

6. 窒素・りん除去法の省エネルギーに関する調査

下水処理研究室 室長 中島英一郎
主任研究官 山下 洋正
研究官 齋野 秀幸

1. はじめに

閉鎖性水域の富栄養化問題に対処するため、窒素・りん除去法を導入する下水処理施設の増加が見込まれる。しかし、窒素・りん除去法は標準活性汚泥法よりもエネルギーを多量に消費するため、本処理法の普及による地球環境への負荷が増加するおそれがある。本調査では、窒素・りん除去法の良好な処理水質を保つ範囲内での消費エネルギーの削減を目的として、平成10年度～13年度にかけて、単位プロセスおよびシステムのエネルギー効率改善の観点から、窒素・りん除去の運転および設計手法等の検討を行ってきた。

平成10年度は、調査初年度として、窒素・りん除去法を採用している処理場の電力消費量を現地調査により把握した。また、実験的検討として、窒素・りん除去法を採用している実下水処理場での処理状況と電力消費量の相関の把握及び硝化細菌の結合固定化担体を用いた処理状況と酸素移動効率の相関の把握を行うとともに、実規模レベルでの間欠曝気攪拌の処理成績を調査により嫌気槽における攪拌の省エネルギー化を検討した。

平成11年度は、前年度に引き続き嫌気槽及び無酸素槽の間欠曝気攪拌について攪拌間隔等最適な攪拌条件を検討した。また、曝気風量制御法による処理成績の違いの把握、異なる高度処理法での余剰汚泥発生量の比較を実施した。

平成12年度は、水処理におけるエネルギー消費の特性把握を行うことを目的に、実施設での酸素移動効率の検討と結合固定化担体を用いた硝化実験における酸素移動効率の検討を行った。

平成13年度は、前年度に引き続き、水処理におけるエネルギー消費の特性把握を行うことを目的に、実施設での酸素移動効率の実験的検討を行うとともに、異なる処理場間でのエネルギー消費特性の差異を把握した。

2. 調査方法

標準活性汚泥法や様々な窒素りん除去法においては、曝気により液中に酸素を供給する過程（エアレーション）が極めて重要な役割を果たし、処理場全体のエネルギー使用からも大きな割合を占めている。運転管理手法や処理プロセスの改善により曝気に関する消費エネルギーを節減できれば、省エネルギーに大きく寄与するものと期待される。

そこで13年度においては、運転管理手法及び処理プロセスの違いが曝気に関する消費エネルギー特性に及ぼす影響を把握するために、以下の3点について検討した。

- ①疑似嫌気好気活性汚泥法（嫌気好気法において、嫌気槽の攪拌を機械攪拌ではなく微小曝気によって行っている処理法）および標準活性汚泥法の曝気エネルギー比較
- ②異なる高度処理プロセスの処理場間の曝気エネルギー比較
- ③曝気効率の変化と α 値（下水中の酸素移動効率の清水に対する補正係数）の関係把握

2. 1 疑似嫌気好気活性汚泥法および標準活性汚泥法の曝気エネルギー比較

調査は愛知県豊川浄化センターの疑似嫌気好気活性汚泥法の反応槽で行った。豊川浄化センターでは、図-1に示す通り、10系列の反応槽（有効水深5m、タンク幅6m、総延長80m）が流れ方向に16区画に分割されており、散気板が水路片側に配置されている。調査時は、反応槽の流下方向に1、4、7、10、13及び16区画において排ガス測定および水質分析試料の採取を行った。用いたエアレーションタンクは206系、207系および208系の3系列であり、206系列は実験の対照条件として通常の運転状態である疑似嫌気好気法とし、207系列は高負荷の疑似嫌気好気法、208系列は高負荷の標準活性汚泥法で運転を行った。ここで「高負荷」とは、12年度の調査で疑似嫌気好気法と標準活性汚泥法とで処理水質にあまり差異が出なかったことから、処理特性の違いを明確化するために水量及び負荷量を対照の206系列より約2割増大させた運転条件である。調査条件を表-1に示す。

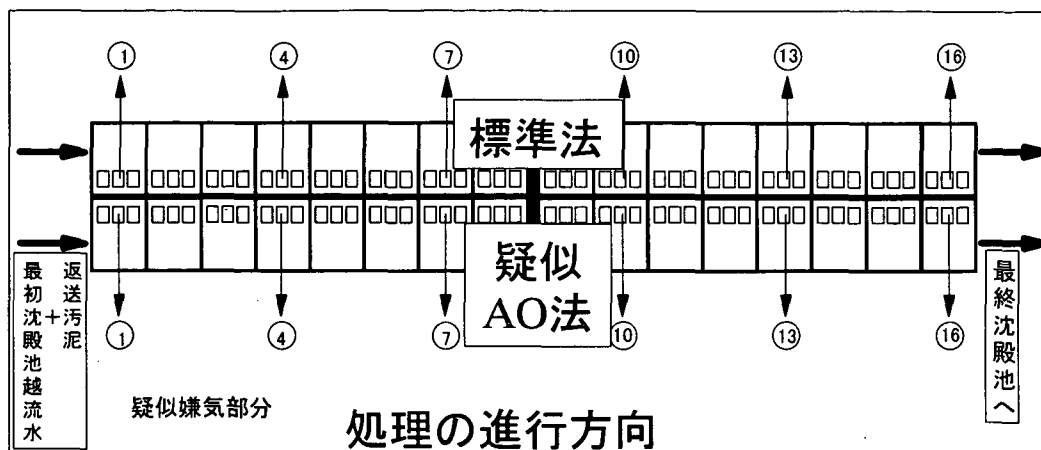


図-1 調査反応槽の概要（豊川浄化センター）

表-1 調査条件（豊川浄化センター）

処理系列	206系	207系	208系	
処理法	疑似嫌気好気法	疑似嫌気好気法	標準活性汚泥法	
Run1条件(13.7~13.8)	通常運転	高負荷運転	高負荷運転	
Run2条件(13.11)(DO mg/L)	DO 2.5mg/L	DO 3.0mg/L	DO 1.5mg/L	
Run3条件(13.11~13.12)	通常運転	高負荷運転	高負荷運転	
Run4条件(14.1)(DO mg/L)	DO 2.5mg/L	DO 2.0mg/L	DO 1.5mg/L	
反応槽	幅6m、長さ80m、水深5m、10系列			
反応槽容量	2400m ³ /系、150m ³ /区画			
散気装置	散気版による全面曝気			
曝気制御方法	前4区画嫌気、後12区画好気		全区画好気	
処理の状況(Run1の例)				
流入水量	m ³ /d/系	5413	6287	6864
返送汚泥量	m ³ /d/系	2,142	2,335	2,398
余剰汚泥量	m ³ /d/系	65	76	83
返送汚泥濃度	mg/L	6,050	6,050	6,050
HRT	h	12	10	9
実質HRT	h	8	7	7
曝気量	m ³ /min/系	22	25	28
MLSS	mg/L	2,250	2,300	2,350

測定項目は、平成12年度の調査とほぼ同様であり、流量を流入、反応槽全体、返送汚泥について測定し、送気量は反応槽全体として測定、曝気酸素濃度、曝気CO₂濃度、排気酸素濃度、排気CO₂濃度、溶存酸素濃度、ORP、pH及び水温については反応槽の各区画(1, 4, 7, 10, 13, 16区画)で測定、全BOD、溶解性BOD、SSは流入について測定、アルカリ度、全CODCrは流入と返送汚泥について測定、T-P及びT-Nは流入、反応槽の最終区画(16区画)及び返送汚泥について測定、溶解性CODCr、PO₄-P、溶解性N、NH₄-N、NO₂-N及びNO_x-Nは流入及び反応槽の各区画(1, 4, 7, 10, 13, 16区画)で測定、MLSSは反応槽の最終区画(16区画)及び返送汚泥について測定、そしてKLaは反応槽の各区画(1, 4, 7, 10, 13, 16区画)で測定した。

2. 2 異なる高度処理プロセスの処理場間の曝気エネルギー比較

調査は愛知県豊川浄化センター、矢作川浄化センター、五条川左岸浄化センターおよび境川浄化センターの高度処理プロセスについて行った。各処理場の処理プロセスの特性を表-2に示す。

表-2 各処理場の高度処理プロセス特性

浄化センター名	豊川	矢作川	五条川左岸	境川
処理方法	疑似嫌気好気	2段嫌気好気	2段嫌気好気	疑似嫌気好気
曝気方法	全面曝気	機械式攪拌	機械式攪拌	全面/攪拌
制御方法	DO	DO	DO	ORP(酸化還元電位)
HRT(h)	8.0/7.0	7.9/8.7	5.9	5.9/6.4
処理能力(m ³ /d) (H13.4.1現在)	77,500	100,000	68,400	120,000
処理水量(m ³ /d)	50,305	114,941	57,850	75,410

測定項目は、2.1と同様であり、調査は平成13年の7~9月の夏期に実施した。調査結果より、曝気エネルギー消費量、送風量、処理水量、BOD負荷量等を把握して、曝気エネルギー消費特性について検討した。

2. 3 曝気効率の変化とα値の関係把握

疑似嫌気好気法及び標準法において処理の進行に伴う曝気効率の変化を把握するために、処理途中の反応槽ろ液について、表-3に示す非定常法によりKLa(総括酸素移動容量係数)を測定した。

表-3 α値把握のためのKLa測定法

検水量	ろ紙5Aでろ過した試料 500mL
測定容器	トールビーカー(500mL 用量)
送風量	50mL/分
添加亜硫酸ナトリウム	50g/L 溶液を 5mL
溶存酸素濃度(DO)測定	0~3分の間は 30秒毎
	3~10分の間は 1分毎
	10分以降は 2分毎

測定に際しては、まず測定容器に試料水を満たし、亜硫酸ナトリウムを溶解して溶存酸素濃度(DO)をゼロとし、続いてエアレーションしてDOを上昇させた。試料水温における飽和DO値とエアレーションタンク中の各時間におけるDO値との差(C_s-C)をエアレーション時間に対して片対数グラフとし、式-1に基づいて、近似直線の傾きからKLaを算出した。

$$\frac{dC}{dt} = KLa(C_s - C) \quad \dots (式-1)$$

このKLaは、実施設の運転条件下における値とは異なっており、絶対値として用いることはできないが、清水及び各試料水を同一の試験条件で測定していることにより、そのKLaの比率が水質による違いすなわち

α 値を示すものと考えられ、式-2より算出した。

$$KLa(\text{試料水}) = \alpha \cdot KLa(\text{清水}) \quad \dots \text{(式-2)}$$

3. 調査結果及び考察

3. 1 疑似嫌気好気活性汚泥法および標準活性汚泥法の曝気エネルギー比較

Run 1 及び Run 3 の調査結果に基づき、通常運転の対照系列、高負荷の疑似嫌気好気法の系列及び高負荷の標準活性汚泥法の系列の 3 系列について処理水質を比較した結果を図-2 及び図-3 に示す。

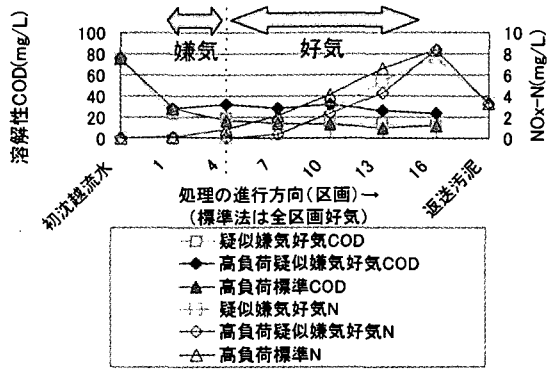


図-2 標準法及び疑似嫌気好気法の比較における有機物及び窒素の処理特性（夏期）

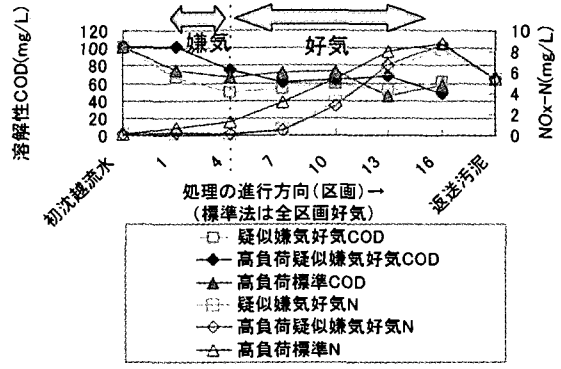


図-3 標準法及び疑似嫌気好気法の比較における有機物及び窒素の処理特性（冬期）

窒素については、処理過程における硝化の進行の程度が高負荷標準法>疑似嫌気好気法>高負荷疑似嫌気好気法となっており、全区画好気である標準法で最も早く硝化が進み、高負荷の疑似嫌気好気法で最も遅くなるという妥当な結果となっている。処理終了段階ではいずれの系列でもほぼ完全硝化がなされており、返送汚泥中の NO_x-N は返送中にほとんどが脱窒されている。また、COD の除去の進行の度合いについても、同様に高負荷標準法>疑似嫌気好気法>高負荷疑似嫌気好気法となっている。一方、リン除去については、標準法の好気区画でもリンの摂取が起きていたが、これは、調査対象処理場においては全系列の返送汚泥が混合されてから各系列に流入するため、嫌気過程を経たリン除去細菌が標準法の好気槽にも流入するためと考えられる。

こうした活性汚泥の特性及び処理場の運転の余裕幅によって、最終的な処理水は各系列ともほぼ同等な処理水質となっていた。

次に、Run 2 及び Run 4 の調査結果に基づき、疑似嫌気好気法及び標準活性汚泥法における曝気に関する消費エネルギーを比較したところ、図-4 に示すようにほぼ同等であった。この結果について、高度処理における酸素消費量の増大の観点から、次の通り化学量論的な考察を行った。

生物学的リン除去プロセスでは、嫌気過程で取り込まれた有機物もほとんどが好気過程で酸化されるため、全体的な酸素要求量に関しては標準法と差がないと考えられる

次に好氣的な有機物酸化及び硝化脱窒反応に一般に用いられている化学量論的係数 ρ としては、

脱窒により消費される有機物量	A : 2.0~3.0(kgBOD/kgN)
有機物の好氣的酸化に必要な酸素量	B : 0.5~0.7(kgO ₂ /kgBOD)

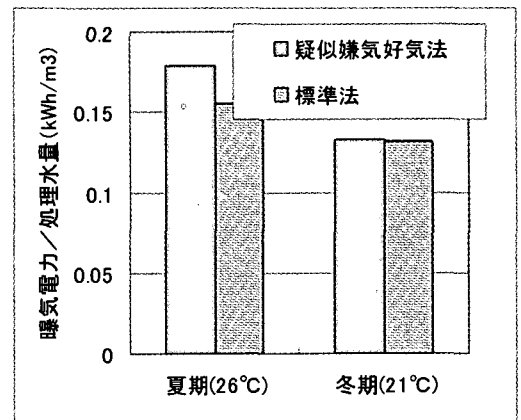


図-4 処理水量あたりの曝気エネルギー

アンモニアの完全硝化に必要な酸素量 $C : 4.57(\text{kgO}_2/\text{kgN})$

が挙げられる。これらにより、脱窒により消費される有機物が好氣的酸化されていた場合に消費されたはずの酸素量、つまり、脱窒による有機物消費に伴う酸素消費減少量は、

脱窒により節約される酸素消費量 $A \times B : 1.0 \sim 2.1(\text{kgO}_2/\text{kgN})$

として表され、一方で硝化に必要な酸素量 C と差し引きして、

硝化脱窒反応全体での追加的酸素消費量 $C - A \times B : 2.47 \sim 3.57(\text{kgO}_2/\text{kgN})$

となる。

ここで、標準的な流入下水の水質として、 $\text{NH}_4\text{-N} 20\text{mg/L}$ 、 $\text{BOD} 160\text{mg/L}$ を仮定し、有機物酸化及び硝化脱窒反応が完全に行われた場合を想定すると、

標準法+未硝化（有機物酸化）： 酸素消費量 $80 \sim 112(\text{kgO}_2)$

標準法+硝化（有機物酸化+硝化）： 酸素消費量 $171 \sim 203(\text{kgO}_2)$

硝化脱窒法（有機物酸化+硝化+脱窒）：酸素消費量 $129 \sim 183(\text{kgO}_2)$

となり、標準法で硝化が全く行われなかった場合と、高度処理で硝化脱窒が完全に達成された場合とを比較すると、高度処理において 1.6 倍程度は酸素消費量が增大するものと予想される。従って、その分だけ曝気が必要となり、曝気エネルギー消費が増大するはずである。しかし、標準法において硝化促進されている場合は、脱窒まで行った方が、酸素消費量が 0.8 倍～0.9 倍程度に減少すると予想される。本調査結果において、疑似嫌気好気法と標準法で曝気エネルギーがほぼ同等であったのは、標準法でもある程度硝化が進行して酸素消費量が增大しており、また、実処理場の運転条件下では流入水質変動等に備えて余裕のある曝気条件で運転を実施しており多少の曝気エネルギー差は余裕範囲に埋もれてしまうこと等によるものと考えられる。

従って、実処理場の運転条件下を想定して、標準法における硝化の進行、流入水質変動等に備えた余裕ある曝気条件を前提とした場合は、栄養塩除去の高度処理の採用によって、酸素消費量の増大に由来して明確に曝気量が増えて消費エネルギーが増大することはないものと考えられた。

3. 2 異なる高度処理プロセスの処理場間の曝気エネルギー比較

各処理場の処理プロセスの曝気エネルギー消費特性を表-4に示す。

表-4 各処理場の高度処理プロセスの曝気エネルギー消費特性

浄化センター名		豊川	矢作川	五条川左岸	境川
空気倍率	(空気量/水量)	10.1	3.1	5	2.8
BOD 負荷量	kg/d	5786	6207	8099	8295
曝気電力/風量(H12 データ)	kWh/m ³	0.03	0.04	0.03	0.03
曝気電力/水量	kWh/m ³	0.29	0.11	0.13	0.07
曝気電力/BOD 負荷量	kWh/kg	2.52	2.09	0.90	0.68
BOD 容積負荷	kgBOD/m ³	0.24	0.17	0.41	0.32
NH ₄ -N 硝化の容積効率 (流入濃度-処理水濃度)	kgN/m ³	0.040	0.031	0.055	0.070

豊川浄化センターの空気倍率は他処理場の2倍以上と高く、処理水量あたりの曝気エネルギーも2倍以上となっている。また、BOD 負荷量あたりの曝気エネルギーについても豊川センターが最も高く、矢作浄化センターも比較的高くなっている。各処理場で、窒素りん除去プロセス及び曝気装置がそれぞれ異なっているため単純な比較は困難であるが、運転方法の違いにより2倍以上も消費エネルギーに差が出るとは考えがたく、散気装置の特性等、施設的な要因がエネルギー消費特性に大きく影響していると想定される。従って、処理水量あたり、BOD 負荷量あたりの曝気エネルギーが大きい処理場においては、施設更新時に高効率の散気装置の

導入を検討することが最も効果的な省エネ対策と考えられる。

3. 3 曝気効率の変化と α 値の関係把握

疑似嫌気好気法及び標準法における処理の進行に伴う曝気効率の変化について、H12年度の方法により反応槽の物質収支より算出した KL_a (送風量当たり) について左軸で表示し、反応槽より採取した活性汚泥混合液のろ過試料の KL_a を測定して α 値を算出したものを右軸で表示する形で図-5、6に示す。反応槽の物質収支より算出した KL_a (総括酸素移動容量係数) は各処理法で概ね一致しており、処理の進行に伴い増大する傾向にあった。 α 値については、データのばらつきはあるが、処理の終了に向けて増加がみられ、 KL_a の増加に関係していると考えられた。しかし、 α 値は処理の進行に伴い単調に増加するのではなく、流入水質等様々な要因に左右されていると推察されるため、予測に際して余裕を見込む必要があると考えられる。

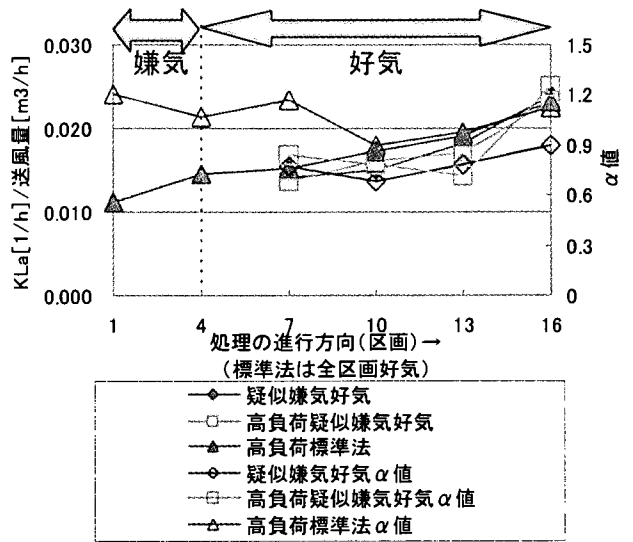
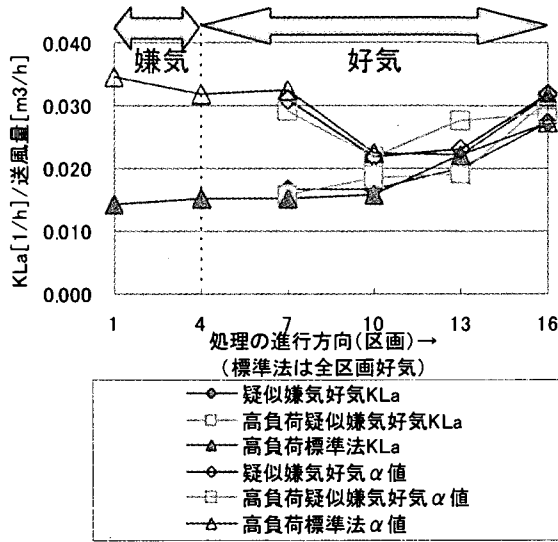


図-5 処理進行に伴う α 値及び KL_a の変化(夏期) 図-6 処理進行に伴う α 値及び KL_a の変化(冬期)

4. まとめ

窒素、りん除去の高度処理における省エネルギーのため、曝気に関して実処理場における酸素移動効率に着目して調査を実施し、以下の結果が得られた。

(1) 実処理場の運転条件下では、栄養塩除去の高度処理の採用によって、酸素消費量の増大に由来して明確に曝気量が増えて消費エネルギーが増大することはない。

(2) 曝気の効率化には、運転管理の改善のみでは限度があり、根本的には散気装置の効率化等の施設対応が必要である。

(3) 下水処理に伴う α 値の変化は曝気効率に影響するが、その変化の予測には余裕を見込む必要があり、流入水質の変動に対応した高度な管理指標として直ちに用いることは難しい。

参考文献

(1) 社団法人日本下水道協会、下水道施設計画・設計指針と解説後編 2001年版、pp.43-44

なお、調査全体の総合的なとりまとめについては、「山下洋正、中島英一郎、斎野秀幸、鈴木穰、重村浩之、三宅十四日、原達也及び小椋直樹、栄養塩類除去を目的とした高度処理における消費エネルギー削減について、環境工学研究論文集、Vol.39、2002、pp.135-142」を併せて参照されたい。