

住宅団地汚水処理施設への窒素・リン除去技術適用 の可能性 (その2) — リンの除去 —

嶋 津 暉 之 志 村 真 理 井 上 互
(多摩環境保全事務所)

1 はじめに

活性汚泥処理においてリンを確実に除去する方法は、ばっ気槽に硫酸ばん土等の凝集剤を注入する凝集剤添加法である。凝集剤添加法の効果と費用については既報¹⁾で報告した。この方法は設置費用、薬品費ともさほど高くはないので、各住宅団地汚水処理施設に導入することは可能と考えられる。しかし、この方法の導入を直ちに求めることは指導上、むずかしい面も予想される。筆者らは住宅団地汚水処理施設の調査データ及び三沢団地の実験データを検討した結果、凝集剤を使わなくても汚泥の適切な管理等を行うことにより、処理水T-Pを小さくすることが可能であることを見出した。以下、その検討結果を報告する。

2 リン除去の現状

(1) 二次処理水の水質調査結果

水質汚濁防止法に基づく届け出排水量が500m³/日以上²⁾の住宅団地汚水処理施設、45施設の調査を昭和61年9月上旬から10月上旬にかけて実施した。調査対象と水質の分析方法は前報の表1と表2に示すとおりである。

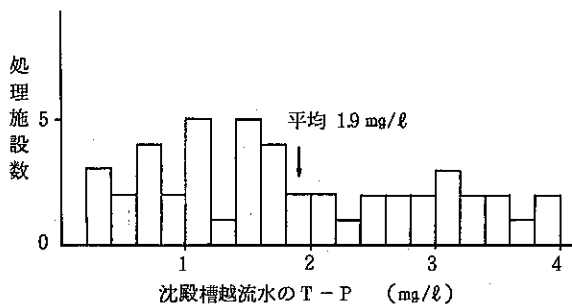
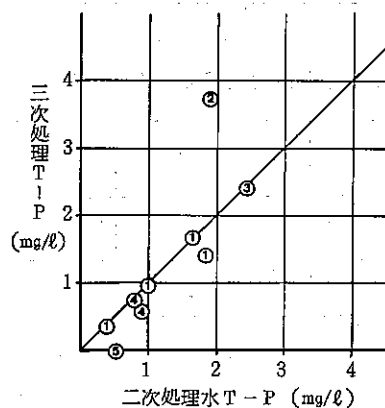


図1 二次処理水T-Pの年間平均値の推定

この水質調査による二次処理水のT-P (全リン)は0.20~2.86mg/l (平均1.36mg/l)であった。流入水T-Pの日間平均値が約4mg/lであるので、リンの平均除去率は約65%である。

しかし、処理水T-Pは変動が大きく、一回だけのスポット採水では代表性のあるデータが得られない。前報の図1に示した多摩環境保全事務所水質保全課の調査データで明らかのように、処理水T-Pは採水ごとに数字が大きく変わり、5~10倍の変動を示している。この処理水T-Pの変動は汚泥引き抜き量の増減と活性汚泥のリン吸着力の変動によるものと考えられる。そこで、年平均的な値を推定するため、各処理施設の〔汚泥の平均排出量〕×〔汚泥のリン含有率〕からリン除去量を計算して、処理水T-Pを別途、求めた。その結果を図1に示す。45施設の処理水T-Pは0.2~3.8mg/l、平均1.9mg/lで、リン平均除去率は53%である。



- ① 生物汚過
- ④ 沈殿+砂汚過
- ② 接触酸化処理+生物汚過
- ⑤ 凝集沈殿+砂汚過
- ③ 砂汚過

図2 三次処理のリン除去効果

(2) 三次処理の効果

調査対象のうち、9施設は三次処理を行っている。三次処理のリン除去効果を調べた結果を図2に示す。凝集剤を使う⑤の方法を除くと、二次処理水T-Pと三次処理水T-Pはほぼ同じような値を示しており、三次処理のリン除去効果は殆どない。⑤の場合は二次処理水T-Pに対するモル比で19倍、流入水T-Pに対するモル比で2.4倍の硫酸ばん土を注入していた。

このように、凝集剤を使用しないかぎり、三次処理にリンの除去を期待することはできない。

3 リン除去率の変動要因についての検討

調査対象45処理施設のリン除去率は5~95%を変動しており、通常の活性汚泥処理でリンがあまり取れないこともあれば、よく除去されることもある。このリン除去率の変動要因を明らかにするため、以下の検討を行った。

(1) 汚泥からのリンの回帰

ア 引き抜き汚泥からのリンの溶出

変動要因の一つとして考えられるのは汚泥処理の方法の違いである。表1は調査対象45施設における引き抜き汚泥の処理方法を整理したものである。引き抜き汚泥をそのまま貯留槽に保管して分離液を時々、取り出している施設もあれば、引き抜き汚泥を直ちに濃縮機にかけて最初の段階で分離液を取ってしまう施設もある。また、汚泥を減量化するため、汚泥の好気性消化を行っている施設もある。

これらの汚泥処理の方法の違いがリン除去率に及ぼす

表1 45施設の余剰汚泥の処理方法

①引き抜き後直ちに濃縮 11施設	・シングルベルト濃縮機	6	
	・加圧浮上濃縮機	4	
	・常圧浮上濃縮機	1	
②好気性消化 14施設 →消化後	・貯留後搬出	7	
	・濃縮	・ドラム式濃縮機	1
		・加圧浮上濃縮機	1
		・遠心汙過濃縮機	3
	・脱水	・ベルトプレス脱水機	1
・遠心脱水機+熱風乾燥		1	
③汚泥貯留 20施設 →貯留後	・搬出	13	
	・濃縮	・ドラム式濃縮機	2
		・加圧浮上濃縮機	2
		・遠心汙過濃縮機	2
	・脱水 (ベルトプレス脱水機)	1	

影響を知るため、三沢団地の返送汚泥を長期間、嫌気状態及び好気状態においてリンの溶出量を調べた。その結果を図3に示す。嫌気状態が余剰汚泥をそのまま貯留した場合、好気状態が余剰汚泥の好気性消化を行った場合を示している。

まず、嫌気状態においた同図(1)をみると、最初の1日で0.3%のリンがすみやかに溶出し、その後は3日目から汚泥の嫌気分解によるMLSS (混合液の浮遊物質濃度)の減少とともに、リンが徐々に溶出していく。3日目以降の溶出量は減少MLSSの1%に近い値である。一方、好気状態においた同図(2)ではすみやかなリンの溶出はなく、3日目から汚泥の好気分解とともに少しずつ溶出していく。その溶出量はMLSSの減少量に対して1.3~1.4%である。このように、嫌気状態か好気状態かによってリンの溶出のパターンが異なるが、半月後のリン溶出量はいずれも初期MLSSの0.4%強である。

生物学的脱リン法(嫌気好気法)の研究の一環として活性汚泥中のリンの形態別分析が行われてきている³⁾⁴⁾。それによれば、通常の活性汚泥も嫌気好気汚泥も、リンの形態は ①安定性がよく、再溶出することが殆どない「化学結合性リン」、②不安定な「ポリリン酸態リン」、

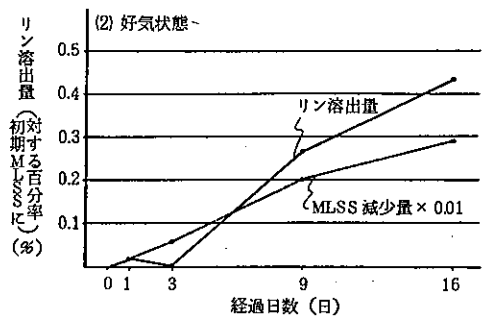
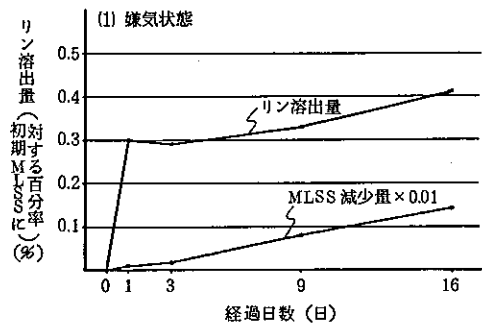


図3 余剰汚泥からのリンの溶出 (初期汚泥のリン含有率 2%)

③汚泥量に対する比がほぼ一定の「生体性リン」の三つに分けることができる。化学結合性リンとは流入水に含まれるカルシウムや鉄等の結合によるものであり、ポリリン酸態リンとは生物学的脱リン法（嫌気好気法）における汚泥のリン過剰吸収の主力をなすもので、通常の活性汚泥にも多少含まれている。また、生体性リンとはその他の形態のリンで、微生物の菌体を構成するものが中心を占めている。住宅団地汚水処理施設に文献値を当てはめると、生体性リンのMLSSに対する比は1%前後になる。

この形態別リンを念頭において前出の図3(1)をみると、嫌気状態になって、すみやかに溶出するのがポリリン酸態リンであり、汚泥の分解に伴い、MLSSの減少に比例して徐々に溶出するのが生体性リンであると考えられる。また、同図(2)の好気状態でリン溶出量が減少MLSSの1.3~1.4%の値を示しているのは生体性リンの他に、ポリリン酸態リンも溶出しているからであると推測される。

このように、引き抜き汚泥をそのまま汚泥貯留槽に保管するか、あるいは好気性消化を行うと、ポリリン酸態リンと生体性リンの一部が溶出する。汚泥貯留槽や好気性消化槽の分離液は汚水調整槽に返送されるので、余剰汚泥からのリンの溶出はリンの除去率を低下させる。

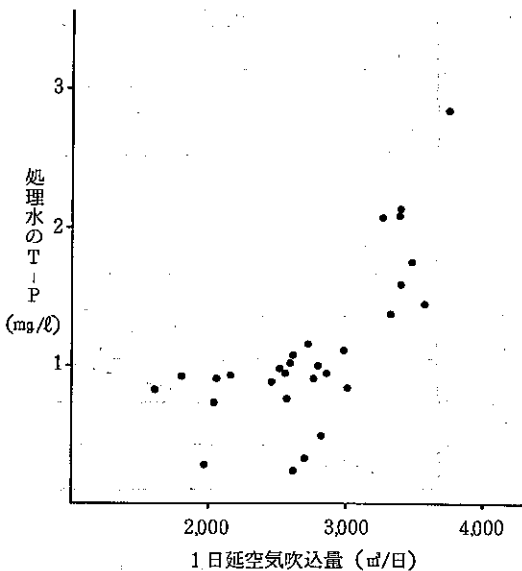


図4 空気吸込量と処理水T-Pの関係（三沢団地）

イ 過ばっ気によるリンの溶離

リン除去率を変動させる第二の要因として考えられるのはばっ気槽の空気吹込量である。図4は三沢団地におけるばっ気槽の空気吹込量と処理水T-Pの関係をみたものである。一日の空気吹込量が3000m³未満の状態では処理水T-Pは1mg/ℓ前後であるが、空気吹込量が大きくなり、3200m³/日を越えると、処理水T-Pが1.4~2.8mg/ℓまで跳ね上がる。このT-Pの殆どは溶解性のものである。

過剰の空気吹込みで溶離するリンの形態を考察すると、過ばっ気状態では活性汚泥の粘着性が失われてフロックの解体が進むが、汚泥量そのものは減少しない。したがって、生体性リンの溶離とは考えにくいし、また、安定性のよい化学結合性リンが溶離することはまずない。とすれば、過ばっ気状態で溶離するリンはポリリン酸態リンの一部と考えるのが妥当である。すなわち、過剰の空気吹き込みでポリリン酸態リンと結合する物質が酸化され、分解されたものと推測される。また、同じ処理施設でも採水の度ごとに処理水T-Pが大きく変わることがあるのは、ばっ気の状態によってポリリン酸態リンとしての取り込み量がふえたり、逆にこの形態のリンが溶離するからであると考えられる。

このように、ポリリン酸態リンは嫌気状態だけでなく、過度の酸化状態でも溶離する性質をもっている。

(2) 活性汚泥のリンの取込量を規定する因子

以上のように、汚泥からのリンの溶出・溶離がリン除去率を変動させる要因となっているが、一方で、ばっ気槽での汚泥のリン取込量を規定し、各処理施設のリン除去率を左右する因子がある。それはばっ気槽のMLSSとばっ気時間である。MLSS及びばっ気時間と処理水T-Pとの関係について検討した結果を次に述べる。

ア 汚泥のリン含有率とMLSS・V₁/Qの関係式

最初に、汚泥のリン含有率とMLSS及びばっ気時間の関係式を求める。図3に示した三沢団地の例では汚泥に含まれる2%のリンのうち、1%が生体性リン、0.3%がポリリン酸態リン、0.7%が化学結合性リンと推定された。このうち、生体性リンは前述のように、この比率がほぼ一定であるのに対して、化学結合性リンの生成量はばっ気槽中の金属成分濃度に比例する。流入水から持ち込まれる金属成分が多いほど、また、ばっ気槽中の

汚泥の滞留時間（汚泥令）が長いほど、ばっ気槽中の金属成分濃度が高くなり、化学結合性リン量が增大する。住宅団地の場合は流入水中の金属成分濃度がほぼ一定であるので、化学結合性リン量は流入水量と汚泥令の積に比例するものとみなされる。残りのポリリン酸態リンの生成量がどのようにきまるのか、その機構は生物学的脱リン法の機構と同様、不明であるが、空気吹込量を押さえ気味にしている施設はポリリン酸態リン量が増加し、逆に空気吹込量が多すぎて過度の酸化状態になっている施設は小さな値になっていると考えられる。

まず、汚泥のリン含有率 P_0 を形態別に分けると、

$$P_0 = \frac{\text{生体性リン量}}{\text{MLSS}} + \frac{\text{化学結合性リン量}}{\text{MLSS}} + \frac{\text{ポリリン酸態リン量}}{\text{MLSS}}$$

ばっ気槽中の生体性リンの濃度は $\text{MLSS} \times 0.01$ であり、化学結合性リンの濃度は $Q P_c n / V_1$ で示される。ただし、 n は汚泥令、 P_c は比例係数である。MLSSは前報の(2)式で表すことができる。ポリリン酸態リンも化学結合性リンと同様、その生成量が流入水量と汚泥令の積に比例すると仮定すれば、上式から次式が得られる。

$$P_0 = 0.01 + \frac{Q (P_c + P_p) n / V_1}{\left[\frac{\alpha l_{ORB}}{1+n+\beta} + \gamma Ss n \right] \frac{Q}{V_1}}$$

$$= 0.01 + \frac{P_c + P_p}{\frac{\alpha l_{ORB}}{1+n+\beta} + \gamma Ss} \quad (1)$$

- P_0 : 汚泥のリン含有率
- P_c : 化学結合性リンの比例係数で、流入水量 1 m^3 あたりの生成量を示す。住宅団地の場合は $0.0008 \text{ (kg/m}^3)$
- P_p : ポリリン酸態リンに関する変数で、流入水量 1 m^3 あたりの生成量を示す。
- Q : 流入水量 ($\text{m}^3/\text{日}$)
- V_1 : 好気槽の容量 (m^3)
- α : BODの汚泥転換率、約 1.2 (kg/kg)
- l_{ORB} : 流入水のBOD濃度×除去率、約 $0.2 \text{ (kg/m}^3)$
- γSs : 流入水の不活性SS濃度、約 $0.06 \text{ (kg/m}^3)$
- n : 好気槽の汚泥令 (日)

β : 微生物の自己酸化率 ($1/\text{日}$)、水温 25°C で 0.15 、前報図8の比率で水温とともに変化化する。

この式でリン含有率の変動をどの程度、説明できるかを知るために作成したのが図5と図6である。図5は三沢団地処理施設における水温とリン含有率の関係をみたものである。水温が高くなる夏場はリン含有率が上昇し、冬場は低下する傾向が見られる。これは水温が上昇すると、微生物の自己酸化の進行で化学結合性リンの比率が高まるからである。すなわち、(1)式において β が水温とともに大きくなるため、 P_0 が上昇する。(1)式から計算したのが同図の実線、(1)式を変更してポリリン酸態リンの含有率を一定としたのが同図の破線であるが、実線の方が実際のリン含有率の変化とよく対応しており、ポリリン酸態リンの生成量が流入水量と汚泥令の積に比例するという仮説が妥当であることを示している。

次に図6は各処理施設の汚泥のリン含有率と $\text{MLSS} \cdot V_1 / Q$ の関係をみたものである。同図に示す実線はポリリン酸態リンの生成量を三沢団地と同じ；破線はポリリン酸態リンをゼロとして(1)式から両者の関係を求めたものである。

ばっ気槽滞留時間が36時間以上の施設は破線に比較的好くのっている。これはばっ気時間が非常に長いと、過ばっ気状態になりやすく、そのため、汚泥中のポリリン酸態リンが消失したことを意味していると思われる。

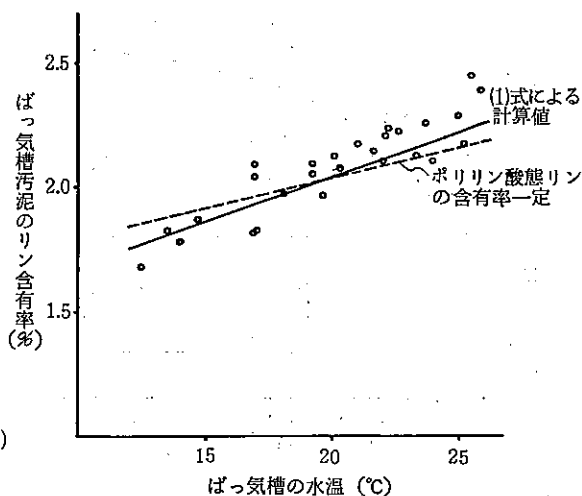


図5 水温と汚泥のリン含有率の関係（三沢団地）

ばっ気槽の滞留時間が36時間未満の施設はばらつきがあるが、実線に近いものが多く、三沢団地のポリリン酸態リンの生成量が平均的な値と考えてよい。なお、処理水NH₄-Nが15mg/ℓ以上の施設はこの実線より高い値を示している。この理由として、硝化菌の増殖が進まないため、ばっ気槽の微生物量が小さくなり(1式のαが小さい)、MLSS中の化学結合性リンの割合が高まったことが考えられる。

以上のように(1式)によって汚泥のリン含有率とMLSS・V₁/Qの関係を概ね示すことができる。

イ 処理水T-PとMLSS・V₁/Qの関係

(1式)を使って処理水 T-PとMLSS・V₁/Qの関係を求めると、住宅団地汚水処理施設の流入水のT-Pを4 mg/ℓとすれば、処理水T-Pは次式で示される。ただし、(1)で検討した汚泥からのリンの溶出・溶離はないものとする。

$$P_w = 0.004 - P_0 \Delta S / Q \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$\Delta S / Q = \alpha l_0 r_B - \beta S a_1 V_1 / Q + \gamma S_s$$

$$= \alpha l_0 r_B - \alpha \beta l_0 r_B / (1/n + \beta) + \gamma S_s$$

- P_w : 処理水T-P (kg/m³)
- ΔS : 余剰汚泥の固形物発生量 (kg/日)
- S a₁ : ばっ気槽の微生物濃度 (kg/m³)
- (前報(4)式により、S a₁・V₁/Q = α l₀ r_B / (1/n + β))

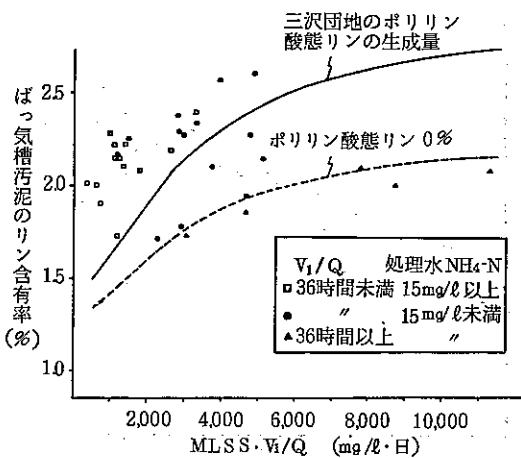


図6 MLSS・V₁/Qと汚泥のリン含有率の関係 (水温25℃前後)

ΔS/QとMLSS・V₁/Qの関係を図7に示す。ΔS/Qの式と(1式)を(2式)に代入して処理水T-Pを計算した結果を図8に示す。同図で明らかのように、MLSS・V₁/Qが上昇すると、処理水T-Pが高くなっていく。MLSS・V₁/Qが大きくなると、汚泥のリン含有率が増加するが、一方でΔS/Qがそれ以上の比率で減少するので、結果として処理水T-Pが上昇する。

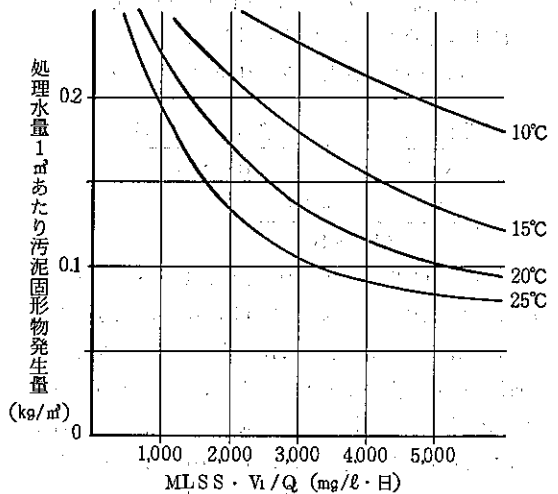


図7 MLSS・V₁/Qと汚泥発生量の関係

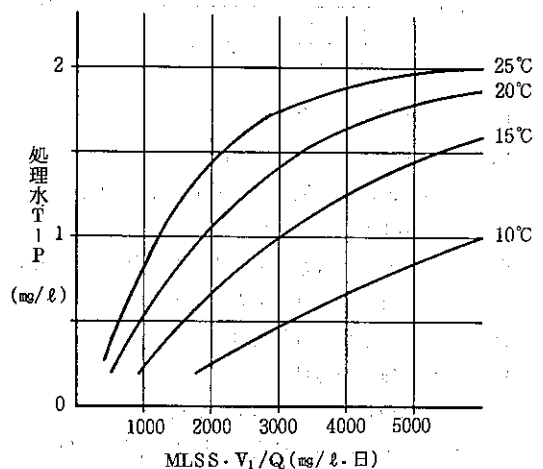


図8 MLSS・V₁/Qと処理水T-Pの関係 (余剰汚泥の迅速な濃縮と過ばっ気の防止が行われた場合)

以上のように、活性汚泥へのリン取込量を規定するのは $MLSS \cdot V_1 / Q$ であり、 $MLSS \cdot V_1 / Q$ を大きくすると、リン取込量が小さくなっていく。

4 リン除去率を高めるための方法

以上の検討により、通常の活性汚泥処理で処理水 T-P を極力小さくする方法が明らかとなった。その方法を以下に示す。

(1) 余剰汚泥の迅速な濃縮と過ばっ気の防止

まず、3(1)の検討結果を踏まえれば、リン除去率を高める第一の方法は汚泥からのリンの溶出・溶離を防ぐことである。そのためには、次の二点の対策を講ずる必要がある。第一点は汚泥に取り込まれたポリリン酸態リン及び生体性リンの一部を再溶出させぬよう、沈殿槽から引き抜いた余剰汚泥をすみやかに濃縮して分離液を取り出すことであり、第二点はばっ気槽でポリリン酸態リンを溶離させぬよう、過剰の空気を送らないことである。これらの方法の効果は各処理施設の状況によってまちまちであるが、(2)で後述するように処理施設全体で処理水 1 ℓ あたり T-P を 0.5mg 削減することができる。

前出の表 1 をみると、今回の調査対象 45 施設の中で、余剰汚泥のすみやかな処理を行っているのは全施設の 1/4 だけで、大半の処理施設は余剰汚泥を長時間、汚泥貯留槽に保管するか、または好気性消化を行っており、汚泥の処理方法の改善が必要である。

汚泥濃縮機がすでに設置されている施設は余剰汚泥を引き抜き後、直ちに濃縮機にかけるよう、汚泥処理のフローを改め、濃縮機のない施設は新たに汚泥濃縮機を導入して余剰汚泥の迅速な濃縮を行う。汚泥濃縮機の価格は濃縮機の機種によってかなり違う。最も価格の安い機種はシングルベルト式で、汚泥処理能力 $3 \text{ m}^3 / \text{時}$ のもの(処理水量 $500 \sim 1000 \text{ m}^3 / \text{日}$ の施設に該当)が 350 万円、リース式だと、月々 7 万円強の支出である(昭和 62 年 2 月時点の価格)。汚泥濃縮機を導入すると、汚泥搬出量の減少で汚泥の処分費用が大幅に節減されるから、経済面でも汚泥濃縮機を導入した方が有利である。

(2) 最小 MLSS の維持

処理水 T-P を小さくする第二の方法は 3(2)で示したように、 $MLSS \cdot V_1 / Q$ をできるだけ低い値にすることである。このうち、ばっ気時間 (V_1 / Q) は既設

の処理施設の場合は所与のものであるから、MLSS を最小に押さえることが必要となる。しかし、前報で述べたように、硝化と脱窒を進行させるためには MLSS をある値以上に保たなければならない。したがって、生物学的脱窒素法を導入して、且つ、リン除去率を極力高めるためには、硝化・脱窒を進める上での MLSS の最小値を維持する必要がある。

前報の表 5 に示す生物学的脱窒素法の導入が可能 33 施設について、導入後、必要最小の MLSS を維持するという前提で処理水 T-P を計算し、現状と導入後の処理水 T-P の分布を描いたのが図 9 である(現状は年平均の推定値、導入後は水温 20°C の時の値)。ただし、余剰汚泥の迅速な濃縮を行っていない施設は生物学的脱窒素法の導入に伴って余剰汚泥の処理方法も改善するものとした。

この図に示すとおり、必要最小の MLSS が維持され、同時に、(1)で述べた余剰汚泥の迅速な濃縮と過ばっ気の防止が行われれば、生物学的脱窒素法導入後の処理水 T-P は $0.5 \sim 1.1 \text{ mg} / \ell$ (平均 $0.95 \text{ mg} / \ell$) となり、現状のリン排出量を約半分に減らすことができる。

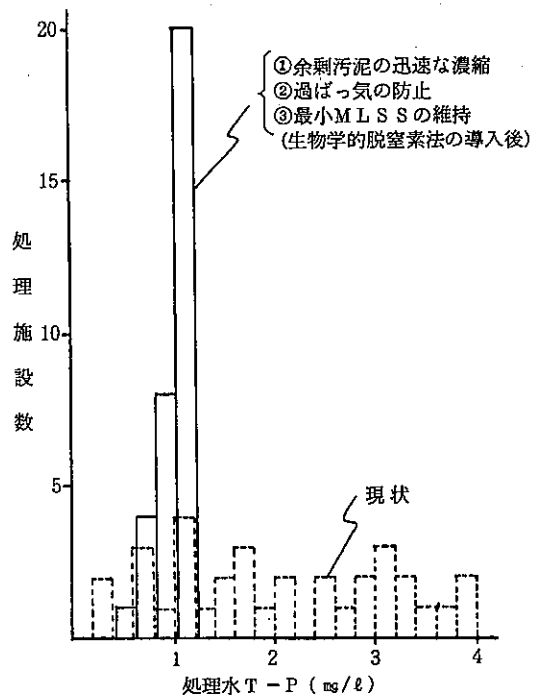


図 9 リン除去率を高める方法の効果

参考のため、余剰汚泥の処理方法が現状のまま、必要最小のMLSSの維持のみを行った場合を想定し、迅速な汚泥濃縮を行っていない施設では汚泥中のポリリン酸態リンの全量と生体性リンの10%が溶出するものとするれば、生物学的脱窒素法導入後の処理水T-Pは1.2~1.7mg/ℓ(平均1.45mg/ℓ)になる。リン排出量を現状より25%程度小さくすることができる。なお、この平均と図9の改善後の平均0.95mg/ℓとの差、0.5mg/ℓが余剰汚泥の迅速な濃縮と過ばっ気の防止によるリン削減効果である。

5 おわりに

今回の研究により、次の諸点が明らかとなった。

(1) 届け出排水量500m³/日以上住宅団地汚水処理施設、45施設の処理水T-Pは0.2~3.8mg/ℓ(平均1.9mg/ℓ)で、リンの平均除去率は50%強である。調査対象のうち、9施設は生物戸過、砂戸過、凝集沈殿などの三次処理を行っていたが、凝集沈殿でリンが取れる以外は三次処理のリン除去効果は殆どなかった。

(2) 凝集剤を用いないで、活性汚泥処理の処理水T-Pを極力小さくするためには、①引き抜き汚泥からのリンの回帰を防ぐため、引き抜いた余剰汚泥をすみやかに濃縮すること、②活性汚泥のリン吸着力を低下させないよう、ばっ気槽に過剰の空気を送らないこと、③汚泥固

形物発生量の減少によるリン除去率の低下を防ぐため、必要最小のMLSSを保つことの三点が必要である。

(3) 上記三点の条件が充たされれば、今回の調査対象は生物学的脱窒素法導入後も処理水T-Pが0.5~1.1mg/ℓ(平均0.95mg/ℓ)となり、リン排出量が現状の約半分になる。

今後は、活性汚泥処理のリン除去率を高める上で重要な要素であるポリリン酸態リンの生成条件とその機構の解明に取り組むとともに、処理施設外での汚泥処分の過程で汚泥中リンが再溶出して水系に戻ることがないかどうか、汚泥中リンの挙動を追う調査を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 嶋津暉之他：既設処理施設の窒素・リン除去に関する研究(2)，東京都環境科学研究所年報，94(1986)
- 2) 嶋津暉之他：住宅団地汚水処理施設への窒素・リン除去技術適用の可能性(その1)——窒素の除去——，東京都環境科学研究所年報，84(1988)
- 3) 宮 昌子他：嫌気好気法におけるリン除去特性の検討，下水道協会誌，22(5)，45(1985)
- 4) 味埜 俊他：活性汚泥のリン組成とリン代謝に関する研究(第1報)，下水道協会誌，20(5)，35(1983)