

## 下水二次処理水のオゾン注入量制御に関する研究

○野口 寛\*、清水公一\*、佐藤茂雄\*

\* (株)明電舎 製品開発研究所  
品川区大崎2-1-17

### 概要

下水二次処理水を対象とした連続式オゾン処理実験プラントにおいて、プロセスの特性を伝達関数モデルで同定し、その結果をもとに排オゾン濃度一定制御、溶存オゾン濃度一定制御の単純フィードバック制御系の理論的な設計を行った。さらに、溶存オゾン濃度一定制御にUV値フィードフォワード制御を組み合わせた複合制御、および吸収効率一定制御を構築した。いずれの制御でも安定した制御系が実現できており、本設計法の有用性が示された。検証試験として、フミン酸および亜硝酸の原水中への投与による水質変動試験を行い、各制御系の制御性能を比較した。併せて、実処理水変動での連続運転試験の結果を示した。

### キーワード

オゾン、制御、モデル

## 1. はじめに

近年、オゾン発生機および接触方式の研究・開発の進歩とともにオゾン処理コストの低減化が進み、水処理へのオゾンの適用事例が増えつつある。オゾンを効率的に利用し、安定した処理効果を得るには、水質変動に応じたオゾン注入量制御が必要である。プラントの特性が明らかになれば、オゾン注入量制御系の理論的な構築が可能となり、さらに種々のプロセス値の演算による制御も可能となる。本研究では、下水二次処理水を対象とした連続式オゾン処理実験プラントにおいて、同定したプラント特性からオゾン注入量制御系の理論的な構築を行い、その制御性能の検証を行ったので報告する。

## 2. 制御システムの設計

### 2.1 オゾン処理実験プラントの構成

図1にオゾン処理実験プラントの構成を示す。有効容積300L(直径286mm、高さ4650mm)の気液向流式の接触槽において下水二次処理水とオゾンガスとを接触させた。オゾン発生機では、ガス流量一定の条件下で外部からの操作信号によりオゾン濃度を变化させ、オゾン注入量を制御した。溶存オゾン計は接触槽と調整槽の間の上向流中に設置した。実験はすべて液流量30L/分、ガス流量25L/分(液ガス比1.2、滞留時間10分)で行った。

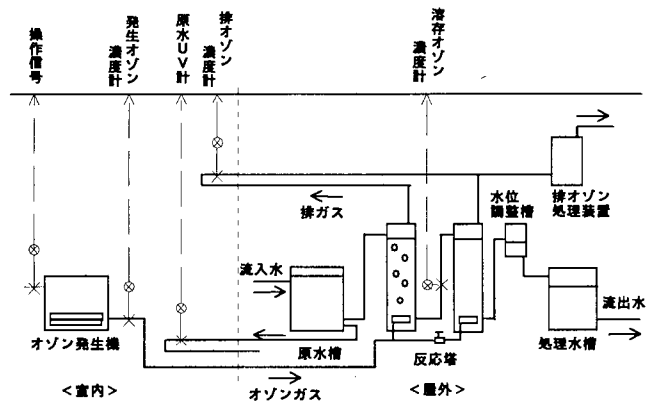


図1 オゾン処理実験プラントの構成

### 2.2 プロセスのモデリング

プロセスのモデリングでは、装置内の現象をブ

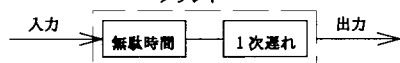


図2 プロセスのモデリング

ラックボックスとして、入出力データの特徴を伝達関数で表現する手法を用いた。つまり、オゾン発生への操作信号を入力とし、①発生オゾン濃度②排オゾン濃度③溶存オゾン濃度をそれぞれ出力として、ステップ応答法により入出力関係を“無駄時間+一次遅れ”の伝達関数に近似した(図2)。このとき、プロセスの伝達関数は次式で表される。

$$G_p(s) = \frac{K \cdot e^{-Ls}}{1 + Ts} \quad (1)$$

ただし、Lは無駄時間(秒)、Kはゲイン、Tは時定数(秒)である。オゾン処理プラントの同定結果を表1に示す。無駄時間は発生オゾン、排オゾン、溶存オゾンでそれぞれ39秒、165秒、100秒で、排オゾンが最も大きかった。時定数は発生オゾン濃度で最も小さく、排オゾンと溶存オゾンで同程度であった。

表1 オゾン処理プラントの同定結果

	無駄時間 L (秒)	ゲイン K	時定数 T (秒)
①発生オゾン濃度	39	5.27	38.3
②排オゾン濃度	165.0	6.45	153.8
③溶存オゾン濃度	100.0	3.23	175.4

### 2.3 制御系の設計

#### (1)単純フィードバック制御

同定したプロセスの伝達関数をもとに、排オゾン濃度一定制御および溶存オゾン濃度一定制御の単純フィードバック制御系を設計した。制御フローを図3に示す。PIパラメータは、極相殺法により63%応答時間が無駄時間の2倍に等しくなるように決めた。設計値を表2に示す。ただし、表2の応答時間は無駄時間を含めた値である。設計値では、排オゾン、溶存オゾンの応答時間はそれぞれ約8分、5分で、排オゾンの方が長くなっている。

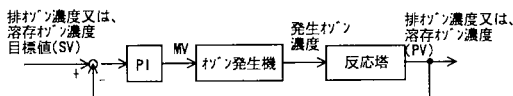


図3 単純フィードバック制御の制御フロー

表2 PIパラメータの設計値

	応答時間 (秒)	Kp (-)	Ti (秒)
排オゾン一定制御	495	0.0723	152.9
溶存オゾン一定制御	300	0.2718	176.0

\* 伝達関数:  $G_c(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i \cdot s})$

極相殺法で設計したフィードバック制御系の安定性を評価する目的で、目標値(SV)のステップ変動に対する制御量(PV)の応答を調べた。排オゾン濃度一定制御、溶存オゾン濃度一定制御での応答波形を図4に示す。両者ともに安定した応答が得られている。応答波形から整定時間(制御量が一定になるまでの時間)を求めると、排オゾン濃度一定制御、溶存オゾン濃度一定制御でそれぞれ26分、7.5分であった。

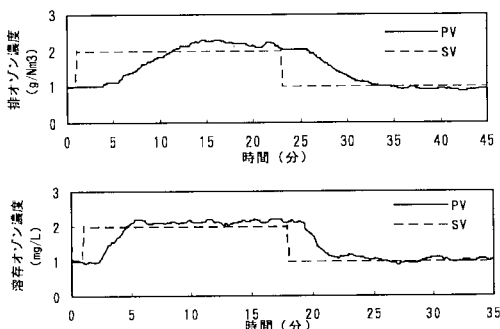


図4 制御系の安定性試験の結果

#### (2)フィードバック/フィードフォワード複合制御

溶存オゾン濃度一定制御の単純フィードバック制御では、水質などの急激な変動には対応できず、溶存オゾンの一時的な低下あるいは上昇が起こる可能性がある。(ただし、本プラントでは溶存オゾン濃度一定制御の応答時間は7.5分であり、通常の二次処理水の時間単位の変動には十分対応できると考えられる。)ここでは、モデルケースとして分単位で水質の変動にも対応できるように、流入水のUV値(波長254nmにおける吸光度)によるフィードフォワード制御と溶存オゾン濃度一定制御のフィードバック制御を組み合わせた複合制御を構築した。その制御フローを図5に示す。PIパラメータは単純フィードバックの場合と同じである。UV値の変動が溶存オゾンに影響するまでに時間遅れがある。フィードフォワード部分に進み遅れ補償を入れることにより、UV値変動による一時的な溶存オゾンの上昇・低下を防ぐことができ、より安定した制御が実現できる。

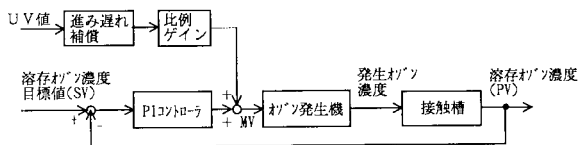


図5 溶存オゾン濃度一定制御+UV値フィードフォワード制御の制御フロー

#### (3)吸収効率一定制御

下水用オゾン処理設備ではメンテナンスの簡便性から気相オゾン濃度計で制御運転をするこ

とが多い。そこで、気相オゾン濃度計だけを用いた制御系の例として吸収効率一定制御を構築した。理論的には吸収効率一定制御の方が排オゾン一定制御より処理水質が安定する<sup>1)</sup>。図6に制御のフローを示した。複数のプロセス値を用いて演算する場合には時間遅れの相違が問題となる。吸収効率一定制御の場合には、発生オゾン濃度から吸収効率演算の間に遅れ補償を入れて、吸収効率演算のところでの発生オゾンと排オゾンの遅れ特性が一致するように設計した。

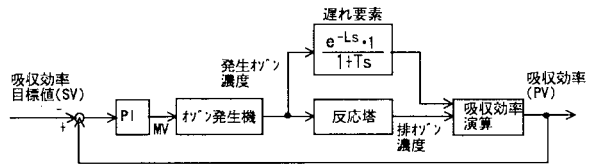


図6 吸収効率一定制御の制御フロー

### 3. 検証結果

#### 3.1 単純フィードバック制御およびフィードバック/フィードフォワード複合制御の比較

オゾン注入量制御の目的は、安定した処理水質を得ることにある。各制御運転時に原水水質を変動させ、処理水水質の安定性を調べた。フミン酸および亜硝酸塩の混合液を原水槽中に瞬時に投入して原水水質を変動させた。UV値フィードフォワード制御は比例ゲインをオゾン注入率/UV値=9.90mg/L/Abs、進み遅れ補償なしの条件で行った。

図7に各制御運転での制御量の変化を、図8にそのときの原水および処理水の色度変化を示した。図7から排オゾン、溶存オゾン濃度一定制御では制御が間に合わず、各制御量が一時的に低下していることがわかる。これに対し、UV値フィードフォワード制御を組み合わせることで溶存オゾン濃度はほぼ一定に保たれている。また図8から、排オゾン濃度一定制御、溶存オゾン濃度一定制御+UV値フィードフォワード制御の順で処理水の色度上昇が押さえられ、処理効果が向上していることがわかる。

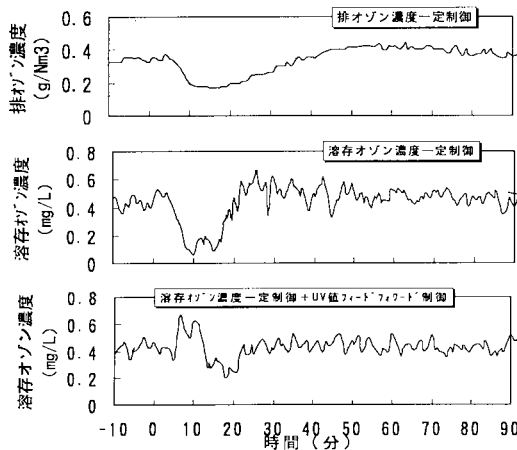


図7 原水水質変動時の制御量の時間変化

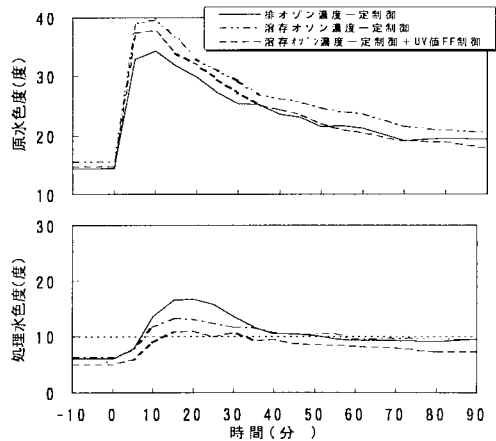


図8 原水および処理水色度の時間変化

#### 3.2 排オゾン濃度一定制御と吸収効率一定制御の比較

原水水質変動による吸収効率の変化はオゾン処理の初期段階で起こる現象である<sup>1), 2)</sup>。初期段階での変動を抑えるためにオゾン処理を二段処理(ガス流量各12.5L/分、液流量30L/分)とし、一段目の吸収効率が一固定となるように制御した。比較の排オゾン濃度一定制御では同じ二段処理で一段目の排オゾン濃度を一定とした。ペリスタポンプを用いて原水槽中に毎分一定量でフミン酸を投入して原水水質を緩やかに変動させた。

実験結果を図9、図10に示す。図10上から原水色度は一時間に20度程度変化していることがわかる。この程度の変化速度に対しては排オゾン濃度一定制御は十分追従している(図9中)。吸収効率一定制御では吸収効率は97%に保たれ、注入オゾン濃度の上昇に従い排オゾン濃度も上昇した(図9上、中)。処理水の色度変化をみると、吸収効率一定制御では排オゾン濃度一定制御に比べて色度上昇が押さえられ

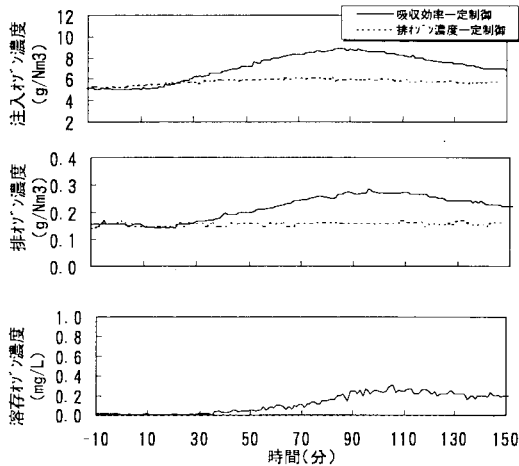


図9 オゾンパラメータの時間変化

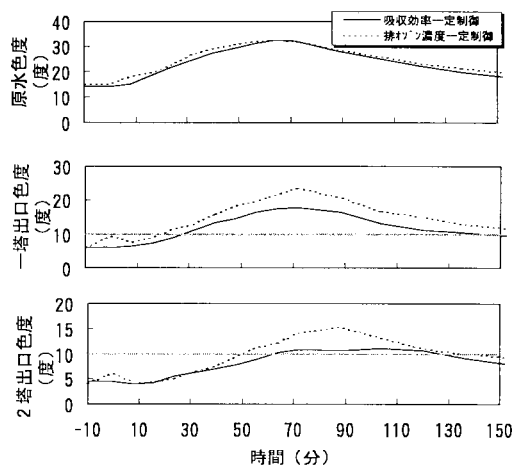


図10 原水および処理水色度の時間変化

ている(図10中、下)。吸収効率一定制御により処理水質の安定性が向上しており、注入オゾン、排オゾンなどからの演算による制御方式の有用性が示された。

### 3.3 実処理水変動での連続運転試験

吸収効率一定制御で約1日連続運転した結果の例を図11に示す。処理は二段処理(ガス流量各12.5 L/分、液流量 30 L/分)とし、二段目の吸収効率が一定となるように制御した時のデータである。図11から、吸収率は91%でほぼ一定となっており、安定した制御が実現できていることがわかる。発生オゾン濃度は13:00から18:00にかけて上昇し、その後緩やかに減少している。この変化の原因は明らかでないが、亜硝酸の変化が反映されているように見える。処理水質としては、色度は2塔出口で常に10度以下となっており、安定した処理水質が得られていることがわかる。

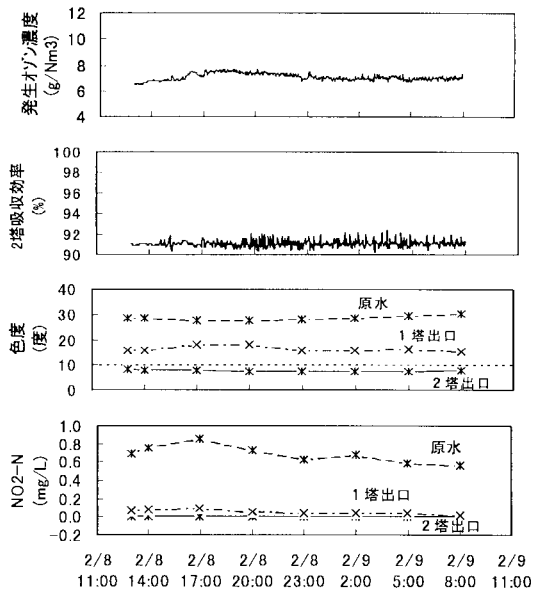


図11 吸収効率一定制御での連続運転試験の結果

## 4. おわりに

下水二次処理水を対象としたオゾン処理実験プラントにおいて制御系の理論的設計を行い、安定したオゾン注入量制御システムを実現した。本設計法は、一般的なオゾン処理設備での制御系の設計に応用することができる。実処理施設において、これらの制御方式のいずれが適しているかを長期的な運転検証をしながら検討していく必要がある。本研究によりオゾン注入量制御の制御方式の選択の可能性を広げることができ、オゾンの有効利用の一段として活用していただければ幸いである。

最後に、本研究に際して、ご指導、ご協力頂きました下水処理場関係各位に深謝致します。

〈文献〉 1) 野口、清水ら “下水処理水のオゾン処理における吸収効率に基づいた新しい監視制御方法” 第5回環境システム自動計測国内ワークショップ論文集 pp.122-125 (1994)

2) NOGUCHI, H., et. Al. “New Control Strategy for Tertiary Wastewater Treatment with Ozone Using an Off-gas Ozone Monitor”, 12th World Congress of the International Ozone Association, Vol.2 pp.357-368 (1995)