

生物学的りん除去法における りん除去変動機構の解析

下水道・河川研究室 ○浅野 卓哉
水再生施設整備課 小川 洋平

1. はじめに

現在下水処理場では、放流先の富栄養化対策として、窒素・りん除去を目的とした高度処理施設の導入が進んでいる。しかし、生物学的りん除去反応についての定量的な知見が不足しており、嫌気槽滞留時間の定量的設計、降雨後のりん除去悪化といった課題を抱えている。

我々は、生物学的りん除去法によるりん収支の定量的理解を目的として、汚泥りん含有率変動の概念を導入した新たなりん収支モデルを考案した。実施設で収集したりん除去関連因子の実測値を用いて、モデルの有効性を検証した結果、このモデルによりりん除去変動機構を定量的に説明できることがわかった。さらにこのモデルを用いて、汚泥りん含有率や嫌気槽りん放出量とりん除去性能の関係について解析した。

2. 実施設概要および調査内容

実施設での調査は神奈川水再生センターで行った。当センターは合流式で、一部をA₂O法で処理しており、このうち3池を調査対象とした。対象3池は施設、反応槽流入水とも同等であり、運転条件が若干異なる。調査期間は平成16年7~12月の6ヶ月間とした。期間中の対象池の運転条件および流入水質（平均値）を表1に示す。なお、本期間中は流入水量一定で運転し、MLSS濃度2,000mg/Lを維持するよう運転管理を行った。

期間中、毎週木曜日および降雨後のりん除去悪化日に合計55回調査を実施した。各調査日に、反応槽流入水、各池汚泥（好気槽出口および返送）、嫌気槽内試料（以上スポット採水）、流入水、各池処理水（以上24時間コンポジット採水）について、T-P、PO₄-P、SSなどを標準的方法で分析した。これらの分析データおよび運転データを用いて各解析を行った。

表1 調査期間中の運転条件および流入水質

	運転条件(実績値)		流入水質(mg/L)	
	夏期	秋期	夏期	秋期
HRT合計(hr)	7.3	8.0	T-N	23 16
嫌気槽HRT(hr)	0.8~1.3	0.9~1.5	NH ₄ -N	13.9 10.6
無酸素槽HRT(hr)	2.8~3.3	2.5~3.1	T-P	2.3 1.4
好気槽HRT(hr)	3.2	4.0	PO ₄ -P	1.1 0.7
返送率(%)	50	50	BOD	66 39
循環率(%)	100	100~150	S-BOD	30 16
BOD-SS負荷(g/g/d)	0.10	0.06	酢酸	7.1 2.9

3. りん収支モデルの構築

処理系に流入したりんは大気中に揮散しないため、処理水または余剰汚泥として系外に排出される。このため処理系のりん収支は、汚泥発生量および汚泥りん含有率(P_X)を用いて説明されてきた。しかし、実際には P_X および系内汚泥濃度は変動するため、日々のりん除去変動を説明するには系内蓄積りんの変化量(ΔQ_{PX})の概念を導入する必要がある。そこで、新たに ΔQ_{PX} および汚泥りん含有率変化量(ΔP_X)の2因子を導入して、下式のようなりん収支モデルを考案した。

$$\begin{aligned} \text{流入水中のりん量}(Q_{P,in}) \quad \text{処理水中のりん量}(Q_{P,eff}) \quad \text{余剰汚泥中のりん量}(Q_{P,es}) \quad \text{系内蓄積りん変化量} \\ Q_{in} \times C_{P,in} = Q_{in} \times C_{P,eff} + Q_{es} \times C_{SS,es} \times P_X + \Delta Q_{PX} \quad \dots(1) \\ \Delta Q_{PX} = V \times C_{SS,ml} \times \Delta P_X + V \times \Delta C_{SS,ml} \times P_X \quad \dots(2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{in} : \text{反応槽流入水量}(m^3/d) \quad C_{P,eff} : \text{処理水T-P濃度}(mg/L) \quad P_X : \text{汚泥りん含有率}(gP/gSS) \\ Q_{es} : \text{余剰汚泥引抜量}(m^3/d) \quad C_{SS,es} : \text{余剰汚泥濃度}(mg/L) \quad \Delta P_X : \text{汚泥りん含有率変化量}(gP/gSS/d) \\ C_{P,in} : \text{反応槽流入水T-P濃度} \quad C_{SS,ml} : \text{活性汚泥濃度}(mg/L) \quad V : \text{反応槽容量}(m^3) \\ \Delta C_{SS,ml} : \text{活性汚泥濃度変化量}(mg/L/d) \end{aligned}$$

ΔQ_{PX} は、 P_X 変動に伴う汚泥中ポリりん酸蓄積量の変化量と、汚泥量自体の変動に伴うりん変化量の和であると考えられる。MLSSが一定と仮定すれば、 ΔQ_{PX} はりん蓄積細菌によるポリりん酸合成(分解)量であるといえる。本調査期間中のMLSSは、10月の大雨時に大きく低下した以外は2,000mg/L前後で安定して推移していたため(図1)、本報告では $\Delta C_{SS,ml}$ は0と仮定して解析を行った。

本調査期間中について、(1)、(2)式の ΔQ_{PX} 、 ΔP_X 以外の項目は既知であるため、各調査日の ΔQ_{PX} 、 ΔP_X を算出することができる。以降、この ΔQ_{PX} 、 ΔP_X の計算値と各因子実測値を用いて解析を行った。

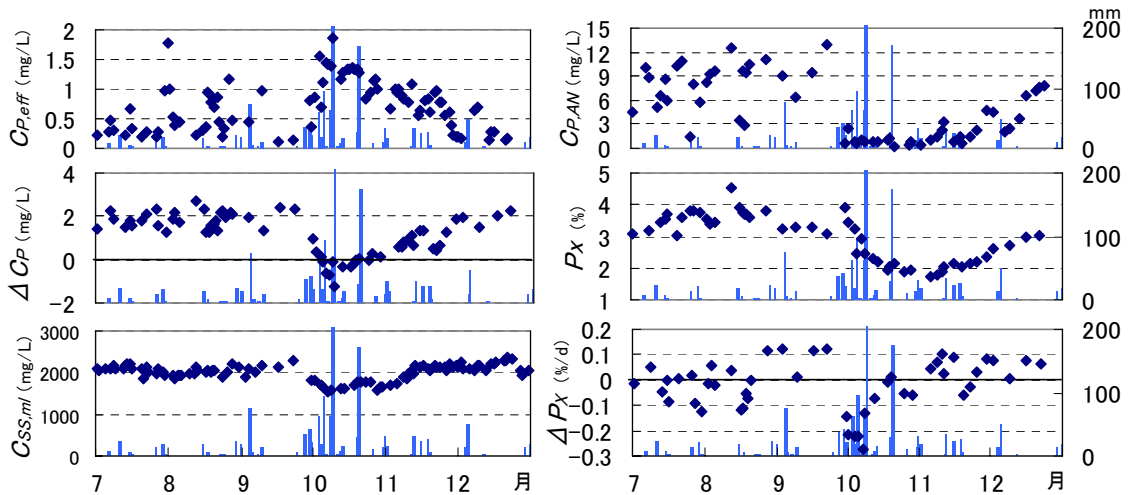


図1 調査期間中のりん除去、MLSS、嫌気槽末端PO₄-P濃度、P_X、ΔP_Xの経日変化（3池平均値）

4. 調査・解析結果と考察

4.1 実施設りん除去状況および P_X、ΔP_Xの推移

調査期間中の C_{P,eff}、りん除去濃度 (ΔC_P: C_{P,in} - C_{P,eff})、MLSS、嫌気槽末端 PO₄-P 濃度 (C_{P,AN})、P_X および ΔP_X と降雨量の経日変化を図 1 に示す。C_{P,eff} は、夏期は晴天時には 0.5mg/L 以下と除去良好であったが、降雨後には 1mg/L 以上に上昇した。10 月は度重なる大雨によりりん除去能力は大幅に低下し、11 月以降次第に回復した。C_{P,AN} は降雨後に大きく低下し、徐々に回復する傾向にあった。10 月中は、約 1 ヶ月間ほとんど放出のない期間が続いていた。P_X は、夏期は概ね 3~4% で推移したが、10 月に入ると徐々に低下し、下旬には標準法汚泥レベルの 1.8% まで低下した。11 月以降は次第に回復した。ΔP_X は -0.3~+0.2% の間を推移していた。モデルの概念が正しければ、ΔP_X の変動からりん除去変動を説明できるはずである。以降、ΔP_X と ΔC_P、C_{P,AN} の関係を解析することにより、このモデルの有効性について検証した。

4.2 ΔP_X を用いたりん除去変動機構の解析

各調査日の ΔP_X と ΔC_P、C_{P,AN} の相関を図 2 に示す。夏秋期および降雨後（降雨日 10mm 以上）から 6 日間）と晴天時の 4 パターンに区別して表示した。ΔP_X の分布は、概ね晴天時には正、降雨後には負に分離している。これは、P_X が降雨後に低下し、晴天時には上昇することを意味している。P_X の低下は、Q_{Pes} の減少および汚泥中のポリリン酸の分解・流出につながり、その結果りん除去が悪化すると考えられる。以上のことから、実測値から算出した ΔP_X の値を用いて、りん除去変動状況を説明できることがわかる。

図 2 から、ΔP_X と ΔC_P の間には概ね正の相関があることがわかる。これは(1)式から、りん除去量は ΔQ_{Px} と Q_{Pes} の和であるためである。また、夏期と秋期で分布の傾きが異なっているが、これは秋期は大雨により P_X が低下し、また汚泥発生量自体も低下していたため、Q_{Pes} が夏期より大きく減少しているためである。この結果、秋期のほうが夏期よりりん除去量に占める ΔQ_{Px} の割合が高く、ΔC_P/ΔP_X 比は P_X が低い秋期のほうが高くなっている。

また、ΔP_X と C_{P,AN} も同様に正の相関がみられるが、これは ΔC_P と C_{P,AN} の間に高い相関があるためである。ΔC_P と C_{P,AN} の相関を図 3 に示す。上の ΔC_P/ΔP_X の関係から、C_{P,AN}/ΔP_X についても P_X が低いほど高くなる。これは、P_X が低いほど少ない C_{P,AN} で P_X が上昇することを示している。

以上のように、ΔP_X の概念を導入することで、系のりん除去機構を定量的に解析することが可能になる。このモデルの概念の模式的に図 4 に示す。また、図 3 から、(1)式と C_{P,AN} を結びつけて解析することが可能となる。C_{P,AN} は、BOD-SS 負荷や流入水有機酸濃度と相関があることが知られている。C_{P,AN} と流入基質の関係が明確になれば、(1)式を用いて流入水質とりん除去性能の関係を定量的に解析することが可能になると思われる。

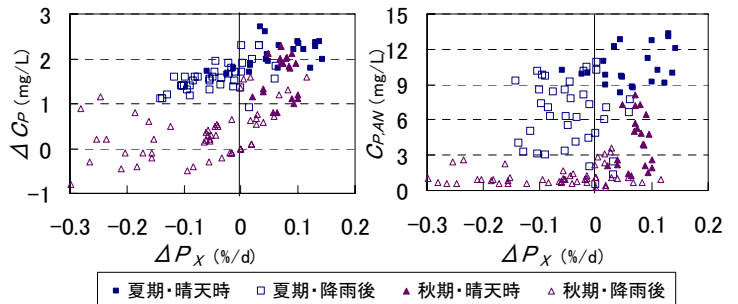


図2 ΔP_XとΔC_P、C_{P,AN}の相関（季節・天候別）

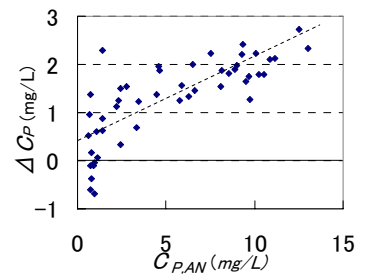


図3 ΔC_PとC_{P,AN}の相関

4.3 P_X によるりん除去性能の定量解析

これまでの解析結果から、 P_X の変動がりん除去に大きく影響していることがわかった。一般に P_X が高いほど汚泥のりん除去性能が高いといわれている。本モデルを用いれば、 P_X とりん除去の関係をより定量的に理解できると考えられる。 ΔP_X と ΔC_P の相関を、 P_X を5段階（2%未満～3.5%以上）に区別して表示したものを図5に示す。これを用いて、 P_X とりん除去性能の関係を解析した。

図5をみると、 P_X ごとに高い相関があり、各回帰直線の傾きがほぼ等しいことがわかる。これは、(1)式から、りん除去量は ΔQ_{P_X} と $Q_{P,es}$ の和であり、 P_X により $Q_{P,es}$ が増減するためである。各回帰直線のy切片は、 P_X が高いほど大きいことがわかる。y値の上限は、当処理場の平均 $C_{P,in}$ の2.3mg/Lとすると、これを超えるような P_X では、 ΔP_X は常に負となるため、 P_X はそれ以上上昇しないはずである。図5から、 P_X が4%程度でy切片は2.3mg/Lを超え、 P_X は最大となると考えられる。一般に、通常の下水を処理する高度処理汚泥の P_X は4%程度が上限であるといわれているが、上の解析結果はその原因を説明している。このように、このモデルを用いて P_X の最大値を推定できる。

また、 P_X 最大条件では ΔQ_{P_X} は0となるが、これは過剰摂取されたりん量が $Q_{P,es}$ と等しくなるためである。長期間降雨がなく、 ΔP_X が正を維持し続けると、やがて P_X は最大値に達する。この状態を維持することができれば、最大のりん除去性能を維持できることになる。図2から、 ΔP_X を正に維持するには $C_{P,AN}$ を高く維持する必要があることがわかる。また、図2、3から、 ΔC_P を最大の2.3mg/Lとするのに必要な $C_{P,AN}$ は12mg/L程度であることがわかる。つまり、常に $C_{P,AN}$ を12mg/Lに維持できるような有機物負荷があれば、理論上はりん除去性能を最大に維持できることになる。さらに、 $C_{P,AN}$ とBOD-SS負荷、流入水有機酸濃度との関係がわかれば、りん除去性能最大化に必要な有機物量を推定できる。降雨後のりん除去悪化対策としては有機物添加が最も有効であると考えられているが、以上のような解析により、必要な有機物添加量を検討することができる。

5. まとめと今後の課題

今回考案した P_X 変動の概念を導入したりん収支モデルにより、実施設でのりん除去変動機構を定量的に説明することが可能となった。また、このモデルを用いて、 P_X 最大値やりん除去安定化に必要な有機物負荷を理論上推定できることが示された。今回、実測値を用いた解析結果に理論的整合性が得られた理由として、本調査期間中において、MLSS濃度が安定していたこと、流入水量一定運転であったこと、汚泥沈降性が良好で最終沈殿池の汚泥堆積量に大きな変動がなかったことなどが挙げられる。しかし、 ΔQ_{P_X} に影響する因子が他にも存在する可能性がある。今後は他の処理場のデータを用いて、モデルの有効性を検証すると同時に、 ΔQ_{P_X} の定義をより正確にする必要がある。

また、りん除去安定化に必要な $C_{P,AN}$ を推定できることから、さらにりん放出速度の概念を導入すれば、嫌気槽の必要滞留時間が算出できることになる。りん放出速度の測定には回分実験が有効である。今後は実施設での調査と同時に、様々な条件で回分実験を実施し、有機物負荷とりん放出速度の関係を明らかにすることで、このモデルの応用範囲を広げていきたいと考えている。

参考文献

- ・下水道施設計画・設計指針と解説 後編 2001年版；社団法人日本下水道協会
- ・高度処理施設設計資料検討プロジェクト報告書（平成15年3月）；独立行政法人土木研究所

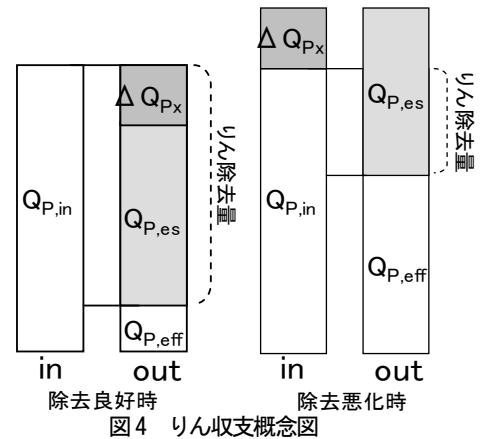


図4 りん収支概念図

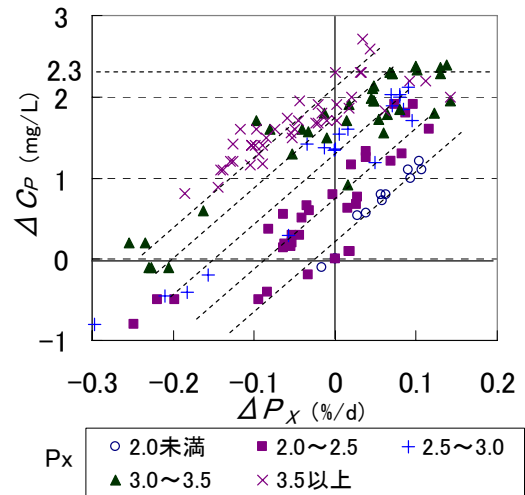


図5 ΔP_X と ΔC_P 、 $C_{P,AN}$ の相関 (P_X 別)