

A2O法におけるリン・窒素モデルのシミュレーション評価

原 直樹^{*}、木村文智^{*}、渡辺昭二^{**}、早稲田邦夫^{***}

長坂實上^{****}、佐藤義典^{****}

^{*} (株) 日立製作所大みか工場 日立市大みか町5-2-1

^{**} (株) 日立製作所日立研究所 日立市大みか町7-1-1

^{***} (株) 日立製作所電機システム事業本部 千代田区神田駿河台4-6

^{****} 茨城大学工学部 日立市中成沢町4-12-1

概要

生物学的なリン・窒素除去法は、標準活性汚泥法の改造によって移行できる利点がある。しかし、その計画や運転には、流入条件、反応槽の構成、運転条件など検討すべき因子は多い。これらを支援する目的で、リン・窒素除去モデルに基づいたシミュレーション技術を開発中である。

今回、有機物分解菌、脱窒菌、硝化菌、脱リン菌からなる生物モデルを嫌気-無酸素-好気法（以下A2O法）シミュレータに組み込み、実下水パイロットプラントデータと比較した。

キーワード

下水処理、A2O法、生物モデル、脱窒、硝化、脱リン、シミュレーション

1. はじめに

A2O法の生物反応過程は複雑であり、プラントの構造や運転条件の検討には有機物、リン、窒素除去特性をシミュレーション評価することが重要である。A2O法シミュレーションに用いる生物モデルでは、有機物とリンの表現方法がポイントとなる。今回、A2O法を対象に、菌体内部に有機物とリンを蓄積できる生物モデルに基づいたシミュレータを構築し、実下水パイロットプラントに適用した結果について報告する。

2. 生物モデルの概念

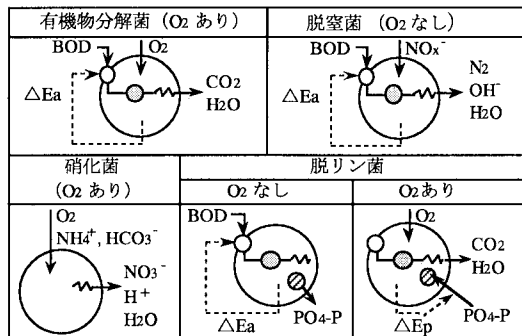
有機物分解菌と脱リン菌の生物代謝モデル¹⁾に脱窒菌、硝化菌を加味して図1の生物モデルとした。菌体増殖と自己分解については後述する。

(1) 有機物分解菌

好気条件下で酸素呼吸で菌体内の蓄積有機物を酸化分解し、このときのエネルギーの一部 ΔE_a で溶解性有機物を吸着して蓄積有機物を合成する。

(2) 脱窒菌

嫌気条件下で菌体内の蓄積有機物または菌体自身を水素供与体として硝酸呼吸、内生硝酸呼吸を行い、硝酸性窒素を窒素ガスに還元する。このときのエネルギーの一部 ΔE_a で溶解性有機物を吸着して蓄積



○ : 蓄積有機物 ○ : ポリン酸 ○ : 能動輸送ポンプ
 ~~~~~ : 呼吸鎖    → : 物質流れ    --> : エネルギー流れ  
 $\Delta E_a$  : 有機物蓄積エネルギー     $\Delta E_p$  : ポリン酸合成エネルギー

図1 生物モデル

有機物を合成する。

(3) 硝化菌

好気条件下でアンモニア性窒素を硝酸性窒素に酸化する。このとき炭酸を摂取して菌体を合成する<sup>2)</sup>。亜硝酸性窒素は硝酸性窒素まで即酸化されるものとする。

(4) 脱リン菌

嫌気条件下において、菌体に蓄積しているポリリン酸をオルトリン酸に加水分解しエネルギーを生み出す。このときのエネルギーの一部 $\Delta E_a$ で溶解性有機物を吸着して蓄積有機物を合成する。また、好気条件下においては酸素呼吸で蓄積有機物を酸化分解し、このときのエネルギーの一部 $\Delta E_p$ でオルトリン酸を摂取、ポリリン酸を合成して菌体内に蓄積する。

3. 生物モデルの定式化

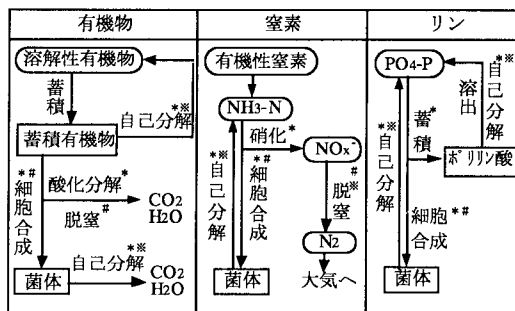
生物モデルにおいて、菌体組成はリン成分を含めて $C_{60}H_{87}O_{23}N_2P$ で表した。菌体増殖と自己分解は以下のように考えた。有機物分解菌、脱窒菌、及び脱リン菌は、増殖時の炭素源として蓄積有機物を、窒素源としてアンモニア性窒素を、リン源としてオルトリン酸を取り込む。硝化菌は炭酸を炭素源として増殖するものとした。自己分解によって、菌体の有機成分は二酸化炭素と水に分解して消滅し、リン成分と窒素成分はそれぞれアンモニア性窒素、オルトリン酸として液中に溶出する。さらに、自己分解した菌体に蓄積されていた蓄積有機物とポリリン酸は、溶解性有機物とオルトリン酸として液中に溶出する。これら増殖、自己分解も含めて生物反応過程をまとめると有機物、リン、及び窒素の状態遷移フローは図2で表現できる。

状態遷移と生物モデルの物質収支を考慮することにより、A2O法プロセスは表1に示す物質と反応プロセスの組合せで表現され、定式化できる。リンに関連する反応係数はデータ解析で決定し、その他については文献値<sup>3) 4) 5)</sup>を用いた。ここで、リンに関する係数は、増殖速度係数0.1 1/hr、リン放出速度係数0.35 1/hr、菌体収率0.55gSS/gBOD、ポリリン酸蓄積比率1.8gP/gSSを用いた。

4. パイロットプラントへのモデル適用

(1) 対象プラント

A2O法パイロットプラントの概要を図3に示す。流入水には実下水の最初沈殿池流出水(沈後水)を使用し、生物反応槽は仕切板を用いて8槽に等分割した。表2の実験条件により約20日間運転した後各反応槽の水質分析を実施した。実験期間中は1回/日、反応槽No.8のMLSSを計測した。このパイロットプラントを対象に、上記生物モデルを適用してA2O法シミュレータを構築した。反応槽は逆混合なしの完全混合槽列でモデル化し、最終沈殿池では滞留汚泥を少なくする運転を実施しているので、生物反応はないと仮定した。流入水質の時間変動は、24時間実測値に基く変動パターンを参考にして作成した。なお、実験A実施期間の流入水BOD、全リ



\*: 酸素呼吸; #: 硝酸呼吸; \*\*: 内生硝酸呼吸

図2 状態遷移フロー

表1 物質と反応プロセスの一覧

| 物質          | 反応プロセス               |
|-------------|----------------------|
| 1. 溶解性有機物   | 1. 酸素呼吸; 有機物分解菌の増殖   |
| 2. 蓄積有機物    | 2. 酸素呼吸; 有機物分解菌の自己分解 |
| 3. アンモニア性窒素 | 3. 硝酸呼吸; 脱窒菌の増殖      |
| 4. 硝酸性窒素    | 4. 内生硝酸呼吸; 脱窒菌の自己分解  |
| 5. 有機性窒素    | 5. 嫌気条件下でのリン溶出       |
| 6. 溶解性リン    | 6. 酸素呼吸; 脱リン菌の増殖     |
| 7. ポリリン酸    | 7. 酸素呼吸; 脱リン菌の自己分解   |
| 8. 有機物分解菌   | 8. 酸素呼吸; 硝化菌の増殖      |
| 9. 脱リン菌     | 9. 酸素呼吸; 硝化菌の自己分解    |
| 10. 硝化菌     | 10. 有機性窒素のアンモニア化     |
| 11. 溶存酸素    | 11. 有機物の蓄積           |
| 12. アルカリ度   | 12. 微生物呼吸による酸素消費     |
|             | 13. 送気による酸素供給        |

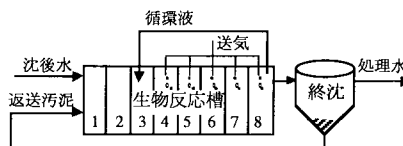
ン、全窒素は実験Bの約1.5倍であった。

(2) シミュレーション結果

MLSSの実測値とシミュレーション計算値を図4に示す。図4よりMLSSは平均誤差6%以内を示したことから、本シミュレータ上で微生物の増殖と自己分解が再現できたものとする。

図5(a)~(h)にパイロットプラント各反応槽におけるBOD、溶解性リン、硝酸性窒素、及びアンモニア性窒素の実測値とシミュレーション計算値を示す。

図5の溶解性リン実測値より、嫌気槽における溶解性リンの増加はBODの減少と対応していることから、流入水中の有機物は、脱リン菌のリン放出に伴い菌体に吸着されて蓄積有機物になったと考えられる。次の無酸素槽での溶解性リンの減少は、主に循環液による希釈の影響である。好気槽では、脱リン菌のリン摂取と微生物増殖によって溶解性リンは流下方向に減少傾向にある。実験Aの場合、好気槽後段で溶解性リンを完全に除去できたが、実験Bではリン摂取が不十分ため処理水に1.1mg/L残留している。このような生物反応過程で変動する溶解性リンの実測値とシミュレーション計算値はほぼ一致した。また、実験AとBにおいては、硝化脱窒反応に大きく影響する循環率とDOを変更しているが、いずれの実験条件においてもBOD、硝酸性窒素、及びアンモニア性窒素の実測値と計算値はほぼ一致した。



生物反応槽容積：217 L；終沈容積：142 L

図3 パイロットプラント概要

表2 実験条件

| 実験 | 槽構成比<br>Aa: Ao: Oo | 循環率<br>(%) | DO<br>(mg/L) | MLSS<br>(mg/L) | 水温<br>(°C) |
|----|--------------------|------------|--------------|----------------|------------|
| A  | 1:1:6              | 200        | 0.25         | 2370           | 26.4       |
| B  | 2:1:5              | 100        | 0.65         | 2100           | 19.5       |

流入水量：27 L/hr；返送率：50%；SRT：15日

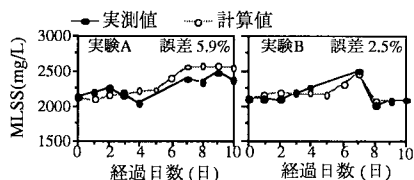
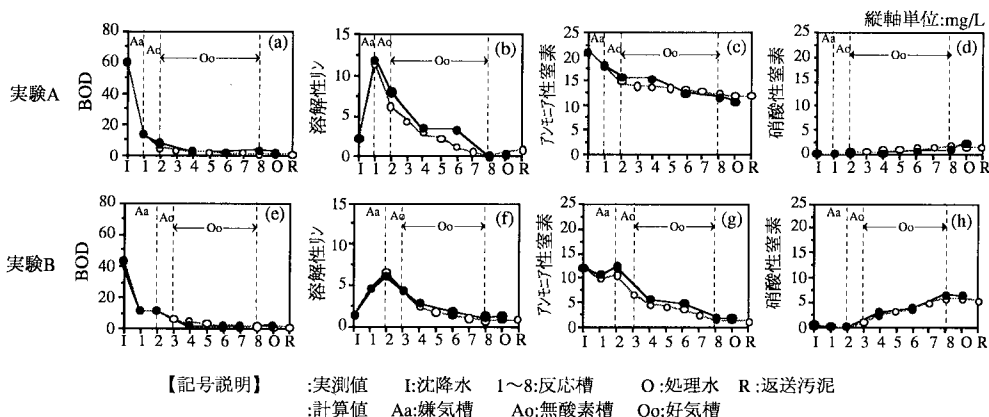


図4 MLSSの実測値と計算値



【記号説明】 :実測値 I:沈降水 1~8:反応槽 O:処理水 R:返送汚泥  
:計算値 Aa:嫌気槽 Ao:無酸素槽 Oo:好気槽

図5 生物反応槽の実測値と計算値

次に、蓄積有機物のシミュレーション結果を図6に示す。無酸素槽から流出する菌体内の蓄積有機物残存量は実験AとBで相違しており、この違いが好気槽におけるリン摂取速度に影響を及ぼしたと推測された。

以上のように、パイロットプラントの反応槽構成比、循環率、DOなどの条件を変えてもシミュレーションの結果は良好であった。従って、今回提案した生物モデルと、これに基づいたシミュレータはA2O法に適用可能

と考えられる。

## 5. シミュレーションによる運転条件の検討

### (1) 反応槽構成比、循環率

実験Bの流入条件で、パイロットプラントの運転条件をシミュレーション検討した。図7に反応槽の構成比と循環率を変化させたときのリン及び窒素除去率のシミュレーション結果を示す。全窒素の除去率は、無酸素槽を2段にすると循環率200%で最大を示した。また、循環率が200%を越えると無酸素槽における滞留時間が短くなり脱窒が進まないこと、さらに循環液の持込DOによる脱窒抑制の影響によって窒素除去率は低下する。一方、リン除去率は、嫌気槽2段よりも1段の方が高くなる傾向にある。これは、嫌気槽2段の場合、リン放出量は多くなるが、放出したリンを好気槽で摂取できないことによる。実験Bの流入条件の有機物では、嫌気槽と無酸素槽の微生物がその大半を吸着消費してしまうので、好気槽ではリン摂取に必要な有機物が不足していると考えられる。また、循環率300%以上でリン除去率が向上するケースもあるが、これは、脱窒が抑制されるため、無酸素槽から流出した微生物に蓄積有機物が多く残存することによる。

### (2) 流入有機物濃度

図8は、実験Bの運転条件で流入有機物濃度のみを変化させた場合のリン・窒素除去率のシミュレーション結果である。流入有機物が多いほど除去率は改善されている。このように、無酸素槽流出水の蓄積有機物が後段のリン摂取に大きな影響を与えていることを把握できた。A2O法では、流入有機物が少ないときは最初沈殿池バイパスなどで有機物を高める必要がある。

## 6. おわりに

リン、窒素を含めた生物モデルを検討してA2O法シミュレータを構築した。本シミュレータは実下水によるパイロットプラントデータと良い一致を得た。この結果から、今回提案した生物モデルによって有機物、リン、及び窒素の除去過程を予測できる見通しを得た。また、適切な反応槽構成や運転条件の決定にも利用できると考えられる。今後もさらに実プラントデータで検証する等によってモデルの予測精度向上を図りたい。

### <参考文献>

- 1) 日本下水道事業団技術評価委員会：微生物を利用した窒素及びリン除去プロセスの評価に関する第2次報告書, (1988)
- 2) 高原義昌編著：廃水の生物処理, (1980)
- 3) 化学工学会編：生物学的水処理技術と装置, (1978)
- 4) IAWQ : IAWPRC Scientific and Technical Reports No.1, Activated Sludge Model No.1, (1987)
- 5) 日本下水道事業団技術開発部：単段式及び二段式活性汚泥循環変法の技術資料, (1990)

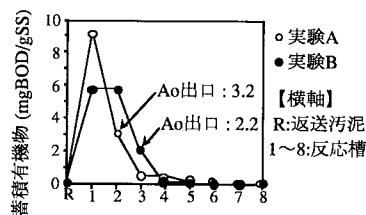


図6 蓄積有機物シミュレーション

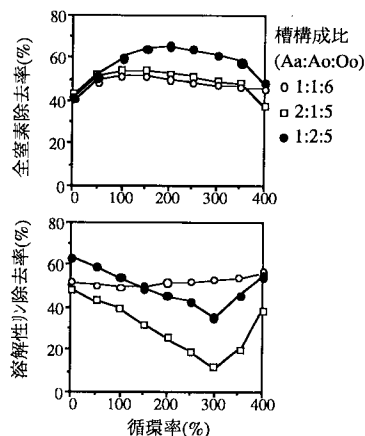


図7 除去率・循環率シミュレーション

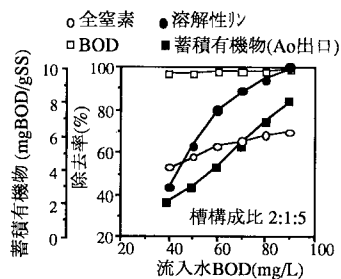


図8 除去率・流入水BODシミュレーション