

<研究発表>

IWA活性汚泥モデルを用いた曝気風量制御における安定性評価

河合富貴子<sup>1</sup>, 中沢親志<sup>1</sup>, 福山良和<sup>1</sup>, 上野隆史<sup>2</sup>

<sup>1</sup>富士電機アドバンステクノロジー(株) 情報通信制御部(〒191-8502 日野市富士町1 E-mail: kawai-fukiko@fujielectric.co.jp)

<sup>2</sup>富士電機システムズ(株) 環境システム本部(〒191-8502 日野市富士町1)

概要

本論文は、高度下水処理プロセスの評価が可能であるIWA(International Water Association)活性汚泥モデルと溶存酸素計を用いて、アンモニア性窒素濃度を推定する曝気風量制御を提案し、その安定性評価を行った。安定性評価には、アンモニア性窒素計を用いた曝気風量制御を、提案方法の比較対象とした。制御系のボード線図、外乱応答のシミュレーションによる評価を行った結果、溶存酸素計による制御の方が安定であることを確認した。

キーワード: 下水処理, ASM, 曝気風量制御, PID制御, 安定性

1.はじめに

下水処理プロセスでは、活性汚泥と呼ばれる微生物群の反応を利用して、下水中に含まれる有機物の除去を行っている。有機物に加え、窒素・りんを除去することを目的としたプロセスは、高度下水処理プロセスと呼ばれている(Fig.1 参照)。近年、下水道法改正により、窒素・りんの排出規制の強化が進められており、高度下水処理プロセスの評価が可能であるIWA(International Water Association)活性汚泥モデル<sup>1)</sup>を活用した制御技術が提案されている<sup>2)~6)</sup>。特に下水処理場の消費電力の大半を占める曝気風量制御に着目すると、溶存酸素濃度やアンモニア性窒素濃度を制御量として、曝気風量を制御する方法が提案されている<sup>7)8)</sup>。しかし、アンモニア性窒素計を用いた制御方法は、計測器が高額でメンテナンスも大変な上に、計測周期が15分以上かかる。このため、コスト面や管理者の負担、計測遅れによる制御の劣化が懸念される。これに対し、筆者らはASM1(Activated Sludge Model No.1)と、安価かつメンテナンスが簡単、計測周期の短い溶存酸素計を用いた曝気風量制御の検討を進めてきた<sup>9)10)</sup>。本論文では、提案方法の安定性について検討したので報告する。

2.モデルの定式化

2.1 一般式

モデルは、消費電力量の大きい曝気槽に着目し、IWAによって提案されたASM1をもとに作成した。モデルの作成手順を以下に示す。

- ①微分方程式(ASM1:13本の微分方程式)
- ②ASM1を用いて定常値の計算
- ③ASM1の低次元化(13次→2次)
- ④ASM1の線形化

13本の微分方程式から構成されるASM1から、曝気風量と窒素除去に関する変数である、溶存酸素濃度とアンモニア性窒素濃度の微分方程式を選出した。溶存酸素濃度とアンモニア性窒素濃度以外の変数の定常値を、選出した2本の微分方程式に代入し2次元化を行う。2次元化した微分方程式を、定常値近傍におけるマクローリン展開(テイラー展開)し、線形化を行う。2次元・線形化によって得られた微分方程式を以下に示す。

$$\Delta \dot{x}_1 = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial f_1}{\partial u} \Delta u \quad (1)$$

$$\Delta \dot{x}_2 = \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Delta x_2 \quad (2)$$

ここで、 $f_1$ :溶存酸素濃度の微分方程式、 $f_2$ :アンモニア性窒素濃度の微分方程式、 $x_1$ :溶存酸素濃度(mg/L)、 $x_2$ :アンモニア性窒素濃度(mg/L)、 $\Delta x_1$ :定常値近傍における溶存酸素濃度の差分(mg/L)、 $\Delta x_2$ :定常値近傍におけるアンモニア性窒素濃度の差分(mg/L)、 $\Delta u$ :定常値近傍における曝気風量の差分(m<sup>3</sup>/日)とする。

2.2 定式化例

標準的な運転点近傍において2次元・線形化を行ったモデルを導出する。標準的な運転点は、以下とした。

流入水量を6889 m<sup>3</sup>/day, COD<sub>Cr</sub>を671 mg/L, 全窒素

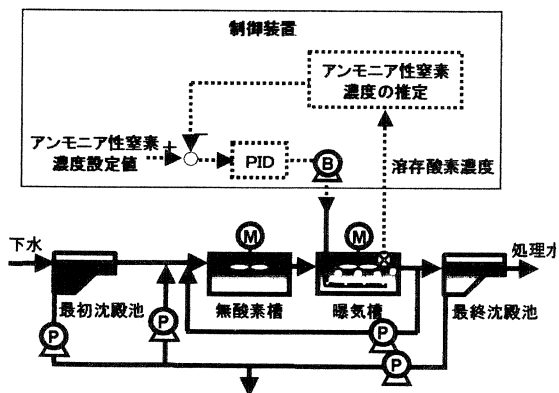


Fig.1 An advanced wastewater treatment system and a control system.

を 61.7 mg/L, 水温を 20°C に固定し, モデルのパラメータは IWA によって提案されたデフォルト値を用いた。曝気風量は 200000m<sup>3</sup>/日に設定し, 1000 日間シミュレーションした値を運転点とした。これらの条件より得られた微分方程式を以下に示す。

$$\Delta \dot{x}_1 = -113\Delta x_1 - 110.4\Delta x_2 + 538\Delta u \quad (3)$$

$$\Delta \dot{x}_2 = -3.07\Delta x_1 - 35.4\Delta x_2 \quad (4)$$

### 3. PID 制御系設計

#### 3.1 溶存酸素計による PID 制御系設計

(3), (4) 式を用いて, 制御量を溶存酸素濃度偏差, 操作量を曝気風量偏差とした PID 制御系を設計した。PID 制御系のブロック線図を, Fig.2 に示す。溶存酸素計を用いた PID 制御は, 制御量が溶存酸素濃度偏差であるため, 設定値であるアンモニア性窒素濃度偏差に換算する係数 (-11.55) を導入した。また, 一般的な溶存酸素計の計測周期は約 1 分であることから, 計測遅れはないものとした。

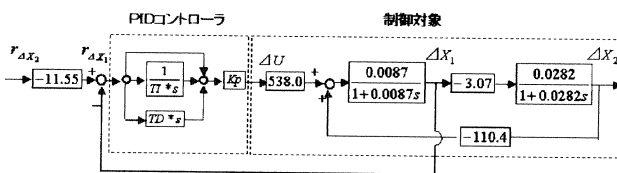


Fig.2 The proposed PID control system with a dissolved oxygen meter.

#### 3.2 アンモニア性窒素計による PID 制御系設計

比較対象として, 制御量をアンモニア性窒素濃度偏差, 操作量を曝気風量偏差とした PID 制御系を併せて設計した。PID 制御系のブロック線図を, Fig.3 に示す。アンモニア性窒素計は, 計測周期が 15 分以上であることから, 計測遅れとして無駄時間を 15 分とした。

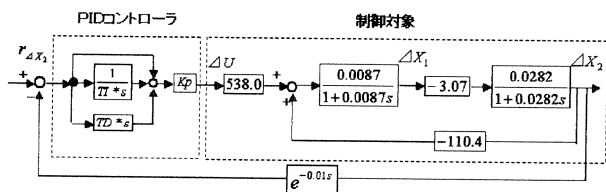


Fig.3. PID control system with an ammonium nitrogen meter.

#### 3.3 パラメータチューニング

2 つの制御系における PID パラメータの最適化には, MATLAB/Simulink Response Optimization Toolbox を用いた<sup>11)</sup>。時間軸におけるステップ応答波形が, 設定したアンモニア性窒素濃度の上下限值に収束するように制約条件を決め, パラメータチューニングを行った。

## 4. シミュレーション例

### 4.1 設定値応答

最適化により得られた 2 つの PID パラメータを用いて, 設定値応答のシミュレーションを実施した。結果を Fig.4 に示す。アンモニア性窒素濃度の設定値を  $\triangle -0.1$ mg/L, 整定時間を 0.1 日に設定した際, 溶存酸素計による制御の時定数は 0.03 日, アンモニア性窒素計による制御の時定数は 0.025 日とほぼ同等の制御性能が得られた事がわかった。

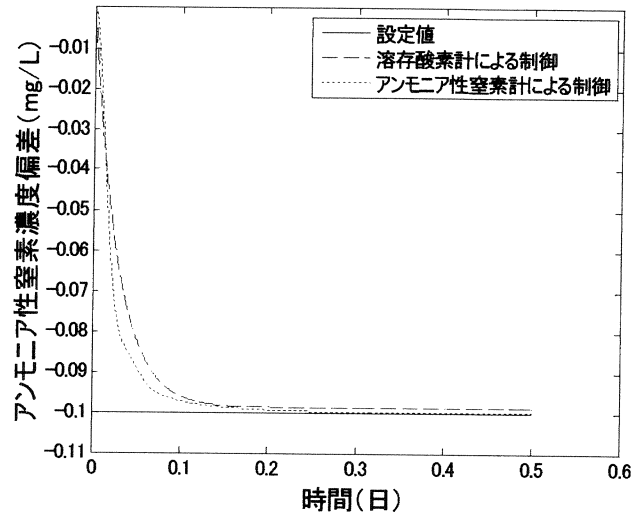


Fig.4 Set point response of the two control systems to the concentration of ammonium nitrogen.

### 4.2 外乱応答

設定値応答のシミュレーション条件と同様, アンモニア性窒素濃度の設定値を  $\triangle -0.1$ mg/L, 整定時間を 0.1 日とした。0.2 日より 0.05mg/L アンモニア性窒素濃度の入力外乱を加えて, 外乱応答のシミュレーションを行った。その結果を, Fig.5 に示す。アンモニア性窒素計による制御は, 外乱による影響を受け, 最大 8% のオーバーシュートが発生した。それに対して溶存酸素計による制御は, わずか

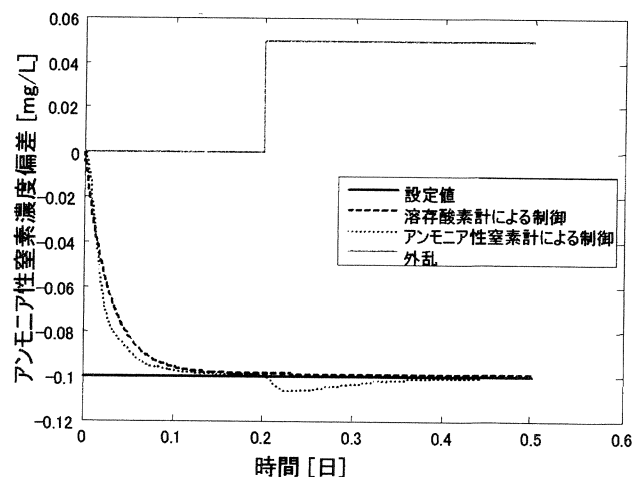


Fig.5 Disturbance response of the two control systems to the concentration of ammonium nitrogen.

0.05%のオーバーシュートであった。

これより、溶存酸素計による制御の方が外乱に対する目標値追従が良いことがわかった。

### 4.3 ボード線図による安定性評価

4.2 より、溶存酸素計による制御の方が、外乱に対して安定であることがわかった。ここで、制御系の安定性を評価するために一巡伝達関数のボード線図を作成した (Fig.6 参照)。溶存酸素計による制御系の位相余裕は 90.8deg, アンモニア性窒素計による制御系のゲイン余裕は 7.1dB, 位相余裕は 54.5deg であった。これより、溶存酸素計による制御の方が、より安定であることを確認した。

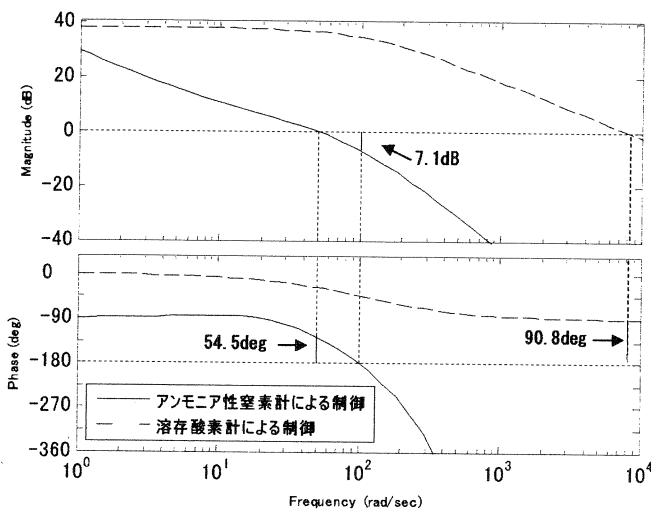


Fig.6 Bode diagram of open-loop transfer function.

### 4.4 アンモニア性窒素計による制御の安定限界

計測遅れを 15 分から徐々に長くし、アンモニア性窒素計を用いた制御系の安定限界を求めた。その結果を、Fig.7 に示す。計測遅れが 42 分以上の時、ゲイン余裕がなくなり不安定となることを確認した。従って、アンモニア性窒素計を用いた制御系においては、安定性を保つため

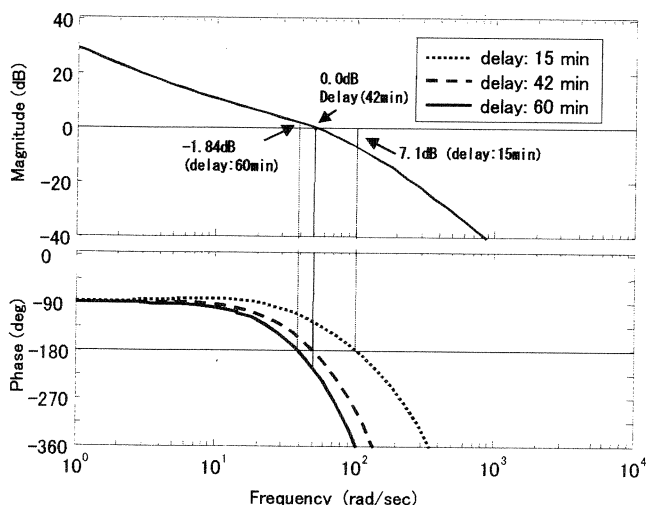


Fig.7 A stability limit of an aeration control with an ammonium nitrogen meter.

に計測周期を 42 分以内にすることが必要である。

## 5.あとがき

本論文は、高度下水処理プロセスの評価が可能である IWA(International Water Association)活性汚泥モデルと溶存酸素計を用いて、アンモニア性窒素濃度を推定する曝気風量制御を提案し、その安定性評価を行った。アンモニア性窒素計を用いた制御を比較対象とした。その結果、以下の知見が得られた。

- ・ 設定値応答のシミュレーションによる評価を行った結果、溶存酸素計による制御とアンモニア性窒素計による制御はほぼ同等の制御性能である。
- ・ 外乱応答のシミュレーションによる評価を行った結果、溶存酸素計による制御の方が安定である。
- ・ 一巡伝達関数のボード線図を用いて、制御系の安定性評価を行った結果、溶存酸素計による制御の方が位相余裕、ゲイン余裕共に高く、安定である。
- ・ アンモニア性窒素計を用いた制御では、制御周期が 42 分以上になると安定限界を超える。

以上の結果より、提案方法の安定性をシミュレーションにより確認した。今後の課題は、実データを用いた提案方法の有効性検証である。

### 【参考文献】

- 1) 味埜, 活性汚泥モデル, 環境新聞社, (2005)
- 2) H. Aschemann et al., Interval Analysis and Nonlinear Control of Wastewater Plants with Parameter Uncertainty, IFAC, (2005)
- 3) Hiroshi Ito, Dissipative Control with Estimation for Biological Wastewater Treatment Plants Based on Entire Nonlinear Process Models, SICE, (2003)
- 4) Ilse Y. Smets et al., Linearization of the activated sludge model ASM1 for fast and reliable prediction, *Water Research*, Vol.37, Issue 8, (2003)
- 5) Rudiger Lunde, Peter Dnnenmann, Information Retrieval from Mathematical Models for Process Optimization in Waste-Water Treatment, Proceedings of the 12th International Symposium "Computer Science for Environmental Protection" of Gesellschaft für Informatik, Bremen, 1998, Metropolis Verlag, Marburg, (1998)
- 6) Stefan Weijers, Modeling, Identification and Control of Activated Sludge Plants for Nitrogen Removal, <http://alexandria.tue.nl/extra2/200011598.pdf>, (2000)
- 7) 足利 他: マルチ制御モード方式による曝気風量制御, *EICA*, Vol.9, No.2, pp19-22, (2004)
- 8) 古川 他: 硝化制御による曝気風量の節減, *EICA*, Vol.7, No.2, pp39-42, (2002)
- 9) 河合, 中沢, 福山, 上野: IWA 活性汚泥モデルを用いた

溶存酸素計による曝気風量制御, H18 年電気学会全国大会予稿集, (2006)

- 10) 河合, 伊藤, 中沢, 福山, 上野: 高度下水処理プロセスにおけるコストダウン型曝気風量制御, 第 50 回システム制御情報学会研究発表講演会 講演論文集, (2006)
- 11) Math Works, Simulink Response Optimization User's Guide Version2, The Math Works, Inc., (2004)