

を解決することで、当処理方法は嫌気無酸素好気法等と同等以上の処理水質を少ないエネルギーで確保できる理想的な処理法となり得る。

3 りん処理とステップ比

3.1 嫌気槽 BOD-SS 比と処理水全りん濃度

上述のように、ステップ A₂O 法は、りん処理に課題がある。しかしながら、処理プロセスを考慮すると、有機物が十分に嫌気槽に供給されれば、嫌気無酸素好気法と同等のりんの除去性能が得られると考えられる。このため、嫌気槽での BOD-SS 負荷と処理水全りん濃度を評価指標としてステップ A₂O 法のりんの除去性能を検証した。

図 2 は、ステップ A₂O 法と嫌気無酸素好気法の嫌気槽での BOD-SS 負荷と処理水全りん濃度との関係を示したものである。ステップ A₂O 法は平成 25 年 1 月～26 年 3 月まで、嫌気無酸素好気法は平成 23 年 8 月から平成 26 年 3 月までの、月一回測定した 1 日平均 BOD を用いてその時の処理状況から BOD-SS 負荷を計算した。ここでデータ採取期間が両処理法で異なるのは、施設の稼働時期の違いによる(ステップ A₂O 法施設は平成 24 年度稼働開始)。

図 2 より、ステップ A₂O 法と嫌気無酸素好気法ともに、BOD-SS 負荷が 0.6kg/kg-MLSS/d を下回ると急激に処理水全りん濃度が上昇する傾向が見られた。ステップ A₂O 法は、流入下水 BOD 濃度低下時にもりんの除去性能が比較的安定するとの報告⁽³⁾があるが、データ数が少なく同図から明確には判断できない。いずれにせよ、嫌気槽での BOD-SS 負荷を高く維持すれば、当処理法においても嫌気無酸素好気法と同等のりんの除去性能が得られると考える。

3.2 ステップ比と処理水全りん濃度

ステップ A₂O 法ではステップ比により嫌気槽の MLSS や流入下水量が変動し、それに伴い同槽での BOD-SS 負荷が変化する。図 3 は、図 2 より得られるステップ A₂O 法における嫌気槽 BOD-SS 負荷と処理水全りん濃度の関係式から、平時の処理状況(処理水量 1,000m³/h、反応槽末端 MLSS 2,000mg/L)における流入下水 BOD 濃度と処理水全りん濃度日平均値の関係を、ステップ比ごとまとめたものである。図 3 では、ステップ比が

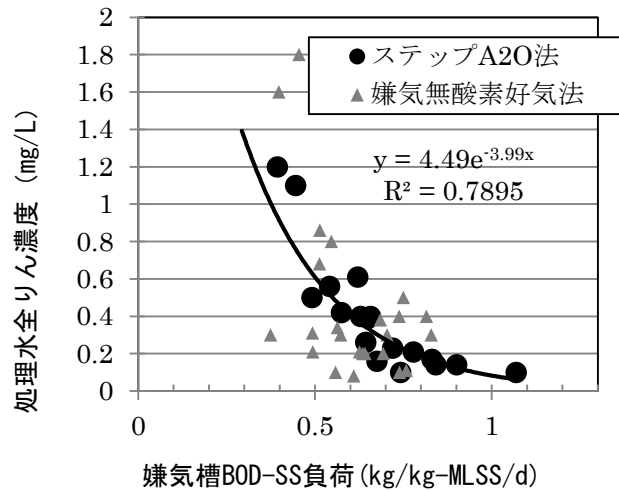


図 2 BOD-SS 負荷と全りん濃度の関係

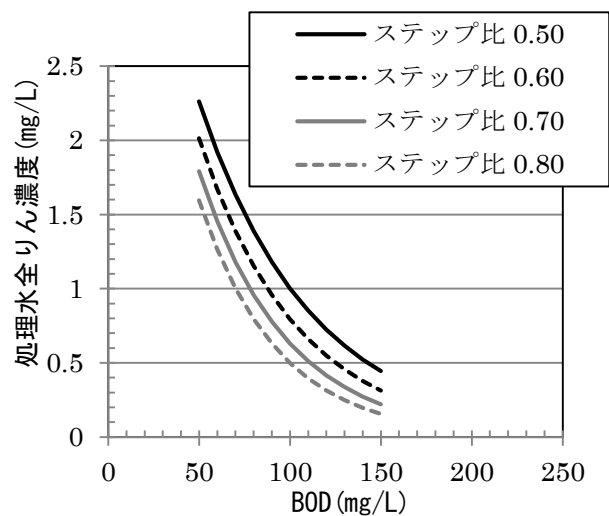


図 3 BOD と全りん濃度の関係

高くなるにつれ全りん-BOD 曲線が全りん低濃度側にシフトしている。これより、ステップ比が高いほど流入下水 BOD 濃度低下時においても全りん濃度が低く抑えられると考えられる。このことは、ステップ A₂O 法におけるりんの除去性能に関する既報の論文⁽⁴⁾と結論が一致する。ただし、ステップ比が 1.0 に近づくと嫌気硝化脱窒法(AOAO 法)となり、逆にりん処理が不安定になると考えられる⁽⁵⁾ことから、りん処理を安定的に行うためのステップ比については、今後も検討を継続する必要がある。

3.3 水量急増時への対応

ステップ A₂O 法の反応槽は、隔壁の数が多いことから、内部の流動が完全混合+押出流れとなっていると考えられる⁽⁶⁾。このため、水量変動に対する緩衝作用が弱く、水量急増時には処理水全りん濃度が一時的に高濃度となる危険性が高まる。合流式下水道の場合、降雨時等には短時間で大量の下水を処理する必要があることから、水量急増時にも安定的にりん処理を行うための運転方法の確立が課題となる。

図 4 は反応槽内 PO₄-P 濃度の状況把握を目的に行った調査結果である。図より、ステップ比 0.75 では第二無酸素槽での PO₄-P 吐出しが抑えられており、第二好気槽入口の PO₄-P 濃度が約 3.0mg/L と低い。このため、ステップ比 0.75 においては、ステップ流入下水量が急増し、第二好気槽での HRT が急激に低下した場合にも、りん処理に大きな影響は出ないと考えられる。そこで、降雨時等におけるりん処理安定化の観点から、流入下水量の増加時にステップ流入下水量のみを増加させる運転を検討した。図 5 は、おおむねステップ比 0.75 一定制御、図 6 はステップ比 0.75 時に表 1 に従い流

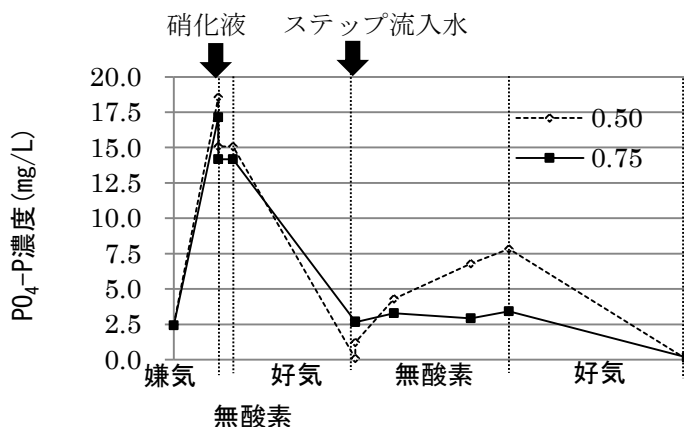


図 4 反応槽でのりん処理状況 (H24 年 11~12 月調査結果)

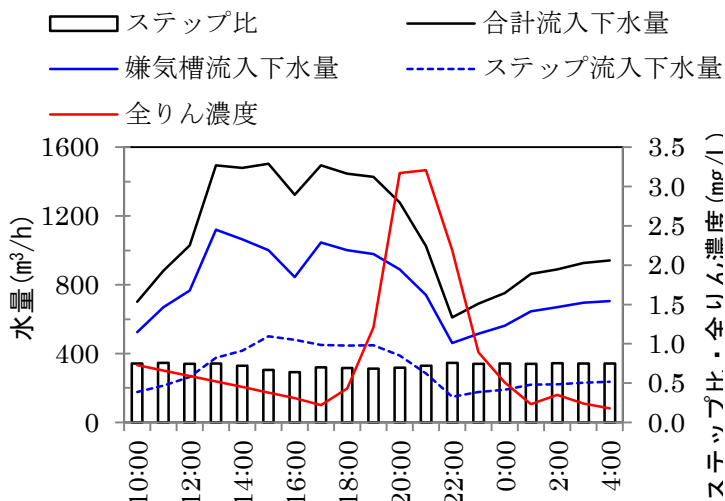


図 5 処理水量と全りん濃度 (H24/11/26~11/27)

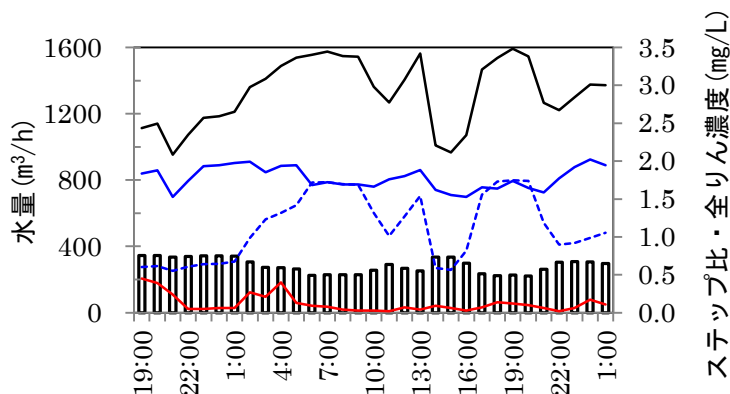


図 6 処理水量と全りん濃度 (H25/9/24~9/25)

入下水量の増加に伴ってステップ比を調整した時の処理水全りん濃度の経時変化である。図5では反応槽への流入下水量とともに嫌気槽流入下水量が増加し、その後しばらくして処理水全りん濃度が急上昇した。一方、ステップ比の調整により、嫌気槽への流入下水量を一定に保ちつつステップ流入下水量のみを増減させた図6では、9/25 1:00 から流入下水量が急増したものの、その後の全りん濃度の上昇は見られなかった。このように、通常時に高ステップ比で運転しつつ、水量に合わせてステップ比を調整することで、水量急増時にも安定的なりん処理が可能となる。

表1 流入水量とステップ比

流入下水 量	ステッ プ比	嫌気槽流入 下水量
1,200	0.60	720
1,300	0.60	780
1,400	0.60	840
1,500	0.55	825
1,600	0.50	800

4 窒素除去率と必要送風量

りん処理を安定的に行うために高ステップ比での運転が有効となることを述べた。以下では、処理性能を維持しつつ送風量を低減できるような運転条件を検討した結果について報告する。

4.1 第一好気槽 NH₄-N 設定値と送風量

一般に嫌気無酸素好気法では、処理水 NH₄-N 濃度が上昇すると窒素除去率が低下する。一方、ステップ A₂O 法での窒素除去率は式-1 で表わされ、第一好気槽出口 NH₄-N 濃度の影響を受ける一方、処理水 NH₄-N 濃度の影響は受けない。このため、当処理方法では、NH₄-N 制御を用いることで、処理水 NH₄-N 濃度を一定に保ちつつ窒素除去率を変動させることができる⁽⁷⁾。当センターでは、図7に示すように NH₄-N 計を設置して第一好気槽と第二好気槽において NH₄-N 一定制御を行っている。ここで、窒素除去率に合わせて送風量が変動する場合、流入下水の季節的な水質変化等、処理状況に応じ、処理水質を良好に維持しながらも送風量を削減できると考えられる。

そこで、処理水 NH₄-N 濃度を一定に保ちつつ窒素除去率が変動するよう、各好気槽の NH₄-N 設定値を変更して運転を行い、送風量の変化を検証した。図8はステップ比および第一好気槽 NH₄-N 設定値を変更しつつ運転し、処理水量あたり送風量を比較したものである。具体的には

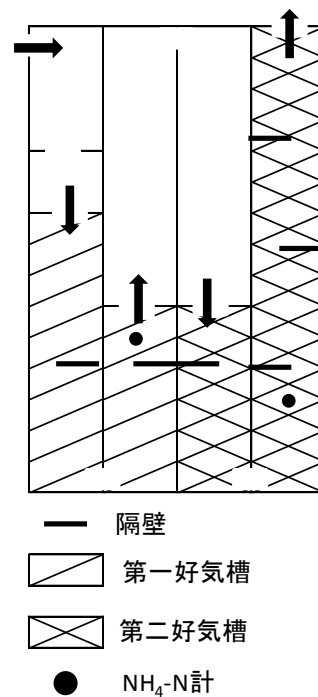


図7 好気槽平面図

$$E_N = \frac{(1-k) \times (\alpha + R_r + R_n)}{1 + R_r + R_n} \quad \dots \text{式-1}$$

$$k = \frac{NH_{4o1}}{NH_{4in}}$$

E_N : 無機窒素除去率 α : ステップ比
 R_r : 硝化液循環比 R_n : 汚泥返送比
 NH_{4in} : 反応槽流入下水 NH₄ - N 濃度
 NH_{4o1} : 第一好気槽出口 NH₄ - N 濃度

第一好気槽の NH₄-N 設定値を、ステップ比 0.75 では 5.0mg/L と 6.5mg/L、ステップ比 0.80 では 7.5mg/L と 9.0mg/L とし、各条件で 1 週間程度連続運転して比較した。なお、処理状況の比較のため、処理水量や汚泥返送量、処理水 NH₄-N 濃度、処理水全りん・全窒素濃度について、期間の平均値を表 2 に示した。図 8 より、ステップ比 0.75、0.80 とともに第一好気槽 NH₄-N 設定値を高くすることで必要送風量が低下した。一方、処理水質については、全窒素濃度が上昇したものの、NH₄-N 濃度や全りん濃度はおおむね一定であった(表 2)。このように、NH₄-N 設定値を高く設定して第一好気槽の硝化を抑制することで、窒素除去率が低下する一方で、必要送風量は低減できると考えられる。

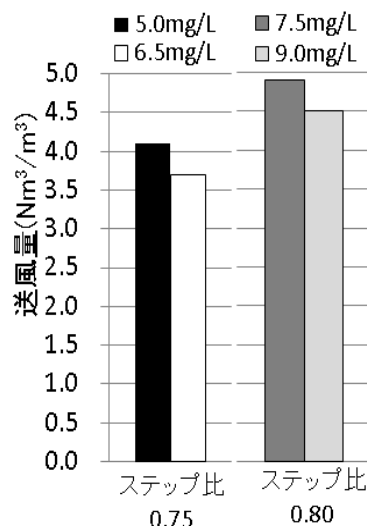


図 8 第一好気槽 NH₄-N 設定値と送風量

表 2 各条件の処理状況

ステップ比	処理水量 (m³/h)	流入下水水温 (°C)	NH ₄ -N (mg/L)		送風量 (Nm³/h)		全りん (mg/L)	全窒素 (mg/L)
			第一好気槽設定値	処理水※	第一好気槽	第二好気槽		
0.75	1,060	26.1	5.0	1.0	2,770	1,600	0.2	5.8
	1,020	27.2	6.5	0.4	2,100	1,720	0.2	6.6
0.80	980	22.3	7.5	1.4	2,892	1,941	0.3	7.5
	1,040	21.4	9.0	1.9	2,582	2,085	0.5	9.0

※第一・第二好気槽 NH₄-N 計測値から算出

4.2 第一・第二好気槽での硝化特性

処理水 NH₄-N 濃度が一定にもかかわらず送風量が低下する要因について、第一・第二好気槽の硝化特性の点から考察した。図 9 はステップ比 0.75 と 0.80 時における、各好気槽での硝化量と送風量との関係性を示したものである。反応槽流入下水の水量や水質がおおむね一定となるように調査日を選定し、各時刻の NH₄-N 濃度と処理水量等から時間当たりの硝化量を算出した。図 9 より、ステップ比 0.75 と 0.80 とともに、各好気槽で硝化量と必要送風量に明確な関係性が見られるとともに、第一好気槽に比べて第二好気槽の方が近似直線の傾きが緩やかで、硝化量当たりの送風量が少ないこ

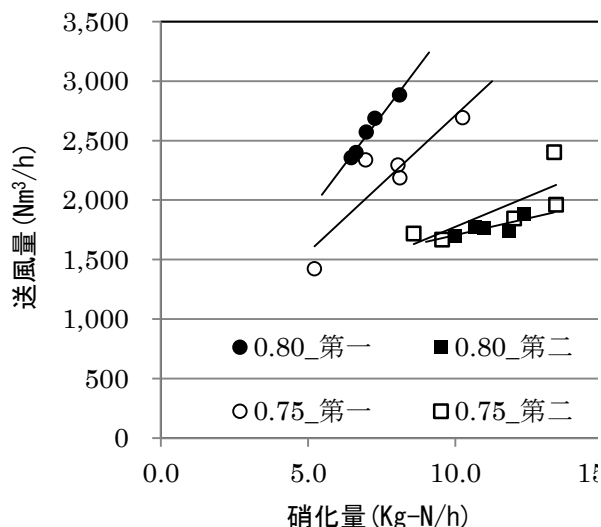


図 9 硝化量と送風量の関係

表 3 調査時の処理状況 (n=6)

ステップ比	流入下水量(m ³ /h)		硝化液循環量 (m ³ /h)	汚泥返送量 (m ³ /h)
	嫌気	ステップ		
0.75	650	220	140	430

とが分かった。

この理由について、水質面と構造面から考察した。水質的要因として、好気槽入口での有機物濃度の違いが挙げられる。図 10、表 3 は、平成 25 年 5 月に調査した、第一無酸素槽入口から第二好気槽出口までの各槽における溶解性成分の紫外吸光度 (E260) 及びその時の処理状況である。なお、図 10、表 3 とともに、6 回調査した結果を回数平均したものを示している。ステップ A₂O 法では、硝化液循環ポンプが小さいことから、第一無酸素槽での脱窒量が少なく、同槽での有機物濃度の低減効果は小さい。一方、第二無酸素槽では、第一好気槽で生成した NO_x-N を完全脱窒することから、有機物濃度の低減効果が大きい。図 10 に見られるように、今回行った調査でも、第一好気槽入口の E260 は 0.4 と、第一無酸素槽入口とほぼ同値であったが、第二好気槽入口の E260 は 0.2 と、第二無酸素槽入口と比較して 30%程度低い値となった。硝化菌は有機物濃度が低い環境で活発に活動する⁽⁸⁾ことから、この点が第二好気槽で硝化量当たり送風量が少ない一因と考える。

構造面の理由としては、水流の強さによる総括酸素移動容量係数 (KLa) の向上が挙げられる。なお、KLa は好気槽内の酸素供給能力を示す指標であり、KLa が高いほど単位時間当たりの酸素供給量が増加する。既報論文から槽内の流動状況は KLa に影響を及ぼすと考えられる⁽⁹⁾が、これは攪拌強度 G 値 (式-2、式-3) と KLa の関係から説明できる。図 11 は、25℃ の反応槽流入下水を、0.4L/min で曝気しつつ最大 550rpm まで徐々に回転速度を高めて攪拌し、各回転速度に対応する

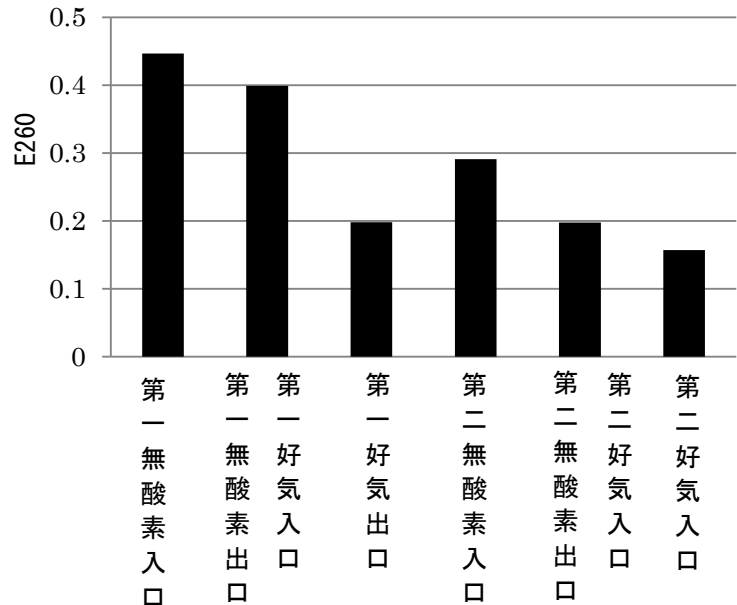


図 10 E260 測定結果 (ステップ比 0.75)

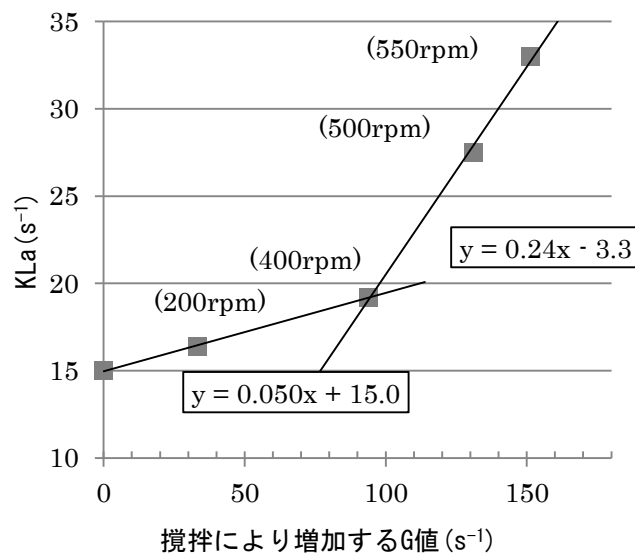


図 11 回転数・G 値と KLa の関係

KLa を測定した結果である。なお、実験結果をもとに実施での現象を考察するため、回転速度は式-2によりG値に変換している。同図に見られるように、KLaの初期値は $15s^{-1}$ であったが、G値とともに上昇し、最終的に $33s^{-1}$ と初期値の2倍以上の値となった。また、両者の関係性はG値 $90s^{-1}$ を前後して2本の近似直線で表すことができ、G値 $90s^{-1}$ 以上では、G値が $1s^{-1}$ 上昇するごとにKLaが $0.24s^{-1}$ (KLa初期値の1.5%程度に相当)と大きく上昇するようになった。送風量とKLaの関係を調べた既報論文には、気泡が小さいほど送風量の増加に伴うKLaの上昇速度が大きくなることが報告されている⁽¹⁰⁾。本実験において、目視では、G値が $90s^{-1}$ (400rpm)を超えると、気泡の細分化が起きることを確認した。このことから、攪拌強度の増加に伴うKLa上昇効果についても、気泡が小さいほど大きいと考えられる。

$$G = \sqrt{\frac{\rho C \sum_i (a_i v_i^3)}{2\mu V}} \quad (\text{フラッシュミキサ式}) \cdot \cdot \text{式-2}$$

$$G = \sqrt{\frac{\rho g Q h}{\mu V}} \quad (\text{迂流式}) \cdot \cdot \cdot \text{式-3}$$

G : 攪拌強度(s^{-1}) ρ : 水の密度(kg/m^3)

C : 攪拌翼抵抗係数 a_i : 攪拌翼面積(m^2)

v_i : 攪拌翼速度(m/s)

μ : 水の粘性係数($kg/(m \cdot s)$) g : 重力加速度(m/s^2)

Q : 流量(m^3/s) h : 損失水頭(m^3) V : 槽容量(m^3)

表4 各好気槽で水流により増加するG値(ΔG)

	第一好気槽	第二好気槽
処理水量	1,000 m^3/d	
循環率	返送 : 0.2 / 硝化液 : 0.14	
槽容量	2,320	3,370
隔壁	2	4
屈曲部	1	1
$\Delta G (s^{-1})$	ステップ比	
	0.75	0.80
	14.5	15.6
	25.0	

迂流式水路の場合、G値は式-3で定義されるように、水量と損失水頭の間数である⁽¹¹⁾。このため、処理水量が多いほど、隔壁の数が多いほど、攪拌効果が強まる。隔壁の数や槽容量等の構造上の情報を基に、平均的な処理条件において各好気槽で水流により増加するG値(ΔG)を計算した結果を表4に示す。表4より、第二好気槽の ΔG は第一好気槽に比べて $10s^{-1}$ 程度高かった。当反応槽では第一・第二好気槽とも、散気板の気孔径が小さく、生成する気泡が微細なことから、攪拌強度の増加によるKLa上昇効果は高いと考えられる。

4.3 第一好気槽 NH_4-N 設定値の範囲

これまでの結果から、第一好気槽の NH_4-N 設定値と処理水全窒素濃度及び送風量との関係は、第二好気槽で NH_4-N 制御を実施することを条件におおむね表5のように整理できる。実際の運用では、送風量と処理水質が目標を満足するよう、流入下水の水質に合わせて第一好気槽 NH_4-N 設定値を変動させる。このため、同槽における NH_4-N 設定値の至

表5 第一好気槽 NH_4-N 設定値と送風量・処理水質

第一好気槽 NH_4-N 設定値	送風量	処理水質 (mg/L)		
		NH_4-N	全窒素	全りん
高い	少ない	一定	高い	一定
低い	多い		低い	

適範囲を定量的に求めることが実務上の課題となる。

ここで、第一好気槽のNH₄-N設定値を上げていくと、同槽でのNO_x-N生成量が減少し、第二無酸素槽が嫌気槽と同様の機能を発揮するようになる。これによる弊害として、嫌気槽でのBOD-SS負荷の実質的な減少、第二無酸素槽でのPO₄-P吐出し等が考えられる。このため、第一好気槽NH₄-N設定値の上限は、これらの弊害を考慮し、費用対効果を見極めて判断する必要がある。これには長期にわたり高いNH₄-N設定値で運用し、データ採取を行わなければならないが、現時点では十分な結論が出せない。

一方、第一好気槽のNH₄-N設定値を下げていくと同槽でのNO_x-N生成量が増加するが、第二無酸素槽の脱窒能力を超えて生成したNO_x-Nは、その後脱窒されることはない。このため、第一好気槽NH₄-N設定値の下限は第二無酸素槽の脱窒能力から定量的に求めることができる。

ステップA₂O法では、ステップ比により第二無酸素槽での脱窒能力が変化する⁽¹²⁾ことから、第一好気槽NH₄-N設定値の下限については、各ステップ比について評価する必要がある。ここでは、ステップ比0.80について調査した結果を述べる。

平成26年6月17日、16:00から翌日8:00まで一時間ごと第二無酸素槽入口と出口のNO_x-N濃度を測定し、脱窒状況を調査した。調査条件を表6に、結果を図12に示す。図12より、19:00から20:00にかけて第二無酸素槽入口のNO_x-N濃度が7.0mg/Lを上回ったことにより、同槽出口で最大2.0mg/L程度のNO_x-Nが残存した。ピーク濃度の比較で、同槽でのNO_x-N低減濃度は最大6.0mg/L程度と推定された。

ステップ比0.80、反応槽流入NH₄-N濃度19mg/L(H25平均値)、処理水量1,000m³/h(処理能力相当)時の、第一好気槽NH₄-N設定値とそれをもとに計算した第二無酸素槽入口NO_x-N濃度推定値を表7に示す。同表では、NH₄-N設定値が7.0を下回ると第二無酸素槽流入NO_x-N濃度が6.0mg/Lを上回ることから、ステップ比0.80においては、第一好気槽NH₄-N設定値は7.0mg/Lを下限とするのが望ましいと考えられる。

表6 調査条件

流入下水 NH ₄ -N	15mg/L
処理水量	1,200m ³ /h
循環比 (返送/硝化液)	0.14/0.2
第一好気 NH ₄ -N 濃度 (設定値/実測値)	7.0/7.3mg/L

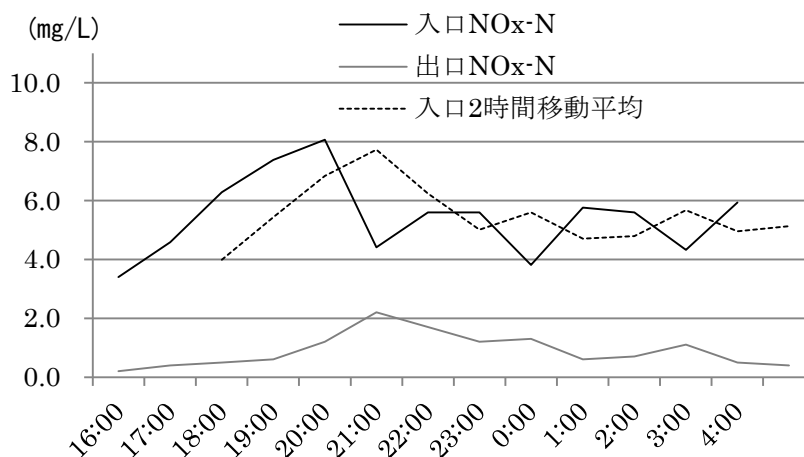


図12 第二無酸素槽での脱窒状況

表 7 NH₄-N 設定値と第二無酸素槽入口 NO_x-N 濃度 (mg/L)

設定値	第二無酸素入口 NO _x -N
5.0	7.4
6.0	6.9
7.0	6.1
8.0	5.4
9.0	4.6
10	3.9

5 まとめ

調査の結果、ステップ A₂O 法では、高ステップ比での運転によつてりんの除去性能を確保しつつ、処理状況に応じて第一好気槽の NH₄-N 設定値を変動させることで、除去性能を確保しつつ送風量を低減できることが分かった。本稿の結論を以下にまとめる。

- (1) ステップ比を高くし、嫌気槽への BOD-SS 負荷を高めることで、ステップ A₂O 法でも良好なりんの除去性能が得られることが分かった。
- (2) 高ステップ比で運転する場合、処理水量増加時にステップ流入水量のみを増加させることが可能であり、降雨時等の水量変動時におけるりん処理安定化に効果的であった。
- (3) 第一好気槽 NH₄-N 濃度設定値を高くし、処理プロセスでの窒素除去率を下げることで処理水の全りんや NH₄-N 濃度を悪化させずに送風量を低減できることが分かった。
- (4) 第二好気槽では第一好気槽に比べて硝化量当たり送風量が少ないが、これは有機物濃度や槽内の隔壁数等の相違によるものと考えられた。

6 今後の予定

文中で触れたが、ステップ比の選択や第一好気槽の NH₄-N 設定値等の処理条件によって、第二無酸素槽で PO₄-P の吐出しが起る。吐出し量が多い場合、ステップ流入下水量の急増時に、処理水全りん濃度が悪化する危険性が高まる。さらに、第二無酸素槽が嫌気槽の機能を持つことによつて嫌気槽が実質的に拡大し、平時のりん処理にも悪影響を与える可能性がある。

また、ステップ比を高くすると、当処理法は嫌気硝化脱窒法(AOAO法)に近い処理特性を示すと考えられる。しかしながら、AOAO法では降雨後等にりんの除去性能が悪化する傾向にあるとの報告があり⁽⁵⁾、ステップ比が高いほどりん処理に有利となるとした本稿の結論と矛盾する。これについて、AOAO法で運用した実績が無いことから、十分な知見が得られていない。

上記事項は、ステップ比や第一好気槽の NH₄-N 設定値の至適範囲を定量的に求める上で、明らかにしていく必要があるステップ A₂O 法の課題である。このため、今後は第二無酸素槽での有機物・窒素・りんの挙動等、同槽の機能について詳細な調査が必要と考える。

また、当処理法では、各好気槽の NH₄-N 計指示値から処理水 NH₄-N 濃度を推定することができる。このため将来的には、第一好気槽の NH₄-N 濃度指示値から、処理水 NH₄-N 濃度を目標値とするための硝化速度を算出して第二好気槽の NH₄-N 設定値に反映する、硝化速度制御も可能と考える。今後、これに向けた基礎的調査についても、実施していきたいと考えている。

参考文献

- (1) ステップ流入式嫌気－無酸素－好気法設計マニュアル（案），平成 14 年 3 月，東京都下水道局計画調整部
- (2) 清瀬水再生センターのステップ A₂O 法について，平成 21 年度水質管理研修，古澤和樹ほか
- (3) ステップ流入による生物学的リン・窒素同時除去法の処理効率の改善について，下水道協会誌，Vol. 23, No. 266, 1986, pp. 16-26, 栗林 宗人ほか
- (4) 実施設におけるステップ流入と嫌気好気法による脱窒，脱りんについて，下水道協会誌 Vol. 31, No. 368, 1994/4, p. 16-22，渡辺浩基
- (5) 嫌気・無酸素・好気法と嫌気・硝化脱窒法との処理状況比較について，第 47 回下水道研究発表会講演集，2010, pp. 170-172, 坂本俊彦ほか
- (6) 北多摩二号水再生センターにおける反応槽流動シミュレーションを用いた新規施設の立上げ（事例報告），平成 24 年度水質技術研究発表会，和光一紀ほか
- (7) ステップ A₂O 法の処理特性及び NH₄-N 制御の有効性について，平成 25 年度水質技術研究発表会，和光一紀ほか
- (8) 活性汚泥法において有機物負荷が硝化速度に及ぼす影響，環境技術 Vol. 27(1998) No. 4, pp. 282-288, 長坂實上ほか
- (9) 水中プロペラ攪拌式オキシデーションディッチの酸素移動現象に関するシミュレーション，NKK 技報 NO. 177, pp. 21-28, 岡本幸彦ほか
- (10) 単一オリフィスにより生じる気泡の性状と酸素移動に関する一考察，土木学会論文報告集，第 175 号, pp. 49-57, 松本順一郎
- (11) 水道施設設計指針 2012，社団法人日本水道協会
- (12) ステップフィールド嫌気好気活性汚泥法の最適ステップ率と槽容量配分に関する実験および理論解析，環境工学論文集，Vol. 35, pp. 367-377, 藤井滋穂ほか