

持続的社會に貢献する 下水道のエネルギー効率化への取組み

鈴木 穰

1. はじめに

下水道は、都市における浸水問題や水質汚濁問題に対応するため、雨水を雨水管やポンプ場などによって都市域から排除するとともに、汚水を収集して浄化してきた。

しかし、これらの浸水防除や水質保全は、重力や自然の浄化作用に頼るだけでは、不可能であったり非効率であったりする。このため、エネルギーを使用して、下水を揚水したり、酸素を供給して生物反応を促進させたりすることが行われてきた。これらの活動は、都市活動を継続させるために休止することができないものであり、そのためにエネルギーを永続的に必要とする。

化石エネルギー資源の枯渇や、温室効果ガスの発生による地球温暖化は、現代社会において対処しなければならない重要な課題であり、エネルギーを永続的に使用する下水道事業においては、エネルギー効率の向上が求められる。

本稿では、下水道処理場におけるエネルギー使用実態とこれまで行われてきた水処理におけるエネルギー効率化の取組みを概観するとともに、求められる研究内容について言及する。

2. 下水道処理場のエネルギー使用実態

2.1 概要

高度成長期以降の水質汚濁に対して、下水道は主要な水質汚濁防止施設と位置付けられ、積極的な整備が行われた結果、平成25年度末では、下水道処理人口普及率は77%¹⁾となっている。これに伴い、生活排水の4分の3の量が下水道を経由するようになっており、結果的に、下水道処理に多くのエネルギーが使用されている。下水道全体で使用される電力量は約70億kWh/年であり、全国の電力使用量の約0.7%を占めている²⁾。

下水道処理場においては、下水中の汚濁物を除去するために、微生物の汚濁物吸着・代謝などの作用が利用されるが、この除去を進めるには、微生物の活

動に必要な酸素を生物反応タンクに供給することが必要である。酸素供給に使用される電力量は、活性汚泥法を採用している下水処理場では、全電力使用量の約4割³⁾を占めていることから、下水処理場での電力使用量を削減するには、酸素供給のエネルギー効率をさらに改善することが必要である。

2.2 家庭としてみた場合の下水処理場エネルギー使用量

下水処理場で使用されるエネルギー量⁴⁾を、家庭単位（ここでは4人家族の家庭とする）の量に換算してみると、その大きさの程度がイメージしやすい。

汚水管で収集された下水は、通常、地下深くの位置で下水処理場に流入するため、下水処理場において揚水する必要がある。一人一日当たりの下水量を250Lとすると、4人家庭の下水を揚水するのに必要な電力はほぼ3Wと計算される。つまり、豆電球1個ほどの電力で、4人家庭の下水が揚水されていることになる。次いで、下水の浄化のために処理微生物への酸素供給などが行われるが、そのための電力はほぼ11Wと計算され、これは電気スタンドほどの電力である。

読者の感覚としてはどうであろうか。下水道のエネルギー使用量は、案外少ないと感じるのではないだろうか。このことは、現在の下水道システムが効率的に下水を収集・処理していることを表すものであるとも考えられる。しかし一方で、下水が多量に集まる下水処理場においては、エネルギーが大量に使用されることから、下水処理場のエネルギー効率を向上させ、エネルギー使用量を削減することは社会の要請である。

2.3 下水処理方式の変化とエネルギー使用量

本格的な下水道整備が行われるようになった昭和50年代以降、下水処理方式も変遷⁵⁾をたどっており、それがエネルギー使用量にも影響を与えている。

2.3.1 下水処理方式の変化

中規模以上の下水処理場における下水処理法の推移を図-1に示すが、標準活性汚泥法（有機物除去を主目的とし処理時間が6～8時間である処理法）が経年的に増加して圧倒的多数を占めるに至っている。一方、高負荷処理が可能なステップエアレー

ション法（下水を反応タンクの流れ方向の数カ所から分割して流入させる処理法）は、昭和50年代初めには、処理場数の3分の1を占めていたが、標準活性汚泥法に比べて処理水質が劣るなどの理由から、徐々にその数を減らし、現在ではわずかとなっている。

昭和50年代後半からは、閉鎖性水域における富栄養化現象が問題となったことから、下水由来の窒素・リンの負荷を削減するために高度処理法が適応されるようになり、その数が増加している。

また、小規模下水処理場の処理法について、その推移（図-2）を見ると、オキシデーションディッチ法（無終端水路の反応タンクで処理時間24時間程度の低負荷処理を行う方式）が顕著に増加していることが分かる。小規模処理場に求められる要件、即ち①水量・水質の時間変動に対する安定的処理、②容易な維持管理、③低廉な建設費といったことに対して、オキシデーションディッチ法がより適合していると評価されていることによると考えられる。

2.3.2 エネルギー使用量の変化

昭和60年から平成25年にかけての下水水量および下水処理場エネルギー使用量の変化を、下水道統計⁴⁾のデータから求めると、図-3のようになる。下水道整備の進捗に伴い、下水水量が増加してエネルギー使用量も増加しているが、その増加倍率は、下水水量で1.7ほどであるのに対し、エネルギー使用量では2以上となっており、エネルギー使用量の増加がより大きなものとなっている。

この変化を、各プロセスのエネルギー消費特性（下水水量当たりのエネルギー使用量）によって評価すると、図-4に示すように、ポンプ揚水についてはほぼ一定であるのに対し、水処理および汚泥処理については、その値が増加する傾向にある。つまり、揚水に関わるエネルギー効率はあまり変化していないのに対し、水処理・汚泥処理に関するエネルギー効率はやや悪化してきたことが分かる。しかし近年は、その効率悪化が進行せず、一定に保たれていることも注目している。

平成17年までの効率悪化の原因として、水処理については、図-1および図-2で示したように、処理方式の構成が変化してきたことが考えられる。処理方式ごとのエネルギー消費特性を表-1に示すが、標準活性汚泥法の値が最も小さいのに対し、近年増加してきた窒素・リン除去法や小規模処理法は、処理

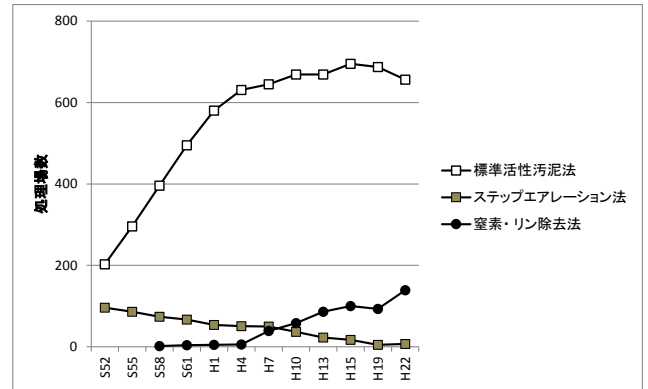


図-1 中規模以上処理場における処理方式の推移

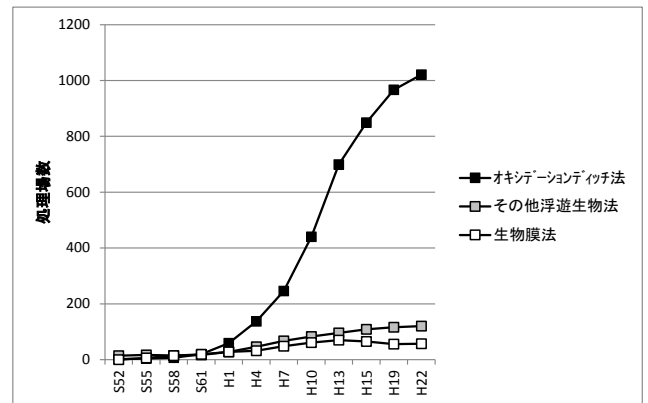


図-2 小規模処理場における処理方式の推移

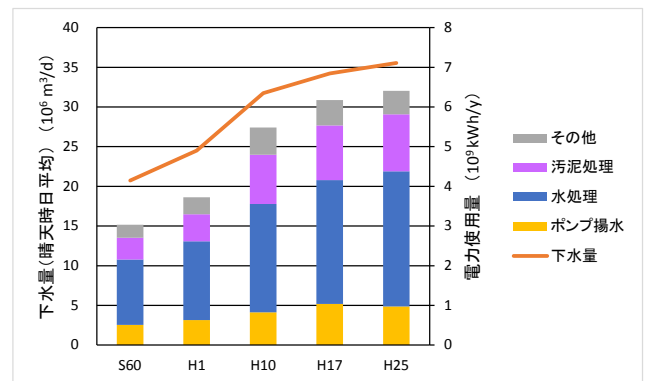


図-3 下水水量および下水処理場エネルギー使用量の推移

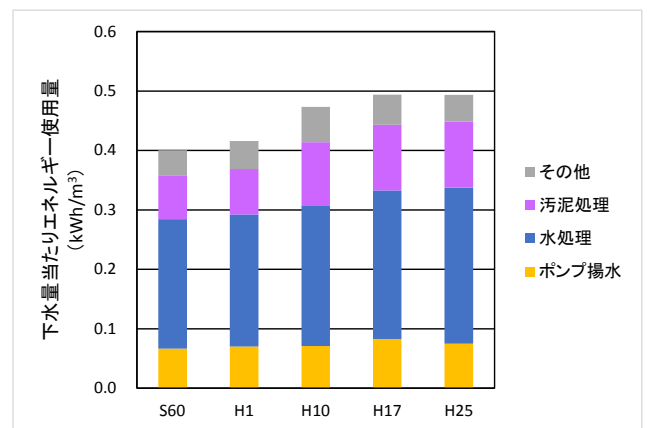


図-4 各プロセスのエネルギー消費特性（下水水量当たりのエネルギー使用量）の推移

時間が長いことなどにより、大きめの値となってい

る。このことが、平成以降のエネルギー使用量を押し上げる原因となっていると考えられる。

さらに、同じ処理法においても、規模の影響がある。図-5は、代表的な窒素除去方式である循環式硝化脱窒法について、日平均下水量とエネルギー消費特性の関係を示したものであるが、処理規模の小さな処理場においてエネルギー効率が悪い傾向にあることに留意が必要である。

表-1 処理方式のエネルギー消費特性 (H25年度)

処理方式	下水量当たりのエネルギー使用量* (kWh/m ³)
標準活性汚泥法	0.23
窒素・リン除去法	0.30
小規模処理法	0.55
その他	0.26

* 流入下水量が施設処理能力に対して60%程度以上の処理場についての平均値

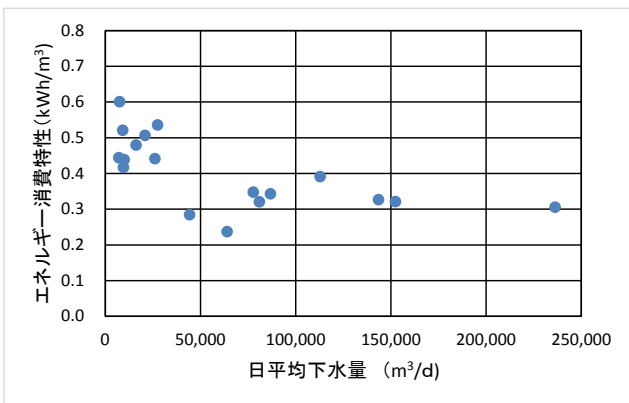


図-5 循環式硝化脱窒法における日平均下水量とエネルギー消費特性の関係 (H25年度)

一方、処理法ごとの水処理エネルギー使用量を見ると、図-6に示すように、標準活性汚泥法が65%と、他の処理法を大きく上回っている。これは、本処理法が中規模以上の処理場で多く採用され、処理下水量が多いことに起因している。下水道の全体的エネルギー効率化のためには、標準活性汚泥法のエネルギー効率を向上させることも極めて重要である。

3. エネルギー効率化の取り組みと課題

下水道の普及拡大とともに、反応タンク設備や制御方式の工夫等によってエネルギー効率の改善等が図られてきた。以下にその取り組みを紹介する。この取り組みは、近年、エネルギー消費特性の悪化を抑制する効果として現れてきていると考えられる。

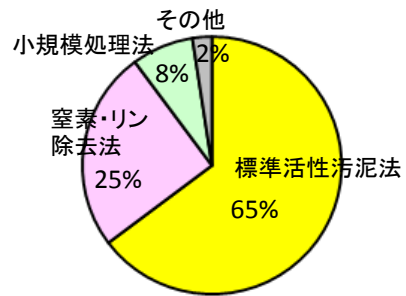


図-6 水処理エネルギー使用量に占める各処理方式の割合 (H25年度) (水処理エネルギー使用総量：日平均約900万kWh/d)

3.1 エネルギー効率化の取り組み

3.1.1 酸素供給方式

下水を浄化するためには、微生物に対して酸素を供給する必要があるが、主に反応タンク底部から気泡を供給する散気方式が用いられている。

従来は、反応タンクの混合を重視し、底部片側に散気装置を設置して旋回流を起こさせる旋回流式であったが、近年は、気泡から水への酸素移動効率を上げるため、気泡の滞留時間が長くなるように、底部全面に散気装置を設置して緩やかな流動条件で散気を行う全面エアレーション式が主流となっている。

また、気泡径が小さいほど、水中における気泡表面積が大きくなり、酸素移動効率も向上することから、気泡の微細化の工夫が行われてきている。例えば、微細気泡の供給が可能な膜分散式散気装置では、従来の散気板に比べて酸素移動効率が向上することから、送風量を20%程度以上削減することが可能となっている⁶⁾。

3.1.2 送風量の制御

下水処理場に流入する下水は、家庭生活や社会活動を反映して、一日のうちで流量、濃度ともに変動する。このため、処理に必要な酸素量も変動するが、流入負荷の高い時点に合わせた送風量では、全体として過大な送風量となってしまう。

これに対して、反応タンクの末端で溶存酸素(DO)濃度を連続測定し、適切な値となるように送風量を制御する技術が適用されてきた。近年は、窒素除去の必要性が高まってきており、必要酸素量もさらに増加することから、DO濃度に加えてアンモニア態窒素(NH₄-N)濃度も連続測定し、より適切な送風を行う制御技術が、下水道革新的技術実証研究(B-DASHプロジェクト)において実証されつつある⁷⁾。

3.1.3 攪拌動力の削減

窒素・リン除去法のエネルギー使用量が増加するのは、基本的に、水質浄化のために必要酸素量が増加し送風量が増加するためであるが、攪拌動力が追加されることも原因の一つである。

従来の検討⁸⁾により、機械式攪拌に代わり、より簡便で省エネルギーである粗大気泡を用いた間欠攪拌によって、所期の処理水質が得られることが明らかになっている。最近、これを発展させた処理法の考え方⁹⁾が提示されており、適用の進展が期待される。

3.1.4 流入下水の粒子性有機物の高度除去

下水処理においては、通常、最初に沈殿池が設けられ、沈降しやすい粒子性有機物が除去されるが、依然、高い濃度の有機物が粒子性有機物として存在する。これを生物処理の手前で高度に除去することは、生物処理で必要とされる酸素量の削減につながるるとともに、これを回収して嫌気性消化プロセスに回すことにより、メタンガスとしてエネルギー回収することが可能になる。

粒子性有機物の高度除去とメタンガス回収の技術について、既にB-DASH実証研究が実施されており、導入のガイドラインが発刊されている⁷⁾。

3.1.5 生物膜法の再検討

主に小規模処理場で採用されてきた生物膜法（支持体表面に形成される膜状の微生物による処理法）は、処理水に濁りがあつたり、負荷変動への追従性が不十分であつたりしたことから、採用数が減少してきた。しかし、小規模処理法のエネルギー消費特性を処理方式別に細かく見ると、浮遊生物法であるオキシデーションディッチ法が平均で 0.44kWh/m^3 であるのに対し、回転生物接触法や高速散水ろ床法といった生物膜法では、 0.2kWh/m^3 弱であり、より少ない使用エネルギーで処理が行われている。

この有利さを生かして、欠点を克服することが、エネルギー効率の改善につながると考えられる。前処理法や仕上げ処理法の工夫、生物反応タンク維持管理方法の適切化の検討などが望まれる。なお、このような方向に沿った改良型処理法について、現在、B-DASH実証研究が行われている⁷⁾。

3.2 求められる研究内容

今後、求められる研究としては、以下のものが挙げられる。まずは、酸素供給の主流である散気方式について、引き続き、気泡の微細化と酸素移動効率

の向上に関する技術的検討が行われることである。さらに、送風量制御の効率化や生物膜法の改善も着実に進める必要がある。また、少し先の課題ではあるが、エネルギー消費の一方の主要要素である送風空気圧についても、何らかの技術開発により低減できるようにになれば、大きな効果が得られる可能性がある。

この他、人口減少が予想される将来、下水量が減少した場合についても、どのような対策が有効となり得るのかを検討しておく必要がある。

4. おわりに

主に下水処理場の水処理プロセスについて、エネルギー使用量の変化とその原因、効率化のための取り組みを紹介した。

これまでの着実な検討により、様々な技術要素が開発され、適用されつつある。このような努力が継続され、エネルギー効率のさらなる改善が図られることを願うとともに、これまでとは異なった視点からの技術的ブレークスルーが生じることについても期待したい。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会（平成27年）平成26年度下水道白書 日本の下水道、資料編 7
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部、公益社団法人日本下水道協会（平成26年）下水道政策研究委員会報告書 新下水道ビジョン、4.123
- 3) 社団法人日本下水道協会（1982）下水道施設省資源省エネルギーマニュアル(案)、63
- 4) 公益社団法人日本下水道協会 下水道統計
- 5) 公益社団法人日本下水道協会 日本の下水道
- 6) 山下博史（2007）高効率散気装置の運転指標の経年変化と課題の評価、東京都下水道局技術調査年報2007、3-(1)-1
- 7) 下水道革新的技術実証研究（B-DASHプロジェクト）、<http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/bdash/bdash.htm>
- 8) (独)土木研究所、他（平成15年）高度処理施設設計資料検討プロジェクト報告書、土木研究所資料第3898号、p.35
- 9) 国土交通省下水道部（平成27年）既存施設を活用した段階的高度処理の普及ガイドライン（案）

鈴木 穰



国土交通省国土技術政策総合研究所
下水道研究部長
Yutaka SUZUKI