

(19) 単段式活性汚泥法による窒素除去 (第1報)

—混合液循環法の運転について—

建設省土木研究所

○酒井 憲司

京都市下水道局

住山 淳

1. はじめに

湖沼、海域などの閉鎖性水域の富栄養化を防止するためには窒素、リン等の栄養塩の流入を削減することが必要になるものと予想される。これらの水域へ流入する窒素、リンの供給源としては都市廃水、工場廃水の他に農地からの流出、畜産廃水などが挙げられ、水域に応じてその比重は異なっている。しかしながら下水道の整備に伴ない下水道を経て放流される量が増加することが予想され、下水処理場において窒素、リンの高度除去が必要になるケースが増えるものと思われる。

土木研究所ではこれらの栄養塩の除去技術について調査を行なってきた。本討論会には凝集沈殿 (第9回～第11回) 及び凝集剤添加活性汚泥法 (第12回～第14回、第16回) によるリンの除去について報告してきた。今回は単段式の活性汚泥法による窒素除去について報告するものである。

窒素の除去技術は大別して生物学的手法と物理化学的手法の2つの手法があるが、下水のように有機物を含む廃水に対しては生物学的手法が主流になるものと思われる。生物学的手法による窒素除去については既にし尿処理の分野で実用化されており良好な結果が得られているようである。下水とし尿とで技術の適用にあたり大きく異なる点は廃水の濃度の違いである。窒素の濃度でみると1桁以上の差があり、これが滞留時間や薬剤添加率の差として現われている。また廃水の温度の違いは硝化、脱窒という生物反応に大きな影響を及ぼしている。し尿の場合は一年を通して最適温度に保つのが比較的容易であるのに対して下水の場合は後述するように低水温期の対策がキーポイントとなる。し尿の窒素除去には活性汚泥法のような浮遊法による例が多いが、下水 (ないしは下水程度の濃度の廃水) の場合には回転円板や接触酸化といった固着法によるものが多い。筆者らは下水を対象とした窒素除去を考える場合、既設施設での応用という面もふまえて我が国で広く用いられている活性汚泥法においてどれだけ窒素除去が期待できるかという問題が当面の課題と判断し本調査を実施した。今回報告するのは標準法の運転に対しエアレーションタンクの前半を嫌気性槽とし後半の好気性槽の末端から混合液を嫌気性槽へ循環させるという運転条件の変更によりどれだけ窒素除去率が改善されるかについての調査結果であり、エアレーションタンク滞留時間は流入水量ベースで8時間と標準法並みの値とした。

2 調査方法

調査は京都市鳥羽下水処理場に設置したパイロットプラントを用いて行なった。プラントはエアレーションタンク (1槽 2.5 m^3 、8槽直列) と最終沈殿池 (円形と矩形各1槽、各槽 5.0 m^3) から成り立っている。流入原水は鳥羽処理場の初沈流出水で水量は $600\text{ m}^3/\text{日}$ の定量流入である。エアレーションタンクと最終沈殿池の滞留時間及び最終沈殿池の水面積負荷は各々8時間、4時間

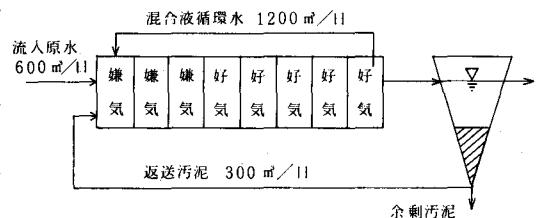


図-1 混合液循環法の運転フロー

16 m/日である。パイロットプラントの運転フローを図-1に示す。循環比2という値は与えられた流入条件及びプラントの能力の点から最も高い窒素除去率が得られると予想して設定したものである。図-1の条件は調査期間中全く変更していない。

データはエアレーションタンク混合液と返送汚泥については定時 (午前10時) 採取の試料、流入原水と処理水は24時間の混合試料によるもので、試料の採取頻度は概ね1週間に1回である。調査期間は1979

年9月から1980年4月までの8カ月である。

混合液循環法の結果に対する対照としての標準法の結果としては鳥羽処理場の各系列のうちパイロットプラントと同じ水を流入原水としている系列の結果を用いた。この系列の運転条件はエアレーションタンク滞留時間が8～9時間、返送汚泥率が25%、最終沈殿池の滞留時間及び水面積負荷は各々4時間前後、23～25 m³/日となっており規模と返送汚泥率を除くとパイロットプラントと概ね等しくなっている。以下パイロットプラントを混合液循環法、鳥羽処理場の某系列を標準法と呼ぶこととする。

3. 調査結果

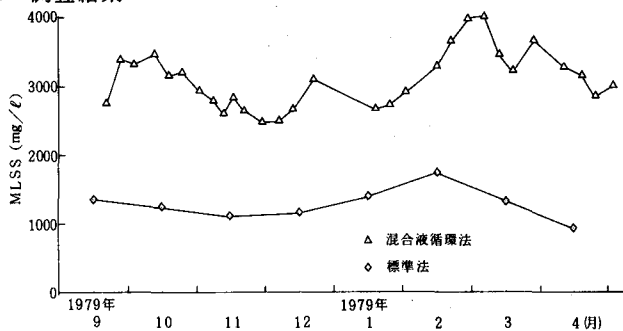


図-2 MLSSの変化

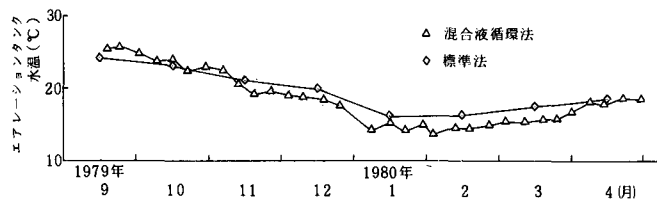


図-3 エアレーションタンクの水温の変化

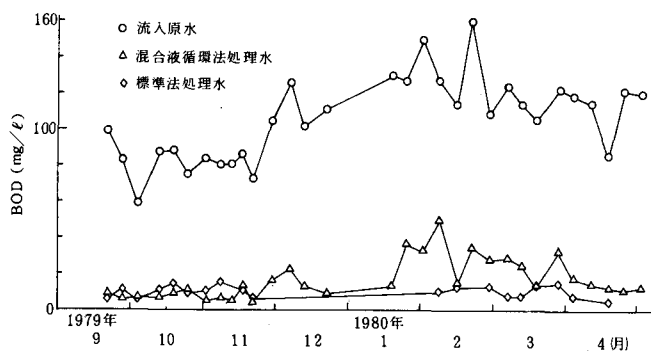


図-4 BODの処理結果

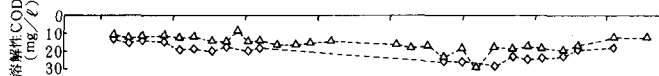
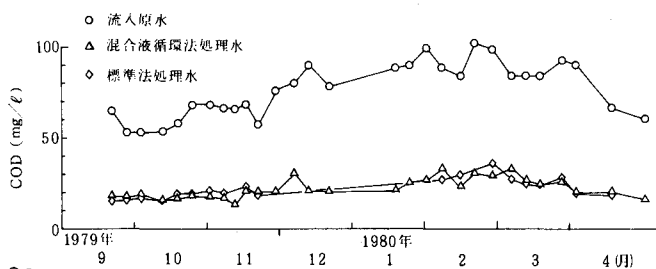


図-5 CODの処理結果

調査期間中の運転結果のうちエアレーションタンクのMLSSと水温を図-2、図-3に、流入原水及び処理水のBOD、COD(過マンガン酸カリウム酸性法)、SS、窒素(org-N, NH₄-N, 及びNO_T-N)、全リン、アルカリ度については図-4～図-9に示す。分析方法は全リンが混合試薬法である他は全て下水試験方法に基づいている。なおNO_T-NはNO₂-NとNO₃-Nの和をさしている。

図-2～図-9の結果から混合液循環法と標準法の処理水質について概観すると次のような点が指摘できる。まず混合液循環法の処理水では全体的にSSと全リンの値が高くなっている。逆に窒素と溶解性CODの値は低くなっている。季節変化を見ると1月下旬から3月にかけて処理水質が悪化しており特に窒素とBODで顕著である。標準法の処理水ではBODが全期間を通じて10 mg/L前後と低く安定しているのが特徴的である。また4月を除いて硝化はほとんど起きていない。2月から3月にかけてSSとCODの値が少し高くなっている。

これらの結果を見る限りでは本調査の標準法の運転は硝化を抑制しBODの除去に主眼を置いたものと評価することができる。両法とも1月から3月にかけて処理水質が悪化しているのはこの季節には水温が低下し、かつ流入原水の濃度が高くなるのが主な原因といえる。そこで調査期間を9月～12月、1月～3月、4月の3つの時間に分けて運転条件と処理成績をまとめてみた。結果を表-1に示す。

4. 考察

図-2～図-9及び表-1から混合液循環法の結果について硝化，脱窒，他の水質項目への影響の3点から考察を行なった。

4.1. 硝化

1月から3月の時期を除き処理水中に $\text{NH}_4\text{-N}$ はほとんど検出されていない。処理水に残留する K-N はほとんどが有機態窒素(org-N)でその値は2～3 mg/l とほぼ一定である。これらの org-N にはSSに由来するものの他溶解性の形で残留しているものもあり， $\text{NH}_4\text{-N}$ への分解，硝化を受けずに放流されている。9月～12月と4月のデータから $\text{BOD}\cdot\text{SS}$ 負荷， BOD 容積負荷，窒素容積負荷， SRT を求めると各々0.15と0.17($\text{kg/kg}\cdot\text{日}$)，0.43と0.54($\text{kg/m}^3\cdot\text{日}$)，0.11と0.14($\text{kg/m}^3\cdot\text{日}$)，1.3と9.3(日)となっている。なお SRT 以外はエアレーションタンクの好気性槽の部分に対する負荷として計算している。

流入原水中のアルカリ度は120～160 mg/l あり処理水では40～70 mg/l に減少している。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少分が硝化されたとしてアルカリ度の減少を計算(アルカリ度の減少= $7.1\times\text{NH}_4\text{-N}$ の減少とする)すると90～130 mg/l となり実測値よりかなり高くなっている。このギャップは脱窒によるアルカリ度の生成によるものと判断される。但し原水中のアルカリ度でも硝化によるアルカリ度の減少をカバーすることができており，硝化の進みやすい環境を作っていることが推定される。

1月から3月の時期には処理水中に0.2～1.1 mg/l という $\text{NH}_4\text{-N}$ が検出されている。処理水中には $\text{NH}_4\text{-N}$ と同時に $\text{NO}_3\text{-N}$ が数 mg/l 存在しており，汚泥には硝化能力が存在しているが何らかの形で阻害を受けていることが予想される。運転条件と流入水質を検討したところ阻害の原因として流入負荷(特に BOD

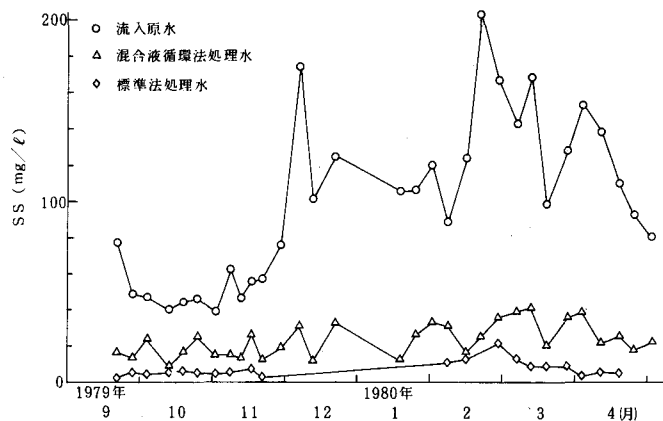


図-6 SSの処理結果

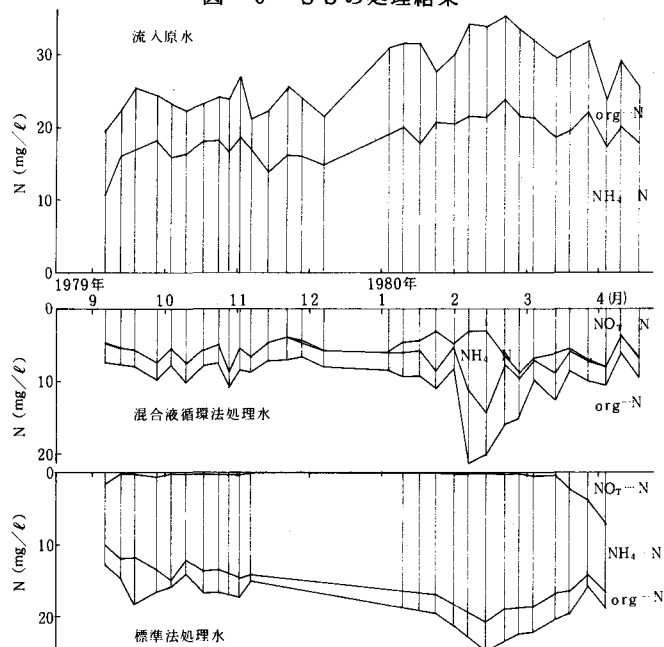


図-7 窒素の処理結果

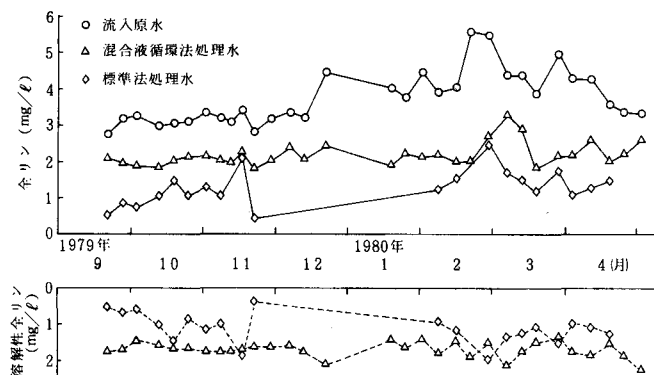
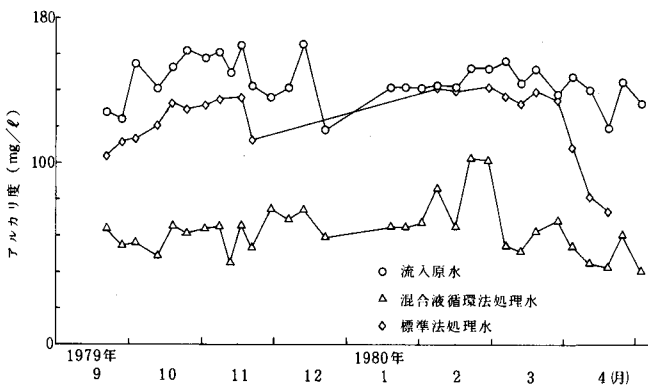


図-8 リンの処理結果

表一 1 運転条件及び処理水質の総括

期 間 区 分	混 合 液 循 環 法						標 準 法					
	9月～12月		1月～3月		4月		9月～11月		2月～3月		4月	
A.T. 水温 (°C)	22.0 (18.6～25.7)		15.1 (13.8～15.9)		18.1 (16.8～18.7)		22.9		17.0		18.8	
MLSS (mg/ℓ)	2950 (2490～3450)		3360 (2690～4020)		3090 (2860～3300)		1230		1540		950	
SV ₃₀ (%)	47 (34～78)		85 (76～90)		86 (85～89)		15		16		9	
SVI	160 (100～250)		260 (220～320)		190 (150～220)		122		104		95	
SRT (日)	13		10		9.3		6.9		4.9		7.7	
*BOD・SS負荷 (kg/kg・日)	0.15 (0.085～0.24)		0.18 (0.13～0.23)		0.17 (0.13～0.20)		0.18		0.20		0.26	
*BOD容積負荷 (kg/m ³ ・日)	0.43 (0.28～0.61)		0.60 (0.51～0.77)		0.54 (0.41～0.59)		0.30		0.31		0.25	
*窒素容積負荷 (kg/m ³ ・日)	0.11 (0.094～0.13)		0.15 (0.13～0.17)		0.14 (0.12～0.15)		0.063		0.083		0.067	
流入水のBOD・N比	3.9 (2.3～5.1)		4.0 (3.2～4.7)		4.0 (3.6～4.7)		3.5		3.8		3.7	
水 質 分 析	流入水	処理水	流入水	処理水	流入水	処理水	流入水	処理水	流入水	処理水	流入水	処理水
BOD (mg/ℓ)	90	10	126	28	112	14	81	10	117	12	107	9.9
COD (")	67	20	92	28	73	20	62	19	89	29	79	19
全窒素 (")	23.4	8.0	32.0	12.6	28.3	8.9	23.4	15.8	31.8	21.9	28.9	18.0
全リン (")	3.23	2.07	4.42	2.28	3.73	2.31	3.10	1.06	4.41	1.61	4.01	1.24
SS (")	71	19	132	29	114	25	52	4.4	130	12	133	4.2
アルカリ度 (")	147	63	147	72	138	50	149	123	148	139	136	88

*混合液循環法の負荷はいずれもエアレーションタンクの好気性槽に対する値



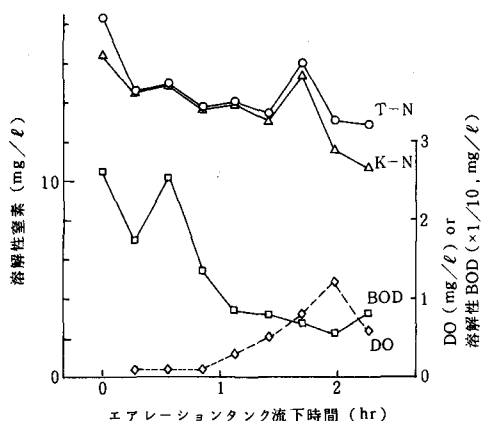
図一 9 アルカリ度の処理結果

水がエアレーションタンクの流下に伴ないどのように変化するかを調べたもの)を行なった結果があるので図一 10, 図一 11に示す。図一 10は2月で処理水質の良くない時期, 図一 11は3月で処理水質が回復した時期のもので溶解性BOD, 混合液DO, 溶解性のT-NとK-Nについて示してある。図一 10を見ると好気性槽に入ってもDOの回復が遅く第7槽でようやく1mg/ℓを越えている。このためBODの除去や硝化が抑制されていることが分かる。図一 11では第5槽(好気性槽の2番目)ですでにDOが1mg/ℓを越えており, この槽から硝化が起きている。溶解性BODは第1槽も第8槽とほとんど変わらず嫌気性槽でかなりの部分が除去されている。以上の結果から1月から3月の低水温かつ高負荷の時期の対策としては負荷に応じて送気量を増やすこと, 硝化を確実に起こすために好気性槽の滞留時間を少し長くすることが必要である。図一 11から好気性槽の必要滞留時間は6～7時間(運転条件より1～2時間長い値)と判断できる。

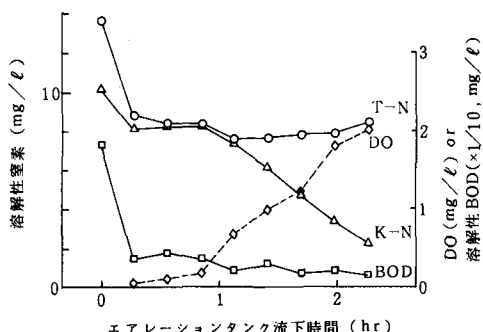
4.2. 脱窒

脱窒は基本的には嫌気的環境, 有機物, 酸化態窒素, 脱窒菌の4者の存在を必要としている。これらのうち運転上問題になるのは嫌気的環境の維持と有機物の確保の2点である。前者についていえば嫌気的条件を作れるかどうかは循環水や混合液の攪拌によるDOの持ち込みと嫌気性槽での汚泥の酸素消費速度から決

と窒素)の増大と酸素供給量の不足をあげることができる。データとしては挙げていないが2月～3月の運転をみるとエアレーションタンク末端のDOが2mg/ℓ以下という日がしばしばあり流入BODの増加に対して十分な酸素を供給できていなかった可能性がある。2月下旬から空気量を約10%増やしており, その結果処理水質が徐々に回復している。この間の処理特性についてはエアレーションタンク追跡調査(ある時刻に流入した下



図一10 エアレーションタンク追跡調査(1980年2月)



図一11 エアレーションタンク追跡調査(1980年3月)

まると言える。本調査では嫌気性槽でDOを十分に下げることができないために脱窒が阻害を受けた例はなかったがMLSSの低い場合や流入下水の濃度が降雨などのため低下した場合、空気で攪拌を行なう場合、好気性槽との仕切りが不十分な場合には脱窒が不十分になる恐れがある。また脱窒が可能という場合でもDOの持ち込みが多いと有機物の消費量が増えるので脱窒にとって不利になるためDOの持ち込みは極力低く抑えることが望ましい。

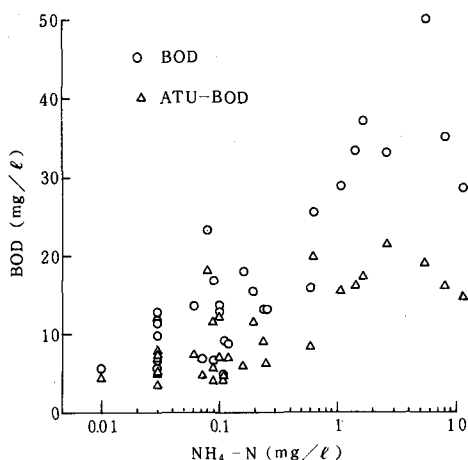
脱窒のための有機物としては本調査では流入原水中の有機物のみを利用している。図一11は運転が良好なときの例であるが、嫌気性の3つの槽で酸化態の窒素はほとんど脱窒されていることが分かる。図一11のパターンは脱窒に対して有機物の量が制限因子になっていないことを示しており、9月～12月と4月の結果も同様のパターンによるものと推定できる。有機物が制限因子になっていないことの原因としては流入原水のBOD:Nの比の値が4.0前後あること、混合液循環法では流入した窒素の全量を脱窒するのでなく循環水として送られる量(循環比2の場合はせいぜい流入の2/3)を対象としていることがあげられる。

調査期間中の窒素除去率(流入原水と処理水の値から求めたもの)は9月～12月、1月～3月、4月で各々66, 61, 69%となっている。ちなみに標準法の場合では同じ時期で各々32, 31, 38%となっており混合液循環法の効果が現われている。なお除去された窒素のうち一部は余剰汚泥として引抜かれたものである。これを流入水量ベースに換算した値を求めると3～6mg/Lであり、窒素除去のほとんどが脱窒によるものであることが分かる。

4.3 他の水質項目への影響

すでに述べたように混合液循環法の処理水では全般的にSSが高い。これは汚泥のSV₃₀が高いこと、最終沈殿池での脱窒による汚泥浮上などに起因するものと推定される。SSの高いことがBODやCODの値を高める一因となっている。

処理水BODの動きはSSの他に処理水中のNH₄-Nとの関係が深い。図一12に調査期間中の混合液循環法処理水のBODとNH₄-Nの関係を示す。図一12を見ると硝化が進み処理水のNH₄-Nが0.3mg/L以下の場合にはBOD20mg/L以下になっているがNH₄-Nが0.6mg/Lをこえると急にBODが高くなり20mg/Lをこすようになる。BODが高いのがフランビン中の硝化によるものか、それともBODの除去自体が不十分なのかを調べるためATU-BOD(フランビンにアルチオ尿素を添



図一12 混合液循環法処理水のNH₄-NとBOD

加し $\text{NH}_4\text{-N}$ から $\text{NO}_2\text{-N}$ への硝化を抑制した BOD)を同時に測定しており図-12に合せて示している。これを見ると ATU-BOD では $\text{NH}_4\text{-N}$ の増加に対して BOD の場合と似たような挙動を示しているが、増加量は BOD の場合ほど大きくない。このことは硝化が不十分で処理水に $\text{NH}_4\text{-N}$ が残留するようなときには主として硝化による BOD が大きくなることから処理水 BOD を高くする恐れがあることを示している。標準法のように硝化がほとんど起きていない場合には今述べたことはあてはまらず、処理水の BOD と $\text{NH}_4\text{-N}$ の関係はない。標準法で4月に入り硝化が起き $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_T\text{-N}$ が共存しながら BOD が低いのは処理水の SS が低いことが原因と考えられる。以上の考察から混合液循環法の運転では脱窒のみならず BOD を低くするという目的のためにも硝化を完全に行ない処理水中に $\text{NH}_4\text{-N}$ を流出させないことが最も重要となることが指摘できる。

処理水の COD のうち溶解性 COD については調査期間全てにおいて混合液循環法の方が低くなっている。 MLSS を高くし汚泥に対する COD の負荷を軽くしたことが原因と思われる。但し全 COD については処理水の SS が高いため標準法とあまり差がない結果となっている。処理水の単位 SS 当りの COD は $0.3 \sim 0.4 \text{ mg/mg}$ であった。

リンの除去については標準法より劣っている。除去されたリンは原理的には余剰汚泥として引抜かれるリンの量とバランスしているため余剰汚泥量が少なく SRT の長いプロセスではリン除去に不利になる傾向がある。混合液循環法で余剰汚泥として引き抜かれたリンの量と流入原水と処理水の値から求めたリン除去量の比を求めると9月～12月、1月～3月、4月で各々 0.86 、 0.75 、 1.2 となっており余剰汚泥量の減少(及びそれに伴うリンの引抜量の減少)がリン除去にマイナスの影響を与えていることが分かる。調査期間中の全リンの除去率は9月～12月、1月～3月、4月の各時期で各々 36 、 48 、 38% となっている。同時期の標準法の除去率は各々 66 、 63 、 69% であり混合液循環法の方がかなり低くなっている。

5. まとめ

以上の結果から混合液循環法の運転についてまとめると次のようになる。

- a. エアレーションタンク滞留時間8時間(うち嫌気性槽3時間、好気性槽5時間)、循環比2という条件で運転したところ $66 \sim 69\%$ の窒素除去率が期待できることが分かった。
- b. 流入原水の $\text{BOD} \cdot \text{N}$ 比は 4.0 、アルカリ度は 145 mg/l であり運転上薬剤等の添加は不要であった。
- c. 運転上支障が生じたのは低水温期に高濃度の原水が流入したときであり、この対策として好気性槽の送気量と滞留時間を大きくすることが必要である。好気性槽滞留時間は $6 \sim 7$ 時間程度必要と判断される。
- d. 運転を安定したものにするためには硝化を完全に起こすことが重要である。硝化が不十分になると窒素除去率が低くなるだけでなく処理水 BOD が高くなる恐れがある。
- e. 今回報告したような形の混合液循環法の運転では SS と全リンの除去率が標準法に比べて低くなる。逆に溶解性 COD の値は標準法の方が高い。