

ORP 計を用いた硝化脱窒制御の実験的検討

○小原 卓巳¹, 山中 理¹

堤 正彦¹, 本木 唯夫²

¹. (株)東芝 電力・産業システム技術開発センター 社会システム開発部

². (株)東芝 社会インフラシステム事業部 公共システム技術第二部

概要: 本論文では、高度処理プロセスの制御検討のために試作したパイロットプラント(循環式硝化脱窒プロセス)を対象に、窒素除去を目的として、DO計、ORP計を用いた自動制御について検討を行った。硝化に関しては、PIコントローラによるDO制御(曝気風量制御)を実施したところ、DO値を一定に保つことができ、センサが正常である場合、硝化は十分に行われていた。一方、脱窒に関しては、ORP計を利用した炭素源注入量のPID制御により無酸素槽のORPを-50mV付近に保つことが可能となり、本制御を導入することにより窒素除去性能が向上した。本方式のメリットは、比較的安価で維持管理が容易なORP計のみより炭素源注入量を決定できるという点である。

キーワード: ORP計、水質制御、窒素除去、硝化脱窒プロセス、炭素源注入

1. はじめに

近年、閉鎖性水域の富栄養化の問題よりその原因物質である窒素、リンの排出を抑制する必要性が生じており、これに対応するために下水処理場では様々な高度処理プロセスの導入が進んでいる。しかしながら、現状このようなプロセス変更などのハード面の対策は実施されているものの、ソフト面の対策はあまり実施されていない。下水処理プロセス上の機器(ポンプ、ブローア、弁)を自動制御技術により適切に運転管理することによって、良好な水質を得ることが可能であると考えられる。本稿では、試作したパイロットプラント(循環式硝化脱窒プロセス)にて、曝気風量制御、炭素源注入量制御を行い、ORP計を用いた硝化脱窒プロセスの制御方法に関する知見を得たので報告する。

2. 対象プロセスと方法

実験は図1に示すパイロットプラントで行った。プロセスは図1に示すような循環式硝化脱窒プロセスに、炭素源貯留槽(グルコース 6700mg/L 溶液)を有するプロセスである。パイロットプラントの仕様を表1に示す。

このプロセスにおいては、後段の好気槽で硝化が行われ、前段の無酸素槽にて脱窒が行われる。化学反応式を(1)式~(3)式に示す。今回は炭素源としてグルコースを利用したので、脱窒の水素供与体としてグルコースを使用した場合の化学反応式を示す。

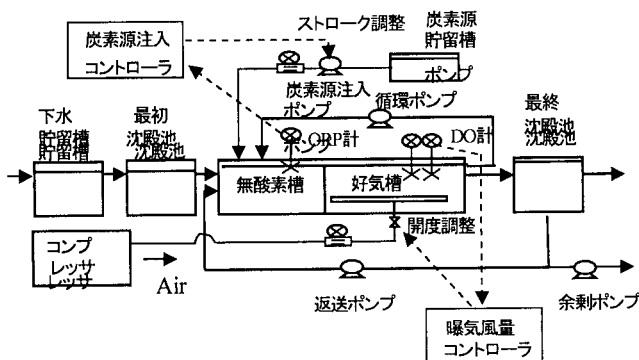
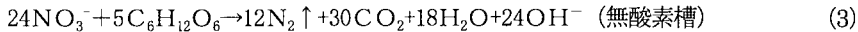


図1 パイロットプラントプロセスフロー



本プロセスの操作端として、循環ポンプ、返送ポンプ、余剰ポンプ、炭素源注入ポンプの回転数又はストローク数と曝気電動弁の開度を調整できる。(1) 式、(2) 式で示すように硝化のコントロール因子としては、好気槽への酸素の供給、(3) 式で示すように脱窒のコントロール因子として、無酸素槽への炭素源の供給が重要な因子であることがわかる。よって、今回は曝気風量をコントロールすることにより、硝化の制御を行い、炭素源注入量のコントロールを行うことによって脱窒の制御を行った。循環量、返送量については、水処理実験期間中は一定量とし、余剰引抜量は A-SRT が 10 日程度になるよう 1 回/2 週の頻度で変更を行った。パイロットプラントの運転条件を表 2 に示す。また、実験期間中の流入水質について表 3 に示す。

表1 パイロットプラント仕様

	容量
最初沈殿池	0.75m×0.75m×1m
無酸素槽	0.75m×0.98m×1m
好気槽	0.75m×1.47m×1m
最終沈殿池	0.35m ³

表2 運転条件

HRT	12h
A-SRT	10日
硝化液循環比	200%
返送汚泥比	50%
反応槽MLSS	2000mg/L

表3 流入水質(mg/L)

	CODMn	TOC	T-BOD	T-N	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	PO ₄ -P
平均	79	43	87	37	27.2	0.20	0.02	1.78
最大	93	61	140	40	34.2	2.70	0.20	2.80
最小	46	24	76	35	24.8	0.01	0.00	0.40

実験手順としては、まず、ORP、DO と窒素成分濃度 (NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N) の関係を把握した。次に操作量(風量、炭素源投入量)をステップ変動させた場合の ORP 計、DO 計の応答波形をとり、その結果をもとにコントローラ的设计を行い、実証試験を行った。

3. 結果

3.1 窒素成分と ORP、DO の相関関係

2001 年 10 月 3 日~10 月 31 日の 1 ヶ月間、日 1 回朝 9 時に、無酸素槽、好気槽の水をサンプリングし、ORP と水質 (NO₂-N、NO₃-N、NH₄-N、DO、pH) を分析しその関係を調べた。

無酸素槽の ORP と NO₂+NO₃ 濃度の関係を図 2 に示す。

図 2 より無酸素槽 ORP が高い (+50mV 以上) 場合には、無酸素槽の NO_x-N 濃度が大きくなっていることがわかる。逆に -50mV 以下であれば、無酸素槽に NO_x-N はほとんど存在しなかった。尚、無酸素槽の DO は 0.1mg/L 以下で pH は 7~7.2 の間で推移していた。次に図 3 に好気槽 ORP と好気槽 NH₄-N の関係について示す。ORP が 120mV 以上であれば、NH₄-N は 0.5mg/L 以下に処理できており、80mV 以下である場合、硝化が不十分であることが把握できた。又、本期間中(10 月 3 日~31 日)は DO が 1mg/L 以上であれば、NH₄-N を 0.5mg/L 以下に処理できていた。本実験結果をもとに無酸素槽の ORP の目標値 -50mV とした。好気槽の ORP については、120mV にするのが望ましいと考えられた。

3.2 曝気風量制御

曝気風量を 10L/min→15L/min→20L/min と変動させた場合の、DO、ORP の変化を図 4 に示す。曝気風量の増大とともに、DO、ORP とともに増大したが、曝気風量の増減に対する感度という点で、DO 計が優れていたため、DO 制御により硝化制御を行うことにした。使用したコントローラは PI コン

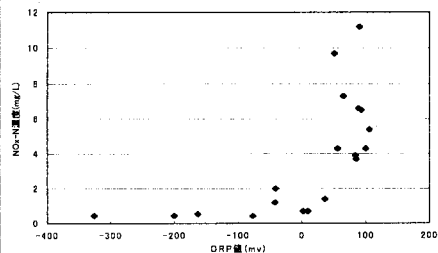


図 2 無酸素槽 ORP と無酸素槽 NO_x-N の関係

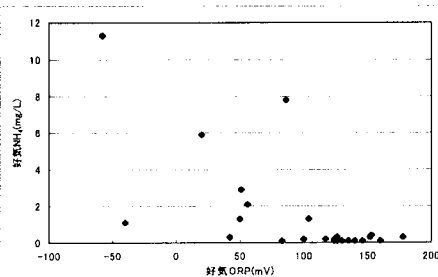


図 3 好気 ORP と好気 NH₄-N の関係

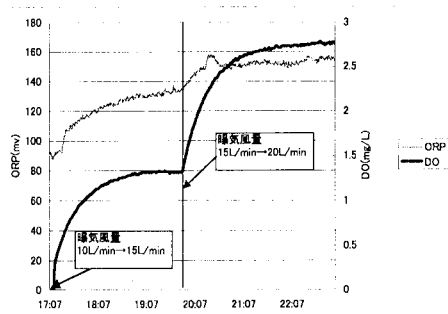


図 4 風量ステップ応答試験結果

トローラである。目標 DO 値を 2.5mg/L とした DO 制御を行った結果の一部が図 5 である。図 5 に示すように PI コントローラにより DO 値を 2.5mg/L に保つことができ、この間、処理水のアンモニア性窒素は 0.3mg/L 以下でうまく硝化も起こっていた。ただし、図 6 に示すように DO 計の異常により DO 計計測値が実際の DO と異なる値（実際の DO は低く、2/12 の地点では 0.7mg/L であった。）を示す場合、その計測値を基に制御が働くため、風量が低下し、硝化に必要な風量が確保できなくなり処理水の NH₄-N 濃度が悪化した。このように DO 制御を行う際においては DO 計の信頼性が重要で、ORP 値は曝気風量過不足の判断基準となり得る可能性があるため、現在 DO 制御の異常診断用に ORP 計を利用することを検討中である。

3.3 炭素源注入量制御

炭素源投入槽に蓄えられたグルコース 6700mg/L 溶液の注入量を 0→0.03→0L/min と連続的に on-off させた場合の ORP 計計測値の変化を図 7 に示す。炭素源投入後、数時間 ORP 値に変化はなく、時間遅れをもって急激に ORP 値は低下した。この遅れ時間は 30 分～6 時間と一様ではなかった。また、炭素源をオフにすると、時間遅れをもって ORP は上昇した。ORP と NO_x-N の時間変化を見ると図 7 のような関係があり、炭素源投入開始とともに NO_x-N は徐々に低下したが ORP 値に変化はなく、NO_x-N が 0.7mg/L 以下となったところで ORP 値が急激に低下した。この実験により、炭素源を投入すれば①脱窒が促進し、無酸素槽の NO_x-N が低下すること、②脱窒が十分すすみ硝酸濃度がある閾値以下に達した場合に ORP 値が急低下することを把握できた。2/3～4/28 の約 2 ヶ月及び 6/15～6/20 の一週間、ORP 目標値を -50mV とした炭素源投入制御を実施した。コントローラとしては、PI コントローラ、PID コントローラ、Dahlin が提唱した無駄時間コントローラ¹⁾を採用した。結果、ORP の目標値追従性の点においては既報²⁾に記した通り、(4)～(5) 式に示す PID コントローラが最も優れていた。これは、ORP は図 8 に示すように硝酸濃度がある濃度以下になったところで、急激に増減する特性があり、他の二つのコントローラと異なり、ORP 計測値の変化に対応できる微分成分 ((4) 式の第 3 項) を PID コントローラが含むためである。

$$MV_{\text{carbon}} = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int edt + T_D \frac{de}{dt} \right) + MV_0 \quad (4)$$

$$e = SV_{\text{ORP}} - PV_{\text{ORP}} \quad (5)$$

MV_{carbon}: 炭素源注入量、K_p: 比例ゲイン (<0)、T_i: 積分定数、T_D: 微分定数、e: 偏差、MV₀: 操作量初期値、SV_{ORP}: ORP 目標値、PV_{ORP}: ORP 計測値

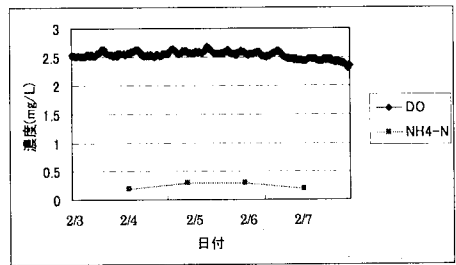


図 5 DO 制御実施例

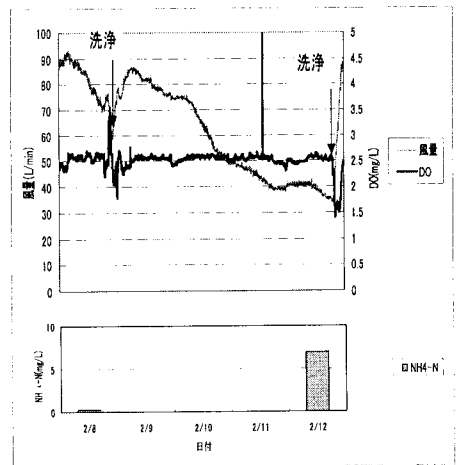


図 6 DO センサ異常による風量不足例

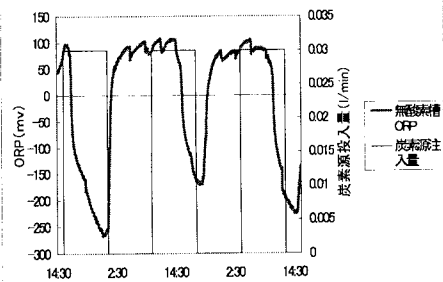


図 7 炭素源投入量ステップ変化時の ORP 値の変化

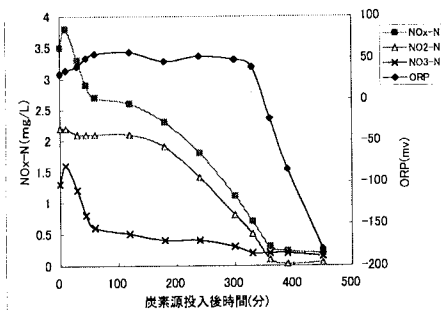


図 8 炭素源投入時の ORP と NO_x-N の推移

ただし、ORP 値が +50mV 以上である場合、図 7 に示すように $\text{NO}_x\text{-N}$ は減少しているにもかかわらず、ORP 値は変化しない。この場合、ORP 値の誤差を積算していくのは得策ではなく、積分器 ((4) 式の第 2 項) はあまり働かせない方がいいといえる。また、逆に ORP

値が -150mV 以下である場合、微分器 ((4) 式の第 3 項) を働かせると ORP 値の多少の上昇にも炭素源を投入する方向に制御が働き過剰注入になる上、ORP 値がさらに低下し目標値である -50mV に到達しなくなってしまう。よって、ORP が +50mV 以上の場合には積分器の働きを弱め、ORP が -150mV 以下では微分器が働かないよう PID パラメータを調整し、PID 制御を行った結果、図 9 に示すように比較的安定して ORP を目標値付近にコントロールすることが可能となった。

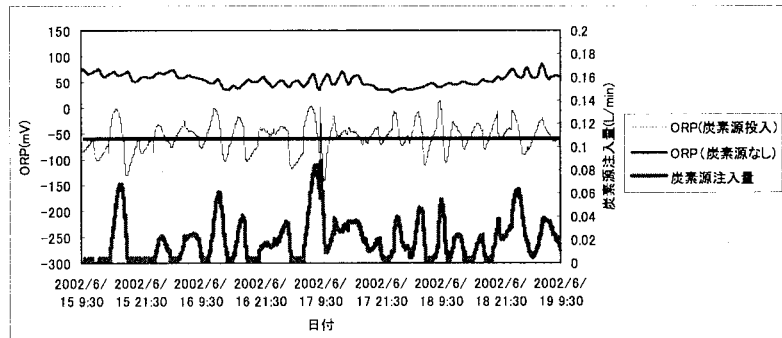
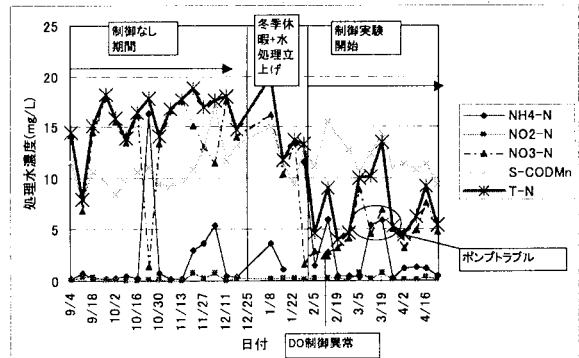


図 9 炭素源注入量実験結果

3.4 窒素除去性能

処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、T-N の推移を図 10 に示す。図 10 に示すように制御実験前の処理水質は、T-N が約 15mg/L であったが、制御実験期間中は返送ポンプトラブルによる硝化悪化時以外は処理水の T-N を 10mg/L 以下にすることができた。 COD_{Mn} については、制御実験前後で大きな差はなく、炭素源を投入することにより、処理水の有機物濃度が悪化することはなかった。



4. まとめ

弊社実験プラントにて ORP 計を用いた硝化脱窒制御について、実験を行い以下の知見を得た。

- ①硝化に関する風量制御については、DO 計の方が風量の変動に対する感度は高い。PI コントローラにより DO 値を目標値付近に保つことは可能であり、センサが正常である場合においては、DO 制御によりアンモニア性窒素を低く保つことが可能であった。DO 制御を行う際にはセンサの信頼性が重要であり、信頼性向上のために ORP 値により DO 制御の異常診断を行うことを検討中である。
- ②脱窒に関する炭素源注入量制御については、PID パラメータを ORP の値によって変更することによって、安定して ORP を目標値付近にコントロールすることが可能となり、処理水 T-N の改善を図ることができた。

参考文献

- 1) F. G. Shinsky : PID-deadtime control of distributed process, preprint of the IFAC PID2000 Workshop (2000)、p. 14-p. 18
- 2) 小原卓巳、山中理、本木唯夫 : ORP 計を用いた炭素源投入制御による窒素除去の実験的検討、第 38 回下水道研究発表会 (2002)