

(14) 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

Energy Saving of Nutrients Removal in Advanced Wastewater Treatment Systems

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*****, 小椋直樹*****
Hiromasa Yamashita*, Hideichirou Nakajima*, Hideyuki Saino*, Yutaka Suzuki**,
Hiroyuki Shigemura***, Toshika Miyake****, Tatsuya Hara*****, Naoki Ogura*****

ABSTRACT: Energy consumption in mixing and aeration process was examined for the energy saving of nitrogen and phosphorous removal system. Adoption of the intermittent aeration mixing system was estimated to reduce the energy consumption in anaerobic and anoxic tank by 9%. Adding immobilization media in the aeration tank gave higher overall volumetric oxygen transfer coefficient when nitrification proceeded. Performance of the aeration apparatus was the critical factor for energy saving in aerobic tank.

KEYWORDS: Nutrient Removal, Energy Saving, Overall Volumetric Oxygen Transfer Coefficient

1. はじめに

閉鎖性水域の富栄養化問題に対応するため、特に栄養塩類の削減のために一層の高度処理の推進が求められており、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。一方、高度処理の導入に伴うエネルギー消費の増大も懸念されており、地球温暖化対策等の地球環境問題への対応を踏まえ、高度処理の省エネルギー化を進める必要がある。このため、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手法の確立を目的として、まず下水処理場のエネルギー消費の傾向を把握し、高度処理に特徴的なプロセスであってかつエネルギー消費の観点からも重要なプロセスを選び出した。次にプロセス毎のエネルギー削減を検討し、最後に処理場全体で効率的にエネルギー消費を削減する手法を提案した。

2. 下水処理場のエネルギー消費の傾向の把握

2. 1 全国的な傾向の把握

下水処理場全体でのエネルギー消費の傾向を把握するため、全国の下水処理場の電力消費量（処理水量あ

*国土交通省国土技術政策総合研究所下水道研究部下水処理研究室 (Wastewater and Sludge Management Division, National Institute for Land and Infrastructure Management)

**独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループリサイクルチーム (Recycling Team, Material and Geotechnical Engineering Research Group, Public Works Research Institute)

***国土交通省北陸地方整備局新潟国道事務所 (Niigata National Highway Office, Hokuriku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport)

****日本下水道事業団 (Japan Sewage Works Agency)

***** (株) 三機工業 (Sanki Co., Ltd.)

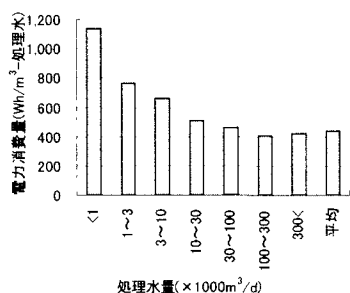


図-1 下水処理場の規模別エネルギー消費¹⁾
(平成8年度下水道統計より集計)

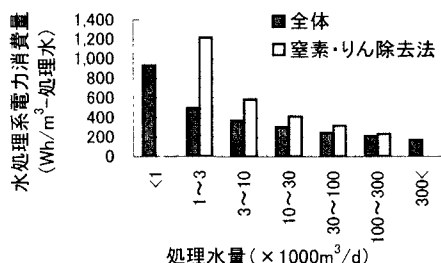


図-2 下水処理場の水処理系の規模別エネルギー消費²⁾
(平成8年度下水道統計より集計、全体 566 処理場、窒素りん除去法 21 処理場)

たり)を規模別に集計したものを図-1に示す¹⁾。これは、平成8年度下水道統計より、「晴天時日平均下水水量/現在晴天時1日最大処理量(処理能力)」の値が0.5以上の処理場を集計したものであり、平均は対象とした処理場の総処理水量で、総電力消費量を割って求めている。

一般的に、規模が大きくなるにつれて、処理水あたりの電力消費量が小さくなっており、小規模処理場を除くと概ね400~800Wh/m³の範囲であった。また、同様に全国処理場の水処理系の電力消費量について規模別に整理したものを、図-2に示す²⁾。窒素・りん除去法を採用している処理場において、水処理系電力消費量が全体の平均値よりも多く、窒素・りん除去により、より多くの電力が水処理系で消費されている傾向が把握できる。さらに、処理水量が少ない処理場で、全処理法と窒素・りん除去法での差が顕著になっていた。

2. 2 プロセス別のエネルギー消費の把握

次に実処理場におけるプロセス別のエネルギー消費について把握するために、異なる高度処理プロセスを有する2処理場について調査した結果を、図-3及び図-4にそれぞれ示す¹⁾。

凝集剤添加+硝化・内生脱窒法の処理場

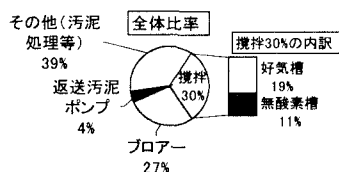


図-3 下水処理プロセス別のエネルギー消費例1¹⁾
(凝集剤添加+硝化・内生脱窒法、ORP制御)
(左円グラフは全体の電力消費比率、
右棒グラフは攪拌の電力消費の内訳を示す)

嫌気・好気+内生脱窒法の処理場

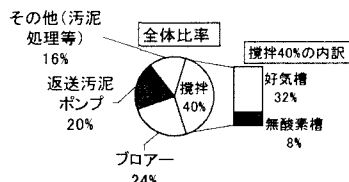


図-4 下水処理プロセス別のエネルギー消費例2¹⁾
(嫌気・好気+内生脱窒法、DO制御)
(左円グラフは全体の電力消費比率、
右棒グラフは攪拌の電力消費の内訳を示す)

これらより、好気槽の曝気によるエネルギー消費比率は平均して約26%となり、他の2処理場の調査結果¹⁾から得られた比率33.9%(嫌気無酸素好気法)及び42.8%(循環式硝化脱窒法)と合わせると概ね全体の3割程度であると推測された。また、攪拌によるエネルギー消費は全体の約3割程度、その中でも無酸素槽・嫌気槽の攪拌によるエネルギー消費は全体の約1割程度と推測された。

高度処理においては、脱窒及び生物学的リン除去プロセスのために、無酸素・嫌気槽を設けることが大きな特徴の一つであり、また、確実な硝化反応を達成するため、好気槽における曝気量が多めに設定されることも多い。従って、高度処理に特有なエネルギー消費の増大として、無酸素槽・嫌気槽の搅拌によるエネルギー消費及び好気槽の曝気によるエネルギー消費に焦点をおいて検討を行うこととした。

3. 無酸素槽・嫌気槽の搅拌の消費エネルギー削減について

無酸素・嫌気プロセスにおける搅拌を、連続機械搅拌より間欠曝気搅拌（例えば 120 分中に 1 分曝気して搅拌を行う）に変更することによる影響について、実処理場で調査した結果³⁾によると、嫌気槽においては、間欠曝気周期が 120 分としてもリン除去成績に大きな影響はなかったが、完全な無搅拌では処理に影響が出た。また、無酸素槽においては、間欠曝気周期が 15 分以下であれば脱窒成績に影響がなかった。また、返送汚泥や最初沈殿池流出水が反応槽に流入する際の流入エネルギーによる搅拌効果についてパイロットプラントにより調査した結果⁴⁾、返送汚泥を反応槽上部に流入させ、最初沈殿池流出水は反応槽底部に流入させる方式が、最も搅拌効果が高かった。

これらの結果より、嫌気槽における間欠曝気を 1 分曝気/120 分、無酸素槽における間欠曝気を 1 分曝気/15 分とし、流入下水、返送汚泥、循環水による流入エネルギーについてはポンプ効率 80%（ポンプの消費エネルギー 1 に対して、流入による搅拌エネルギー 0.8 が得られる）と仮定した試算では、図-5³⁾に示すように、水処理系で使用する平均的エネルギーの約 9%（44Wh/m³）が節減できることが分かった。

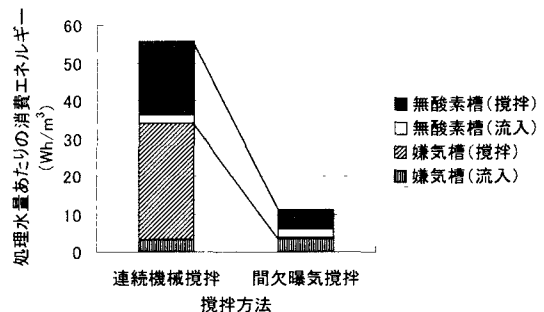


図-5 搅拌エネルギーの節減³⁾

4. 好気槽の曝気による消費エネルギーの削減について

4. 1 高度処理による曝気エネルギー変化の把握

高度処理による曝気エネルギーの増大の程度を把握するため、疑似嫌気好気活性汚泥法（嫌気好気法において、嫌気槽の搅拌を機械搅拌ではなく微小曝気によって行っている処理法）と標準法の比較を行った⁵⁾。調査は、疑似嫌気好気活性汚泥法で運転を実施している実処理場において、通常運転の系列を対照として、処理特性の違いを明確化するために高負荷（水量及び負荷量として約 2 割増大）とした疑似嫌気好気法の系列と同じく高負荷とした標準法の系列を設定して合計 3 系列の比較とした。なお、別の実験として通常の負荷で比較した場合、処理に余裕があるため疑似嫌気好気と標準法で処理水質にあまり差異が出ないことが確認されている⁶⁾。3 系列の処理水質を比較した例を図-6 に示す。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

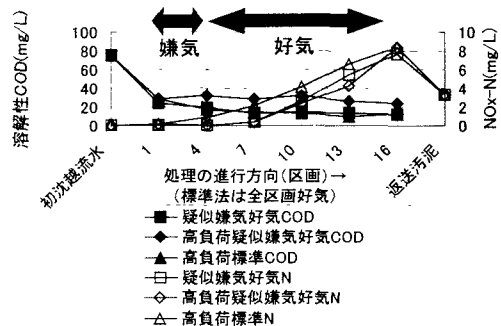
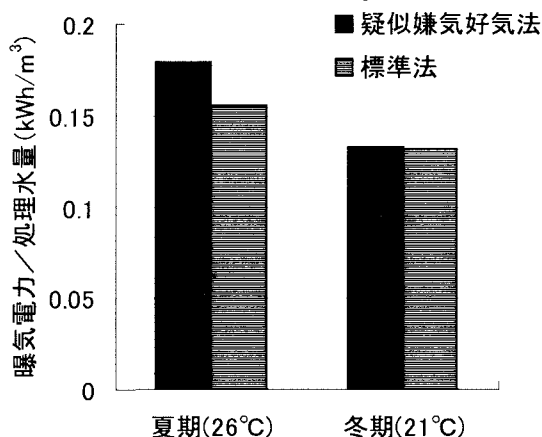


図-6 標準法及び疑似嫌気好気法の比較における有機物及び窒素の処理特性⁵⁾

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、高負荷疑似嫌気好気法及び高負荷標準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－７に示すようにほぼ同等であった⁵⁾。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。



図－７ 処理水量あたりの曝気エネルギー⁵⁾

4. 2 酸素消費量に関する考察

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

次に好気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 η 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)
アンモニアの完全硝化に必要な酸素量	C : 4.57(kgO ₂ /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、

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

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、

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

となる。

ここで、標準的な流入下水の水質として、NH₄-N20mg/L、BOD160mg/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 80～112(kgO ₂)
標準法＋硝化（有機物酸化＋硝化）：	酸素消費量 171～203(kgO ₂)
硝化脱窒法（有機物酸化＋硝化＋脱窒）：	酸素消費量 129～183(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増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増大しており、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

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。

4. 3 結合固定化担体における曝気効率の変化

硝化細菌を保持して安定的な硝化を達成するのに必要な ASRT を保つために好気槽の容量が増大し、それに伴い曝気エネルギーが増大することが考えられることから、近年、好気槽の容量を増大させずに硝化細菌の保持を達成するために、硝化細菌を結合固定化した担体の利用が進められている。こうした担体を好気槽に導入した場合に、曝気による酸素移動効率にどのような影響をもたらし、必要な曝気エネルギーがどう変化するかを評価する必要がある。

結合固定化担体を用いた場合の酸素移動効率について調査を行った結果によると、担体量あたりの硝化速度と反応槽での酸素移動効率との間には正の相関があることが観察され⁸⁾、また、結合固定化担体を用いて硝化が起きている場合の KLa (総括酸素移動容量係数) については、図-8 に示すように、結合固定化担体を反応槽

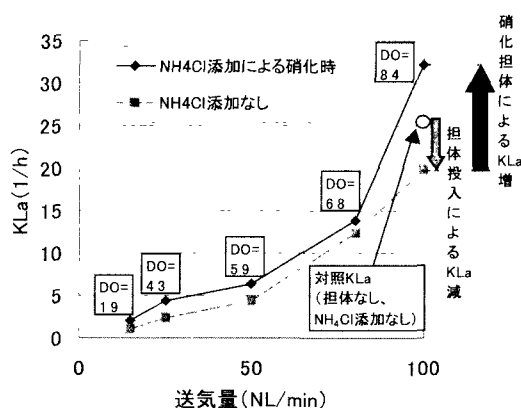


図-8 結合固定化担体を用いた硝化が KLa に及ぼす影響⁶⁾ (担体投入率 20% (反応槽容積比)、実処理場砂ろ過水を供試水として全面曝気で実験、硝化時には NH_4Cl 、 $NaHCO_3$ を添加)

に投入することは曝気効率の低下要因となるが、担体に付着した多数の硝化細菌によって硝化反応を活性化させることによって、低下要因を上回る曝気効率の向上をもたらすことが明らかとなった⁹⁾。この硝化反応による曝気効率の向上は、結合固定化担体に形成されている硝化細菌の生物膜が曝気の気泡と接触することにより高い効率で酸素利用を行い、結果として気相から活性汚泥混合液への酸素の移動速度を増大させていることによるものではないかと推測されるが、詳細な反応機構については今後のさらなる解明が必要であろう。

上述の結果より、硝化脱窒による窒素除去に伴う曝気エネルギーの増大を抑制するためには、硝化細菌の結合固定化担体の導入が有効であると考えられた。これにより、好気槽の容量増大を抑制することにより曝気エネルギーの増大を防ぐことに加えて、担体が硝化時に酸素移動効率を増大させることにより、一層の省エネルギーが達成可能であると期待される。

5. 処理場全体でのエネルギー消費の削減手法について

5. 1 効率的なエネルギー削減手法の提言

上記で得られた、単位プロセス毎の消費エネルギー削減手法を組み合わせ、処理場全体での効率的なエネルギー消費削減に適用する手法を示すこととする。

まず、無酸素槽・嫌気槽の攪拌については、連続機械攪拌の代わりに間欠曝気攪拌を用いることにより、水処理系で使用される平均的エネルギーの約 9% ($44Wh/m^3$) が節減可能と試算される。(試算の仮定については、3を参照) この手法は、標準法を嫌気好気法に変更した系列のように、無酸素槽・嫌気槽にも曝気装置が既設である場合に最も有効である。

次に、好気槽の曝気については、硝化細菌の固定化担体の導入により、好気槽の容量増大を抑制し、曝気エネルギーの増大を防ぐことができる。その際、担体が硝化時に酸素移動効率を増大させることから、曝気槽への担体投入による曝気効率の低下も防ぐことができ、結果として、標準法と同等の曝気エネルギー消費に抑制することが可能と想定される。この手法は反応槽の大きな改造を必要とせず、既存の施設でも適用可能であることが大きな利点である。

これらのエネルギー削減手法の組み合わせにより、処理場全体としては、栄養塩類除去のための高度処理におけるエネルギー消費を標準法と同等、つまり「高度処理によるエネルギー消費増大がゼロ」に近づけることが可能と考えられる。

この効率的なエネルギー削減手法の実処理場への適用を検討するに当たって、考察しておくべき点を以下に述べる。

5. 2 汚泥処理における消費エネルギー

まず考察すべき点として、高度処理に伴い下水汚泥の発生量が増大し、汚泥処理における消費エネルギーも増大するのではないかとことが挙げられる。これについて、栄養塩類の除去の観点では、リン除去に凝集剤を用いたり、砂ろ過で SS 成分由来のリンを捕捉したりすると、当然それに伴い下水汚泥が増大することが予測される。凝集剤添加により、反応タンクから $15\text{g}/\text{m}^3$ 程度の固形物が発生し、脱水汚泥に換算して、標準法で $0.53\text{kg}/\text{m}^3$ であるのに対して高度処理では $0.65\text{kg}/\text{m}^3$ 程度に増加するとの試算例も報告されている⁹⁾。

ステップ流入式 2 段硝化脱窒法及び嫌気好気法で運転している処理場において、曝気風量の制御を DO 制御、風量一定制御及び流入量比例制御で行った場合に、余剰汚泥の生成量がどう変化するかを SRT の観点から調査した結果によると⁴⁾、図-9 に示すとおり、SRT は処理法や曝気制御方式による影響よりも、空気倍率との正の相関が高いことが分かった。つまり、流入水量あたりの曝気量が多い場合に、余剰汚泥の生成量が少なくなるということであり、硝化反応のために曝気風量が仮に増大すれば、汚泥の生成量はむしろ少なくなるという結果となった。従って、高度処理による栄養塩類除去に由来する汚泥処理のエネルギー消費の増大については、凝集剤添加や砂ろ過による汚泥増加分以外は、特に見込む必要性はないと考えられた。

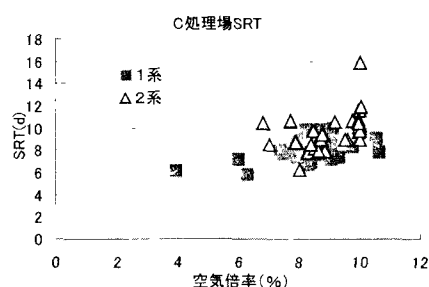


図-9 SRT と空気倍率の関係⁴⁾

5. 3 曝気装置自体の効率性

曝気槽への担体投入の効果等を検討する際には、併せて曝気装置自体の効率性についての検討も必要であろう。疑似嫌気好気法または 2 段嫌気好気法を採用している同一県内の 4 処理場について、その曝気効率を比較した調査結果によると⁵⁾、表-1 に示すとおり、処理水量あたりの曝気消費電力は $0.07 \sim 0.23(\text{kWh}/\text{m}^3)$ 、BOD 負荷量あたりの曝気消費電力は $0.68 \sim 2.52(\text{kWh}/\text{kgBOD})$ と、いずれも 3 倍以上の開きがあった。

運転管理手法の違いのみでこれほどの消費エネルギーの差異は生じるとは考えにくく、曝気装置自体の効率性に違いがあるものと考えられた。散気システムの特性等、こうした施設的な要因によるエネルギー消費の増大については、運転管理手法の改善等で対応できる範囲を超えており、施設対応が不可欠と考えられる。具体的には、施設建設時における効率的な曝気装置の選定及び施設更新時における高効率の曝気装置の導入の検討などの根本的対策が必要であろう。

表－1 異なる高度処理プロセスの曝気エネルギー消費の比較⁵⁾

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
HRT	H	8.0/7.0	7.9/8.7	5.9	5.9/6.4
処理水量	M ³ /d	50305	114941	57850	75410
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	2.5	2.1	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

5. 4 今後求められる高度な運転管理手法について

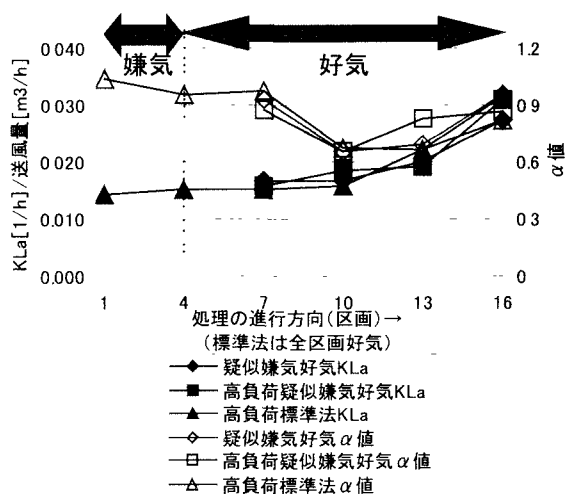
今後の展望として、運転管理手法の高度化により、流入水質の変動に応じて、いつどの程度の酸素要求量が発生するか等を迅速に把握し、効率的な曝気量となるよう調節することが可能となれば、エネルギー消費をさらに削減できるようになると考えられる。

例えば、曝気効率、曝気装置自体の効率のみならず、水質にも影響されることが知られている、清水に対する曝気効率と比較して、様々な物質が溶解している下水における曝気効率の低下の度合いを表す係数(下水中の酸素移動効率の清水に対する補正係数)は α 値と呼ばれ、曝気装置における清水での KL_a (総括酸素移動容量係数) がカタログ等で既知である場合は、処理対象下水の α 値を調べると、実運転条件下での KL_a を知ることができる。下水処理においては、処理の進行に伴い水質が変化するため、それに付随して α 値及び KL_a が変化し、曝気効率に変化をもたらしていることが考えられる。その変化を把握してうまく利用すれば、処理の進行に応じて区画毎に曝気量を調節させるなど、より効率的な曝気を行うことも可能性として考えられる。

実処理場において、下水処理の進行に伴う α 値及び KL_a の変化を調査した結果⁵⁾ によると、図－10 に示すとおり、 KL_a は処理の進行に伴い増大する傾向にあり、 α 値についても、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、 α 値の予測及び KL_a の算出に際しては余裕を見込まざるを得ず、現段階で直ちに高度な運転管理の指標として取り入れるのは難しいと考えられた。

実処理場においては、水質変動に対応するため、余裕を持った運転管理を行っており、流入水質の変動が迅速かつ的確に把握できれば、運転の最適化を図ることが可能となり、さらなるエネルギー消費の削減が可能となる。



図－10 処理の進行に伴う α 値及び KL_a の変化⁵⁾

しかし、そうした高度な運転管理は、十分な水質監視体制と処理場の細かな制御プロセスが一体となって初めて可能となるものであり、そうでない場合は単に余裕幅を削るだけになりかねないことに留意が必要である。

6. おわりに

高度処理における消費エネルギー削減の効率的な手法について提言を行い、併せて今後の展望を述べた。本報告は、平成10年～13年の4年間にわたり旧建設省土木研究所三次処理研究室及び国土交通省国土技術政策総合研究所下水処理研究室において実施した調査結果を基に、新たな知見及び考察を加えて体系的にとりまとめたものである。調査の実施にあたっては、多数の地方公共団体の下水道関係者に協力を得た。ここで改めて感謝の念を呈したい。

参考文献

- 1) 鈴木穰、重村浩之、原達也、窒素・りん除去法の省エネルギーに関する調査、土木研究所資料第3661号、pp.153-168、1999
- 2) 重村浩之、窒素・りん除去法の省エネルギー化、土木技術資料、Vol.42, No.6, pp.15, 2000
- 3) 重村浩之、鈴木穰、京才俊則、生物学的窒素・りん除去における攪拌用エネルギーの低減化、第37回下水道研究発表会講演集、pp.596-598、2000
- 4) 鈴木穰、重村浩之、小椋直樹、窒素・りん除去法の省エネルギーに関する調査、土木研究所資料第3755号、pp.171-184、2000
- 5) 山下洋正、中島英一郎、水野勝、窒素りん除去における省エネルギーについて、第39回下水道研究発表会講演集、pp.545-547、2002
- 6) 鈴木穰、畑津十四日、窒素・りん除去法の省エネルギーに関する調査、国土技術政策総合研究所資料No.10、pp.133-145、2001
- 7) 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
- 8) 小椋直樹、重村浩之、鈴木穰、固定化担体を添加した好気タンクにおける酸素移動効率、第37回下水道研究発表会講演集、pp.653-655、2000
- 9) 堺好雄、高度処理の選択と経済性、月刊下水道、Vol.21, No.6, pp.31-35