004年8月から2006年2月まで連続して稼働させ処理性能を評価した。

実験は以下のように実施した。都市下水を主体とする分流式の下水处理場(現有処理能力 26,000 m³/d)の最初沈殿池越流水を実験下水として、Fig.2に示すように12m³/d ~ 28m³/dまで時間帯により水量を変動させて反応槽に供給した。このため、本条件での反応槽の総HRTは11時間~25時間まで大きく変動する。汚泥返送率は下水供給量の50%、硝化液循環量は下水供給量の150%とした。余剰汚泥は反応槽内のMLSS濃度が2,000mg/L程度と維持されるように好気槽②から定期的に引抜いた。また、通日実験中の水温は23°C~24°Cの間で推移した。

各反応槽にはORP計(指示電極Au、参照電極Ag/AgCl)、PH計、DO計、温度計をそれぞれ設置した。特に、ORP計は安定性などを評価するため、各反応槽にタイプの異なるものを複数台設置した。すなわち、嫌気槽、好気槽②には、通常のORP計と併せて、自動ブラシ洗浄装置付きORP計、自動エアジェット洗浄装置付きORP計を計3台設置した。また、微好気槽には通常のORP計と自動ブラシ洗浄装置付きORP計を設置した。また、無酸素槽には設置位置(底部、表層)の異なるORP計を2台設置した。通常のORP計については、週1回の手動洗浄を実施した。

各反応槽のORPによるパイロットプラント運転の管理/制御は以下のように行った。

嫌気槽は、同一処理場の下水を使用したベンチ実験結果²⁾⁵⁾を踏まえ、嫌気槽のORP値が制御値(-260mV)以上になった場合に、酢酸ナトリウムを酢酸として30mg/L・下水、添加する運転とした。無酸素槽ではORPによる制御は行わず、ORPの測定・記録のみとした。微好気槽、好気槽①、好気槽②では、ブロウにより常時一定量の空気を供給するとともに、ORPが設定値以下になると補助ブロウを動作させて空気量を増加させ、ORPを設定値以上に維持するように制御運転した。各好気槽のORPの制御設定値は、微好気槽で

+40mV、好気槽①で+60mV、好気槽②で+90mVとした。なお、下水の有機物濃度が低い時間帯には、ブロウによる一定量の空気吹込みのみで、ORPが設定値を超える時間帯があったが、このような場合は特に制御は行わなかった。

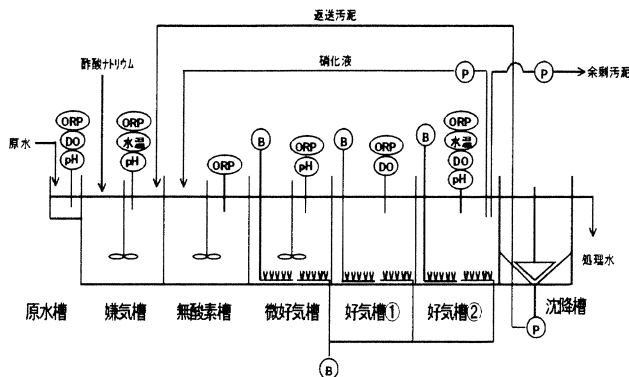


Fig.1 ORPを制御指標としたA₂O法の実験装置

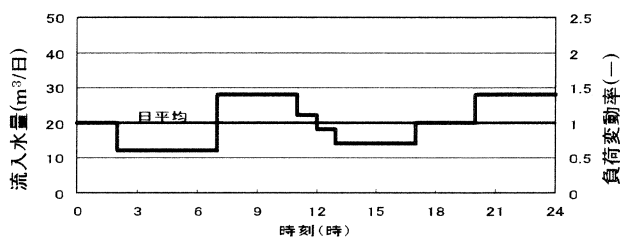


Fig.2 下水量の変動パターン

2.2 分析方法

パイロットプラントの通日調査は、RUN1を2005年5月24～25日、RUN2を2005年9月27日～28日に実施した。分析頻度は2～4時間毎に12回である。

BODはBOD自動測定装置（大倉電機製クーロメーター）により測定した。PH、COD_{cr}は、工場排水試験方法（JISK0102）に従い分析した。SSは、0.45 μmミリポアフィルターを用いた工場排水試験方法（JISK0102）に従い分析した。各槽のMLSS、MLVSSは下水試験方法に従い分析した。下水、処理水および各槽の溶解性成分は、現場でろ過（1 μm:ワットマン GF-B）した後、分析に供した。D-TOCはTOC分析装置（島津製作所製TOC-5000型）により、窒素、りんはオートアナライザー（ブランルーベ社製）により分析した。D-COD_{cr}は、0.45 μmミリポアフィルターでろ過した後、工場排水試験方法（JISK0102）に従い分析した。有機酸は0.45 μmミリポアフィルターを用いたシリンジにより加圧ろ過した後、イオンクロマトグラフにより分析した。又、活性汚泥中のりん量は、下水試験方法に準じて前処理（硝酸・硫酸分解）を行ない、T-Pを測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 各RUNの下水性状について

各RUNでの下水水質の平均値（1回/2.4h毎採取*12回採取）をTable2に示す。りん除去の観点からは下水のBO

D/T-P比は通常20～25以上が望ましいとされている。今回実験に用いた下水のBOD/T-P比は、RUN1で34、RUN2で23であり、ほぼこの条件を満たしていた。また、窒素除去の観点からは下水のBOD/T-N比は通常3以上が望ましいとされている。下水のBOD/T-N比は、RUN1で5、RUN2で3.7であり、窒素についてもほぼこの条件を満たしていた。

Table2 各RUNでの下水平均水質（mg/L）

	下水 (RUN1)	下水 (RUN2)
BOD	127	93.7
COD _{cr}	191	165
S-COD _{cr}	72.8	57.4
S-TOC	21.8	19.3
酢酸	-	6.3
SS	76.3	36.6
T-N	25.5	25.4
NH ₄ -N	19.1	17.0
NO ₂ -N	0.1以下	0.1以下
NO ₃ -N	0.1以下	0.1以下
T-P	3.70	4.0
PO ₄ -P	2.35	2.80
BOD/T-P(-)	34	23
BOD/T-N(-)	5	3.7

しかし、一方で下水中の窒素、りん濃度の1日の時間的な変動はかなり大きかった。Fig.3に窒素の経時変化、Fig.4にりんの経時変化を示す。

下水の窒素濃度は午前11時～12時頃が30から40mg/Lと最も高く、夜間から午前6時頃には10mg/L程度まで低下した。最大濃度と最小濃度の比は3倍以上あり、この傾向は、RUN1とRUN2で大きな違いは無かった。また、下水のりんについても、窒素と傾向が類似しており、午前中に高く、夜間から午前6時ごろに低くなった。また、BOD/T-P比は、RUN1とRUN2でかなり異なり、RUN2では、時間帯によっては20を下回る場合があった。

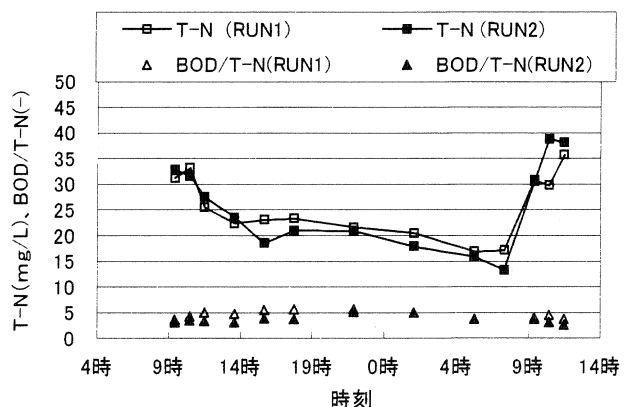


Fig.3 下水のT-N濃度、BOD/T-N比の経時変化

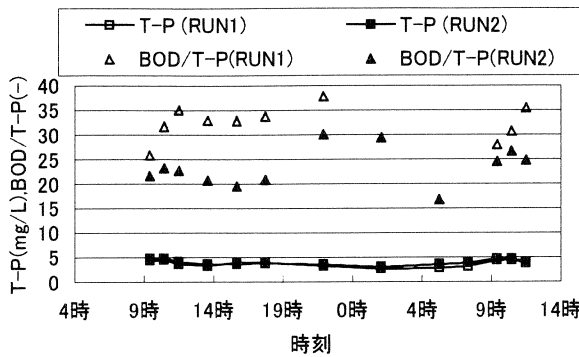


Fig.4 下水のT-P濃度、BOD/T-P比の経時変化

3.2 りん除去

(1) 嫌気槽におけるORPとりん放出

りん除去の安定化を図るため、嫌気槽のORPはできるだけ低く保つ必要があるとされている。嫌気槽におけるORPと PO_4 -Pの経時変化の例をFig.5に示す。

嫌気槽のORPは、夜間から早朝にかけて上昇、また、午前中に下降する傾向があったが、RUN1、RUN2ともに-300mVから-350mVの間で推移した。複数台のORP計で測定しても、この傾向や数値はほとんど変わらなかった。嫌気槽の制御値は、-260mVに設定していたため、嫌気槽への酢酸添加は、本実験中には行なわれなかった。嫌気槽の PO_4 -P濃度は、嫌気槽のORPと連動する傾向が見られ、RUN1、RUN2ともに午前9時頃が5mg/L前後と最も低く、ORPの低下とともに午前中に増加する傾向があった。深夜にかけ再び増加し午前2時頃に14mg/L前後とピークとなった。

嫌気槽におけるこのようなORPの時間変動には、下水や返送汚泥の水質変動が関与していると推定される。Fig.6に嫌気槽のORPと下水中の酢酸濃度、返送汚泥中の NO_3 -N濃度、嫌気槽での PO_4 -P濃度の関係を示す。この結果から、返送汚泥中の NO_3 -N濃度が、嫌気槽のORP上昇に強く関与していることが推定された。一方、下水の酢酸濃度と嫌気槽のORPには明確な関係は見られなかった。嫌気槽への流入する返送汚泥中の NO_3 -Nは、下水中の酢酸の消費を招き、 PO_4 -Pの放出を抑制するとともに、嫌気槽のORPを上昇させていると考えられる。

このように、嫌気槽のORPの時間変化は、嫌気槽に流入する下水や返送汚泥の水質の影響を総括的に示しており、嫌気槽のORP連続モニタリングは、嫌気槽のりん放出の管理指標として重要であると思われる。

3.2.2 好気槽におけるORPとりん摂取

通常、りん除去の安定化を図るためには、好気槽末端のDO値を1.5~2mg/L以上に高く保つ必要があるとされている。末端の好気槽②におけるORP、DOの経時変化をFig.7に示す。また、各槽における PO_4 -P変化をTable3に示す。RUN1とRUN2を比較すると、末端の好気槽②のDOは、RUN1では1~2mg/L、RUN2では1mg/L以下とRUN1の方が高かった。一方、好気槽②のORPはRUN1、RUN2

ともに+90mV制御であったが、RUN2の方が高く+120mVまで上昇する場合があった。RUN2ではブロウによる一定量の空気吹込みのみで、ORPが設定値を超える時間帯が多かった。処理水の PO_4 -Pは、DOが低く、ORPの高いRUN2の方が良好であった。

RUN1とRUN2で各槽でのりんの摂取傾向を比較すると、RUN2では好気槽で、かなりのりんの摂取が生じていた。Fig.8に好気槽のORPを比較して示すが、RUN2の方がRUN1よりかなり高いORP値に維持されていた。

このような結果から、好気槽のりんの摂取状況を好気槽末端のDOのみによって管理することは難しいことが推定された。好気槽においても、DOだけでなく、ORPを併用してモニタリングすることにより、りんの摂取状況を推定でき、さらに、好気槽末端のDO管理値を低減できる場合もあることが考えられる。

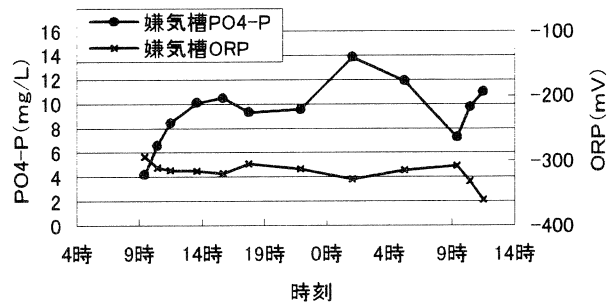


Fig.5 嫌気槽のORPと PO_4 -Pの経時変化 (RUN2)

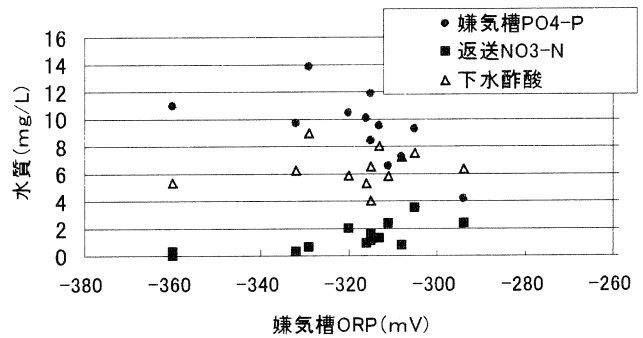


Fig.6 嫌気槽ORPと下水中の酢酸濃度、返送汚泥中の NO_3 -N濃度、嫌気槽での PO_4 -P濃度の関係 (RUN2)

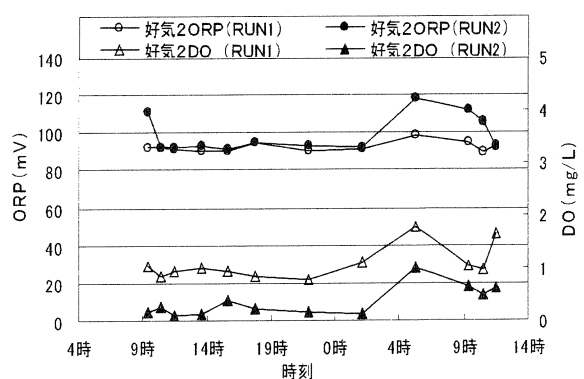


Fig.7 好気槽②におけるORP、DOの経時変化 (RUN1, RUN2)

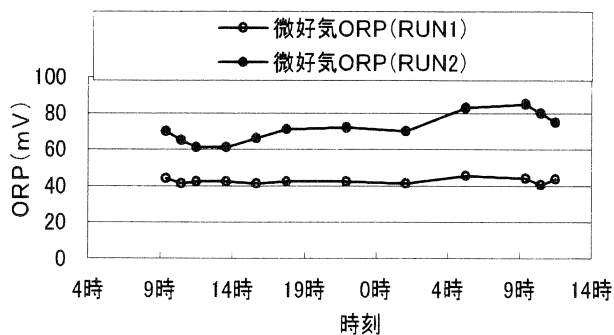


Fig.8 微好気槽におけるORPの経時変化(RUN1, RUN2)

Table3 各槽での PO_4 -P濃度の比較(平均値, mg/L)

	RUN1	RUN2
下水	2.35	2.80
嫌気槽	8.43	9.37
無酸素槽	3.27	3.01
微好気槽	1.57	0.75
好気槽①	0.79	0.15
好気槽②	0.43	0.03
処理水	0.39	0.02

3.3 窒素除去

(1) 無酸素槽におけるORPと脱窒反応

無酸素槽において、脱窒反応を進めるためにはORPが $-150\text{mV} \sim -200\text{mV}$ が望ましいことを知見している^{1)・5)}。今回の実験では、無酸素槽のORPは、RUN1、RUN2ともにほぼ -150mV 以下に維持されており、脱窒性能は良好であった。無酸素槽のORPに影響を及ぼす因子としては、嫌気槽出口水中の有機物濃度、循環水中のDO濃度、 NO_3^- -N濃度などが考えられる。Fig.9に、無酸素槽のORPと嫌気槽出口水中のS-CODcrの関係を示す。これから無酸素槽のORPは、嫌気槽出口水中のS-CODcrが高いほど低下する傾向がある。また、先にも述べたように末端の好気槽②のDOがRUN1よりRUN2の方が 1mg/L 程度低く推移したため、この循環水の影響で、RUN2の無酸素槽のORPは、RUN1よりやや低下していると思われる。このように無酸素槽のORPのモニタリングは、脱窒槽の運転状態を知る上でも有用な手段であると考えられる。

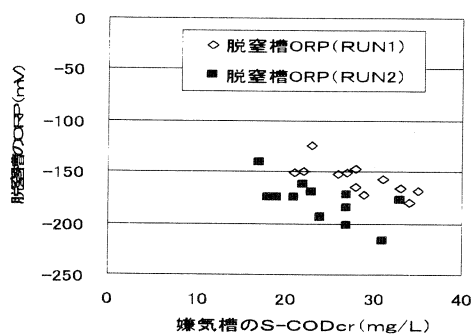


Fig.9 嫌気槽流出水のS-CODcrと無酸素槽のORPの関係

(2) 好気槽におけるORPと硝化反応

下水の NH_4^+ -Nは、RUN1、RUN2ともに夜間から早朝にかけて 10mg/L 前後と低いが、午前中に急激に増加し、12

時頃に $30 \sim 40\text{mg/L}$ に達した。また、午前中の時間帯は下水量の多い時間帯でもあるので、 NH_4^+ -Nの負荷増はより大きくなった。しかし、このような窒素の大きな負荷変動があっても末端の好気槽②ではRUN1、RUN2ともに 0.1mg/L 以下となっており、硝化反応は十分に進んでいた。先にも述べたように末端の好気槽②のDOは、RUN1では $1 \sim 2\text{mg/L}$ 、RUN2では 1mg/L 以下であり、一方、好気槽②のORPはRUN1、RUN2ともに $+90\text{mV}$ 以上に維持されていた。このように、好気槽をDOだけでなく、ORPを併用してモニタリングすることにより管理/制御する方策は、処理性能の安定化の面から有効であると思われる。さらに、好気槽末端のDO管理値を低減できる可能性も考えられる。

Table4 各槽での NH_4 -N濃度の比較(平均値, mg/L)

	RUN1	RUN2
下水	19.1	17.0
嫌気槽	11.9	10.6
無酸素槽	5.90	4.80
微好気槽	2.20	1.80
好気槽①	0.23	0.45
好気槽②	0.1以下	0.1以下
処理水	0.1以下	0.1以下

4. まとめ

ORPを指標として、 A_2O 法によるりん・窒素除去を安定化する方策を検討した。この結果、各槽のORPを経時的にモニタリングし管理/制御する方策は、りんや窒素除去の状況を推定することができ、りん・窒素除去安定化や省エネルギー化のために有効であることを確認した。

【参考文献】

- 1) 三木 理、加藤敏朗、當間久夫、栗田建紀(2003) ORP管理 A_2O 法による窒素・りん除去の安定化、第40回下水道研究発表会講演集、730-732
- 2) 加藤敏朗、三木 理、糸川浩紀、村上孝雄(2004) ORPによる窒素・りん除去プロセスの管理/制御手法の開発、第41回下水道研究発表会講演集、816-818
- 3) 加藤敏朗、高橋直哉、三木 理、糸川浩紀、村上孝雄(2005) 嫌気槽のORP制御による生物学的りん除去の安定化の検討、第39回日本水環境学会年会、495
- 4) 加藤敏朗、三木 理、高橋直哉、瀬戸口浩、山里昌春、糸川浩紀、村上孝雄(2005) 下水高度処理の管理に適したORPセンサーの開発、第42回下水道研究発表会、798-800
- 5) 三木 理、加藤敏朗、高橋直哉、糸川浩紀、村上孝雄(2005) りん除去安定化のためのORPによる酢酸添加制御、第42回下水道研究発表会、801-803
- 6) 高橋直哉、三木 理、加藤敏朗、糸川浩紀、村上孝雄(2005) ORPによる窒素・りん高度処理安定化と省エネ効果の検証、第42回下水道研究発表会、804-806

【共同研究者】

新日本製鐵(株): 栗田建紀、當間久夫; 東亜ディーケーケ(株): 瀬戸口浩、山里昌春; 日本ガイシ(株): 岡本裕三、甘道公一郎、松原極; 富士電機システムズ(株) 森岡崇行/ 富士電機アドバンストテクノロジー(株) 古屋勇治