これからの曝気攪拌システム

渡部 春樹*・若山 正憲*

1. はじめに

平成12年度末現在、全国で1,622箇所の下水処理場が稼動しているが、これらの処理場で年間に消費される電力量は5,830,660千kWh、維持管理費にすると68,162百万円にも達している¹⁾。そして、この電力量の約60%が水処理施設で消費され、さらに、処理場の規模や施設内容によっても異なるが、標準法に代表される大規模処理場では約60%、OD法のような小規模処理場ではそのほとんどが反応タンクの動力、つまり曝気攪拌により消費されている。このように、曝気攪拌で消費されるエネルギーが処理場の全エネルギーに占める割合は非常に大きく、処理場の省エネ対策＝曝気攪拌の効率化と言っても過言ではない。ただし、近年は窒素、りん除去を目的とした高度処理への要請から、嫌気、無酸素、好気条件の確保など反応タンクに求められる要件も多様化しており、今後はこれまでの酸素移動効率の改善等に加えて、各処理方式に対応する最適な曝気攪拌システムとしての検討が必要になるものと思われる。

2. 曝気攪拌の効率化

2.1 曝気攪拌の効率

曝気攪拌のエネルギー効率を表す指標としては、動力効率が一般的である。動力効率(η)は20℃において、溶存酸素がゼロの清水に単位動力(1 kWh)当り溶解できる酸素量X(kg)を表したもので、

$$\eta = X \text{ (kg-O}_2\text{/kWh)}$$

で示される。気泡から水中への酸素の移動は、気泡と水との界面で行われるので、一定の空気量を水中

に送った場合、気泡と水との接触面積が大きい、つまり気泡が細かい程、酸素の移動速度は速くなる。この移動速度を律するもう一つの因子に気液更新があるが、これは気泡と水との速度差によって生じる摩擦の大きさのことで、摩擦力が大きい程酸素の移動速度は速くなる。つまり、曝気攪拌エネルギーを削減しようとする場合には、上記の気泡の細分化に着目するか、あるいは気泡の細分化と気液更新の双方を組み合わせるかによって効率化の対応や機械設備が異なってくる。現在下水処理場で稼動している曝気攪拌システムの主なものを、上記の考え方で大まかに分類すると以下ようになる。

1) 気泡の細分化に着目した方式

ブロワーと散気板や散気筒、散気パネルといった散気装置から構成される。微細な気孔径を有するセラミック、酸化アルミの焼結体、フレキシブルな合成樹脂などの材質で制作された散気装置により気泡を細分化することで効率化を図る。酸素の移動量は送気量で調整する。

2) 気泡の細分化と気液更新の双方を組み合わせる方式

ブロワーと攪拌機や循環ポンプ等の組み合わせにより構成される。

気泡を攪拌機やポンプの運転により生じる水流のせん断で細分化すると同時に、気液更新を行うことで効率化を図る。使用する攪拌機の種類によって水中攪拌式、軸流ポンプ式、循環水散気式の方式がある。また、最近では散気装置とプロペラ型の攪拌機を組合わせた方式がオキシデーションディッチ法などに採用されてきている。酸素の移動量は送気量の他、攪拌機の回転数やポンプの吐出量でも調整できる。

3) その他の方式

ブロワーを用いず、水面上に設置された曝気攪拌機の羽根やブラシを回転させることで、反応タンク

* (株)日本下水道事業団

Haruki WATANABE, Masanori WAKAYAMA

内を攪拌すると同時に大気中に飛沫や水膜を形成させる、あるいは泡立てることで酸素を溶解させる方式。一般に表面曝気方式と呼ばれ、オキシデーションディッチ法に広く採用されている。なお、酸素の移動量は攪拌機の回転数や羽根の浸漬深で調整する。

2.2 曝気攪拌の効率化

前項では曝気攪拌のエネルギー効率について、主に酸素移動効率の面からコメントしたが、下水処理のような活性汚泥を用いた反応タンクでは、酸素の移動とともに活性汚泥と下水が十分に攪拌混合されることが重要である。つまり、動力効率を検討する際の動力とは、酸素の移動と反応タンクの攪拌に費やされる動力の総和を指すもので、前項1)と3)の方式ではブロワーまたは曝気攪拌機の動力そのもの、2)ではブロワーと攪拌機の動力の和がそれに相当する。したがって、ひと口に曝気攪拌の効率化と言っても、方式によってそれぞれ対応が異なってくる。そこで、ここでは2)の方式の中から、水中攪拌式の効率に関する検討事例をもとに、曝気攪拌の効率化のポイントについて考えてみることにする。

<水中攪拌式曝気攪拌システムの効率に関する検討事例>

堺ら²⁾は、水中攪拌式の曝気攪拌システムについて、酸素移動速度の増減に対し、送気量と攪拌機の回転数の制御により動力効率の向上を図る実験を実施している。

結果の概要は次のとおりである。

実験では、

- (1) 攪拌機の回転数一定 (60Hz) で送気量のみ可変
- (2) 送気量一定で攪拌機の回転数のみ可変
- (3) 攪拌機の回転数と送気量の同時可変

の各条件下で、酸素移動速度と曝気攪拌の動力効率の関係を整理している。なお、実験は清水を対象とし、深さ4.5m (散気水深4m) の水槽を用いて行ったものである。また、堺ら³⁾は実験に使用した攪拌機について、攪拌のみでの動力が駆動周波数の2.8乗に比例することを確認しており、条件(3)では、送気量を攪拌機の駆動周波数に対し①線形比例、②2乗比例、③3乗比例で可変させる制御を行っている。実験から得られた動力効率と酸素移動速度の関係を図-1²⁾に示す。この図より、送気量と回転数の同時可変を行った条件(3)の③が最も効率が高く、広い酸素移動速度において安定した効率を維持していることがわかる。これは、先に確認されている周波数と攪拌動力の比例関係が送気量の制御においても確認され、この条件では攪拌動力と送気動力の比率が一定に保たれている。次に、条件(3)③と条件(1)について、図-1に全動力(送気動力と攪拌動力)を加えた関係を図-2²⁾に示す。これより、(3)③の制御下においては、酸素移動速度に対する全動力の変化が直線的になっており、ここでも安定した動力効率が確保されていることがわかる。

図-1 酸素移動速度に対する動力効率

図-2 酸素移動速度に対する全動力と動力効率

この事例は、水中攪拌式の曝気攪拌システムの効率化においては、送気量と攪拌機回転数の同時制御が不可欠であり、水中攪拌式の攪拌機が広範囲の酸素移動速度に対し優れた制御性を有することを報告したものであるが、同時に、曝気攪拌システムの効率を評価する指標としての動力効率の考え方を示している。この事例で示されている考え方に沿って1)と3)の方式での効率化における要点を以下に整理してみる。

2.2.1 方式1)の効率化

この方式で必要となる動力は、所定の水深に設置された散気装置に空気を送るブロワーの動力である。この動力を左右するものは、送気量と水深や送気管、散気装置に由来する圧力損失である。散気装置で気泡を細分化し酸素移動効率が改善されることで、送気量は低減されるが、一方で散気装置の圧力損失は増大する。水深を一定とした場合、この両者による動力の増減が効率化の良否を決定する。一般的な散気装置（気孔径300～400 μm ）と微細目の散気装置（気孔径150～260 μm ）では酸素移動効率が改善され、送気量、消費動力とも30％程度の削減が可能と言われている⁴⁾。ただし、高い酸素移動効率が得られる散気装置単位面積当たりの送気量に制限があり、広範囲の酸素移動量への対応は難しいとされていた。しかし、最近では合成樹脂製の散

気パネルで、広範囲の送気量で高い効率を確保できる素材が実用化されており⁵⁾、こうした課題への対応も可能となってきた。なお、この方式では攪拌を送気に頼っていることから、送気量が少ない条件で攪拌を確保するためには、散気装置の配置や攪拌を補助する攪拌機等への考慮が必要である。

2.2.2 方式3)の効率化

この方式での曝気攪拌機の性能は、定格運転での酸素の供給が第一であり、回転数や浸漬深で制御できる範囲も狭い。したがって、効率化は必要酸素量の供給確保を前提とした間欠運転（好気運転）が基本となる。間欠時以外は回転数を制御して攪拌のみの運転を行える機種も実用化されているが、表面曝気の特徴から攪拌のみでの効率には限界があると考えられる。より一層の効率化を図る場合には、散気と攪拌を明確に区別したシステムを検討する必要がある。

3. これからの曝気攪拌システム

これまで下水処理方式の主流を占めてきた標準活性汚泥法では、反応タンクは好気条件のみでの運転が行われ、曝気攪拌の効率化は酸素移動効率の改善が中心であった。しかし、近年は標準活性汚泥法においてもバルキング対策として嫌気・好気法が採り入れられたり、高度処理では活性汚泥循環変法、嫌

図－3 各種処理方式における処理フロー

気・無酸素・好気法，ステップ流入式多段硝化脱窒法など反応条件が異なる反応タンクが組合された処理方式の採用が増えてきている（図－3）。このため，複数あるいは異種の散気装置や攪拌機から構成されるシステムとなる。また，効率についても嫌気・無酸素タンクでの攪拌と好気タンクでの曝気攪拌のそれぞれに最適な装置や攪拌機を選定した上で，システム全体としての効率化を検討する必要がある。なお，窒素除去では各タンク間においてかなりの量の循環が行われていることから，この循環に要する動力の有効利用も一考に値するものと思われる。また，今後予想される既存施設の改造による高度化への対応では，タンクの構造や容量などの制限も加わることから，装置や攪拌機を選定や効率化においてはよりきめ細かい検討が必要になる。

4. おわりに

曝気攪拌システムの効率化は，下水処理場の恒久的な課題である。これまでの取組みにより散気装置，送気機，攪拌機などの機器，いわゆるハード面の対

応はかなり進んでいる。また，これらのハードの制御に必要な各種センサー，VVVFをはじめとする制御機器の信頼性も向上してきている。さらには，流入水量，水質の変動への対応においても，経験則を補う各種モデルなどのソフトが開発され，実用化に近いレベルに達してきている。今後一層の効率化を図る上では，負荷の変動等へのよりきめ細かい制御が不可欠となることから，これらのハードとソフトが有機的に融合した総合的なシステムの実用化が待たれるところである。

参考文献

- 1) 社団法人 日本下水道協会：平成12年度版 下水道統計
- 2) 堺好雄，川内正六：嫌気・好気両用水中攪拌機の周波数変換機を用いた回転数制御〈その2〉，月間下水道，13(8)，pp54～58 (1990)
- 3) 堺好雄，川内正六：嫌気・好気両用水中攪拌機の周波数変換機を用いた回転数制御，月間下水道，13(6)，pp88～92 (1990)
- 4) 日本下水道事業団：各種散気方式の比較検討資料（内部資料）
- 5) 伊東賢洋，加藤薫：メンブレン式超微細気泡散気装置実証実験，第39回下水道研究発表会講演集，社団法人 日本下水道協会，pp698～700 (2002) 他