

流入・流出水質データを活用した 下水処理場向け曝気風量制御

橋爪弘二* 野田清治***
吉田 航** 古川誠司***
今村英二**

Aeration Control for Sewage Treatment Plant Using Inflow and Outflow Water Quality Data

Koji Hashizume, Wataru Yoshida, Eiji Imamura, Seiji Noda, Seiji Furukawa

要 旨

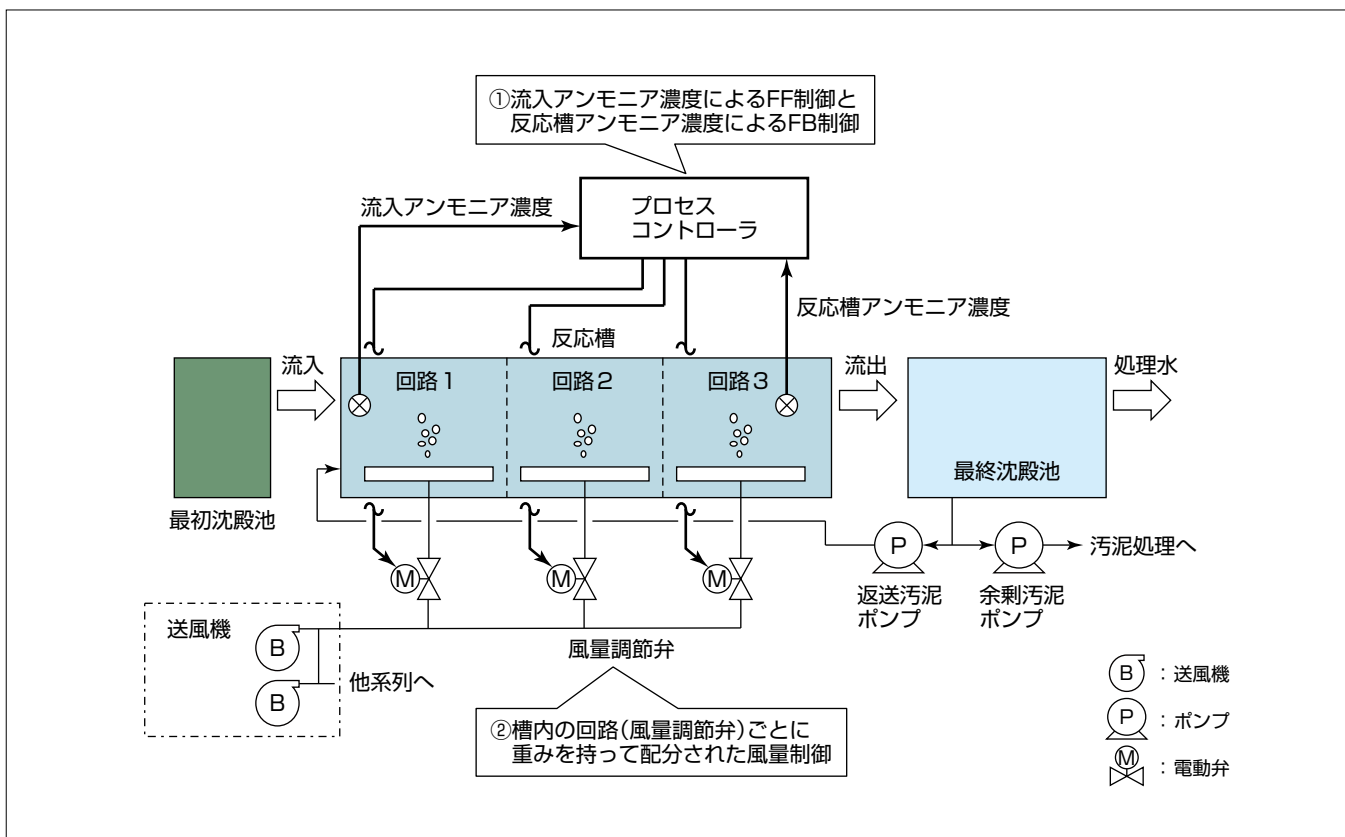
下水処理場は水環境保全のために大きな役割を果たしているが、汚濁物質を除去する反応槽での生物処理に多量のエネルギーを使用している。特に東京湾などの閉鎖性水域では総量規制に対応するため、窒素除去が可能な高度処理の導入が進んでおり、処理水量当たりの消費エネルギーが増加する傾向にある。水質改善と省エネルギー化を両立させるため、二軸管理と呼ばれる手法が近年導入されている。水質とエネルギーにはトレードオフの関係があるため、目標とする処理水質を最小の消費エネルギーで実現する曝気(ばっき)風量制御が求められている。

三菱電機では従来開発してきた反応槽内のアンモニア濃度による制御に、反応槽流入部で計測したアンモニア濃度による制御を加えた曝気風量制御技術を開発中である。こ

の制御技術は、流入負荷の変動に応じた風量制御を反応槽前段のフィードフォワード制御(FF制御)で行い、槽内のアンモニア濃度によるフィードバック制御(FB制御)を反応槽後段で行う技術である。FF制御と組み合わせたことで流入負荷の変動に早く対応し、反応槽アンモニア濃度を目標値に追従する制御ができる。

シミュレーション評価によって、周期的に変動する流入負荷変動に対して追従できること、また、放流水質が一定となったことによって、一般的な溶存酸素(DO)制御と比べて約15%の風量削減効果が得られることを確認した。

この技術を適用した曝気風量制御の実用化を行い、放流水質を確保しつつ省エネルギーを実現することで、持続可能な水環境保全に貢献していく。



流入・流出水質データを活用した曝気風量制御

下水処理場の反応槽流入部に設置したアンモニア計の計測値によるFF制御と、反応槽内のアンモニア濃度を使ったFB制御を組み合わせ、反応槽内の回路ごとに風量制御を行うことで、流入負荷の変動に安定して追従できる曝気風量制御方式である。

1. ま え が き

下水処理場は下水道管渠(かんきょ)から流入する下水を浄化して河川や海域に放流する施設であり、都市部の水環境保全で重要な役割を果たしている。東京湾などの閉鎖性水域では赤潮や青潮などへの対策として、処理水質を改善し、窒素、りんなどの栄養塩類の放流総量を削減することが求められていることから、生物学的高度処理の導入が進められている。

また、下水道事業は下水の処理に7,391百万kWhという大量のエネルギーを消費しており、これは168万世帯の年間電力使用量に相当する⁽¹⁾。図1に示すとおり、下水道事業の電力消費量は、下水処理場の水処理施設で約半分が消費されており、水処理施設の主要負荷である送風機が使用するエネルギーの削減が求められている。

処理水質と消費エネルギーはトレードオフの関係にあり、処理水質を改善すると消費エネルギーが増加し、水量当たりの原単位が悪化する傾向にある。近年では、処理水質と消費エネルギーを適切に評価するための二軸管理と呼ばれる管理手法が提案されており、目標とする水質に対し、処理水質が安定的に追従する曝気風量制御が求められている。

2. 流入・流出水質データを活用した曝気風量制御

2.1 下水処理場の生物処理

下水処理場の処理フローを図2に示す。反応槽内では活性汚泥と呼ばれる微生物が下水と混合し、送風機から送られた空気で攪拌(かくはん)されることによって、酸素の多い好気状態で下水中の有機物を分解している。また、反応槽内では活性汚泥がアンモニア性窒素を硝酸に変換する硝化反応も同時に行われており、生物学的高度処理では積極的に硝化反応が行われるように運転条件が設定されている。

2.2 従来型の曝気風量制御の課題

2.1節に述べたとおり、反応槽内では有機物の分解反応

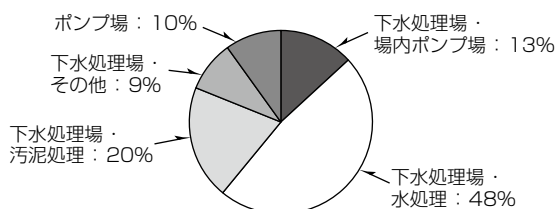


図1. 平成28年度の下水処理場の消費エネルギー

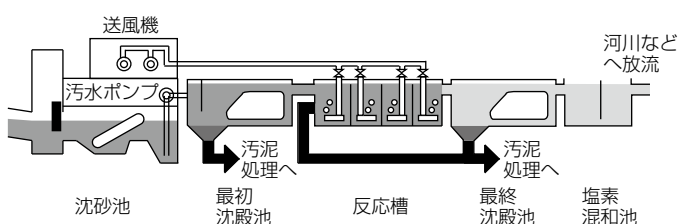


図2. 下水処理場の処理フロー

と硝化反応が同時に行われており、それぞれを効率的に促進させる必要がある。

従来一般的であったDO制御は槽内のDOを一定値に保つことによって有機物の分解を制御するものであるため、硝化反応の進行状況を直接把握していない。また、アンモニア計を反応槽内に設置して、硝化反応の進行状況を直接把握するFB制御を行う技術が開発されているが、硝化反応に多量の酸素が必要であることに加え、有機物の除去に比べて反応速度が遅いことに起因する課題があった。

図3にアンモニア制御の概念図を示す。流入アンモニア濃度の変動と各制御による反応槽末端のアンモニア濃度の変化を示しており、理想的なアンモニア制御は反応槽末端のアンモニア濃度が常に目標値に追従するよう制御するものである。

これに対し、DO制御の場合、流入変動に関わらず槽内のDOを一定にするよう制御するため、必要以上の曝気風量となる時間帯が生じてしまう。また、従来のアンモニア制御では流入アンモニア濃度の変動に対する制御遅れが発生することから、安定性と追従性に課題があった。

2.3 開発した曝気風量制御

今回開発した曝気風量制御は、反応槽アンモニア濃度の計測値によるFB制御に加えて、反応槽へ流入する流入アンモニア濃度によるFF制御を組み合わせるとともに、複数設置された風量調節弁を個別に制御することで最適な曝気風量制御を行うものである(図4)。

従来型のアンモニア制御は、式(1)に示すとおり、反応槽アンモニア濃度の計測値と、目標値の差分に応じた比例項

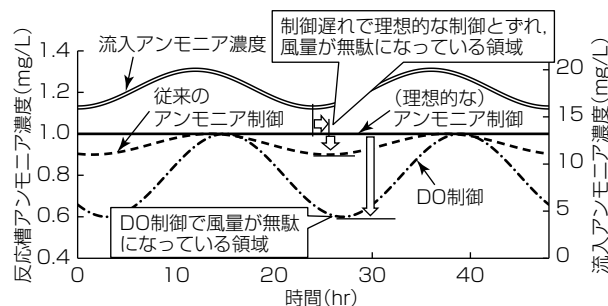


図3. アンモニア制御の概念図

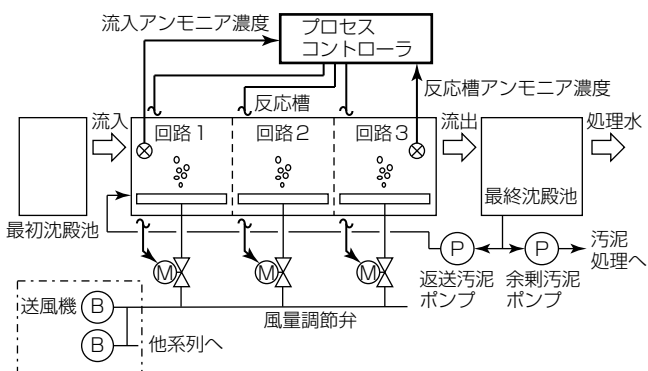


図4. 曝気風量制御

と、差分の積算値による積分項によって曝気風量(Q)を算出するPI(Proportional Integral)型FB制御である。

$$Q = K_p \times ((NH_{A,eff} - NH_{A,target})) + \frac{1}{T_i} \times \sum (NH_{A,eff} - NH_{A,target}) \dots\dots\dots (1)$$

K_p : フィードバック比例定数
 $NH_{A,eff}$: 反応槽アンモニア濃度
 $NH_{A,target}$: 目標反応槽アンモニア濃度
 T_i : 積分時間

今回開発した制御は、式(2)に示すとおり、従来型のPI型FB制御に流入アンモニア濃度に比例するフィードフォワード項を追加するとともに、反応槽内の回路ごとに設置された風量調節弁を個別に制御するよう改良したものである。

$$Q = K_{a,i} \times NH_{A,inf} + K_{p,i} \times ((NH_{A,eff} - NH_{A,target})) + \frac{1}{T_i} \times \sum (NH_{A,eff} - NH_{A,target}) \dots\dots\dots (2)$$

$K_{a,i}$: 回路 i の流入アンモニア濃度
 フィードフォワード比例定数
 $K_{p,i}$: 回路 i のフィードバック比例定数
 $NH_{A,inf}$: 流入アンモニア濃度

また、反応槽は通常複数の回路に分かれており、活性汚泥と混合した汚水が流入側から流出側に流れつつ生物処理が進行する。比例定数($K_{a,i}$, $K_{p,i}$)を反応槽の回路ごとに重みを付けて配分することによって、反応槽前段の回路では主に流入アンモニア濃度の変動に応じて風量を変動させ、負荷変動に対する追従性を向上させることができる。一方、後段の回路は反応槽アンモニア濃度によるFB制御を主体とすることで、目標とするアンモニア濃度に安定的に追従できる制御が可能である。

3. シミュレーション評価

反応槽部分の生物処理を模擬できる、国際水協会の活性汚泥モデルNo. 1⁽²⁾を利用してシミュレーション評価を行った。

3.1 シミュレーションモデルと条件

図5に示す嫌気・好気活性汚泥法を模擬した槽列モデルによってシミュレーション評価を行った。シミュレーション条件を表1に示す。

図6にこのシミュレーションに使用した流入水量と流入アンモニア濃度の時間変化を示す。流入アンモニア濃度の

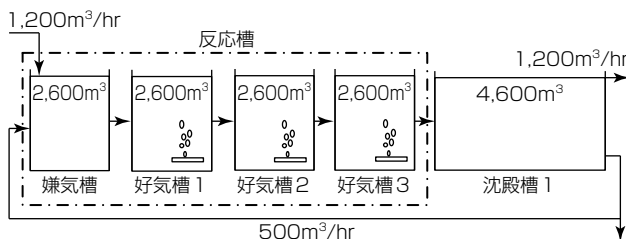


図5. シミュレーションモデル

平均値を24mg-N/Lとし、朝方と夕方に流入ピークとなるよう晴天時の流入負荷を模擬して設定した。

3.2 制御の安定性・負荷変動への応答性の評価

反応槽回路ごとに重みを付けて配分した風量制御の有効性を確認するため、表2に示す制御係数を各回路で一定とした場合と傾斜配分した係数で制御した場合のシミュレーションを行った。なお、反応槽の目標アンモニア濃度($NH_{A,target}$)は、反応槽アンモニア濃度が常に0.2mg/Lを超えないようそれぞれ設定している。

図7に反応槽アンモニア濃度(処理水質)の経時変化を示す。図上部の流入アンモニア濃度の変動に対して、どちらの方式も放流水質基準を満たしている。一定係数で制御した場合、流入負荷の変動に遅れて反応槽のアンモニア濃

表1. シミュレーション条件

項目	設定値	
平均処理水量	28.800m³/日(1,200m³/hr)	
反応槽容積	嫌気槽	2,600m³
	好気槽1	2,600m³
	好気槽2	2,600m³
	好気槽3	2,600m³
水理的滞留時間(HRT)	8.7hr	
返送汚泥流量	500m³/hr(一定流量)	
反応槽内MLSS濃度	4,000mg-COD/L	

MLSS : Mixed Liquor Suspended Solids
 COD : Chemical Oxygen Demand

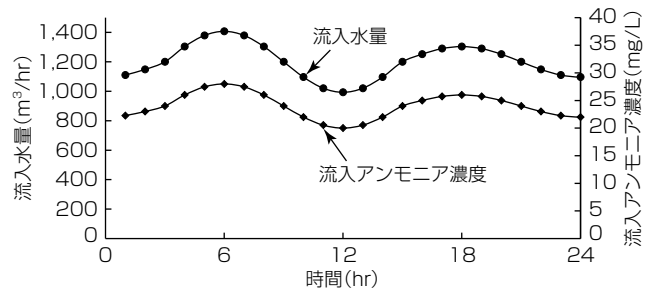


図6. 流入条件

表2. 制御係数

		制御係数設定			$NH_{A,target}$ (mg-N/L)
		好気槽1	好気槽2	好気槽3	
一定係数	K_a (流入項)	a	a	a	0.175
	K_p (流出項)	p	p	p	
傾斜係数	K_a (流入項)	1.5a	a	0.5a	0.190
	K_p (流出項)	0.5p	p	1.5p	

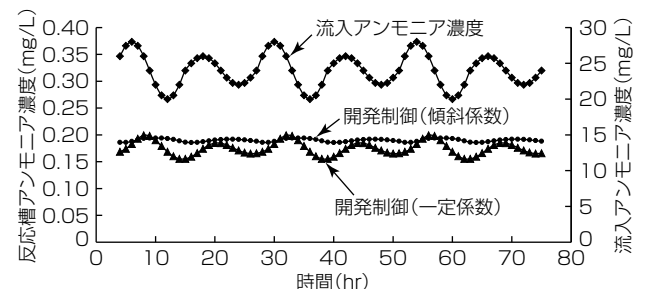


図7. 開発制御方式での処理水質

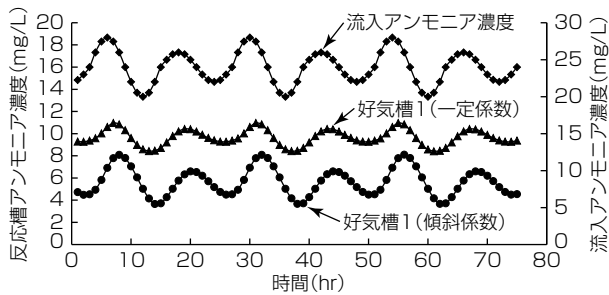


図8. 開発制御方式での好気槽1のアンモニア濃度

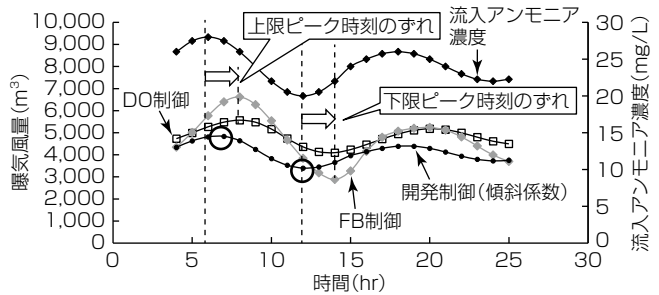


図10. 制御方式による曝気風量の比較

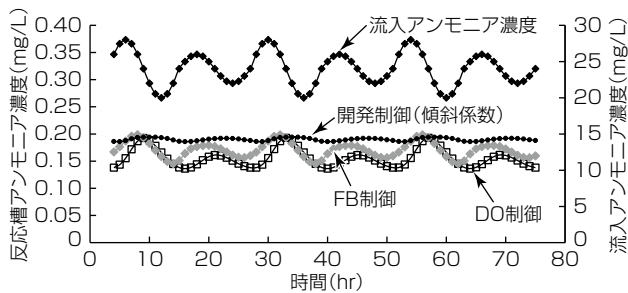


図9. 制御方式による処理水質の比較

度が変動幅0.05mg/L(0.15~0.2mg/L)で変動しているが、傾斜係数で制御した場合、0.02mg/L(0.18~0.2mg/L)と約40%の変動幅で制御できており、放流水質の変動が抑えられ、目標値に追従した制御となっていることが分かる。

図8に反応槽前段の好気槽1のアンモニア濃度の経時変化を示す。傾斜係数とした制御では、流入アンモニア濃度に比例する風量制御を反応槽前段で積極的に行うため、アンモニア濃度も一定係数の場合と比べ低くなっており、負荷の変動に対して流入側に近い回路で処理が進んでいることが分かる。このため、後段のFB制御での目標値への追従性が高く、安定した制御ができています。

次に、従来の制御方式と比較するため、DO制御、FB制御のシミュレーションを行った。なお、DO制御、FB制御はいずれも各好気槽を同一の風量で制御している。

図9に処理水質の経時変化を示す。流入アンモニア濃度の変動に対してDO制御、FB制御共に目標水質の0.2mg/Lから大きく変動していることが分かる。

また、図10に曝気風量の経時変化を拡大したものを示す。今回開発した制御に比べ、従来方式のDO制御、FB制御はどれも流入負荷変動に対して曝気風量の応答が遅れており、おおむね2時間程度ピーク時刻がずれている。特に、従来型のFB制御は、曝気風量の変動が最も大きい結果となっており、負荷変動に適切に追従できていないことが分かる。これに対し、今回開発した制御は、図10の○部で示すとおり、流入変動に対する曝気風量ピーク時刻のずれが小さく、追従性の高い制御であることが分かる。

次に、3日間のシミュレーションによる各制御方式の合計曝気風量とDO制御に対する風量削減率を表3に示す。アンモニア濃度による制御は、どの方式も目標とする放流

表3. 曝気風量削減率(対DO制御)

制御方式	3日間の合計曝気風量(m ³)	送風量削減率(対DO制御)(%)
開発(FF+FB)制御	傾斜係数	2.98×10 ⁵ / 15.20
	一定係数	3.28×10 ⁵ / 6.61
FB制御	3.40×10 ⁵	3.44
DO制御	3.52×10 ⁵	

水質を満たしつつDO制御に対する風量削減効果が得られているが、今回開発したFF制御とFB制御を組み合わせると傾斜係数を傾斜配分する制御が最も効果が高い結果になった。

これは、ほかの方式では流入負荷変動に対し、制御の遅れによる過剰な曝気を行う時間帯が生じているが、今回開発した曝気風量制御では、流入負荷の変動に対するFF制御を加えることで、放流水質を目標水質の0.2mg/Lに安定的に追従できるよう制御を行っており、曝気風量の無駄が少ない制御となったためである。

4. む す び

反応槽へ流入するアンモニア濃度に比例する流入FF制御と反応槽出口のアンモニア濃度によるFB制御を組み合わせ、反応槽の回路ごとに制御を行う曝気風量制御を開発した。本稿ではシミュレーション評価によって、従来の制御方式では実現できなかった、流入負荷の変動に対して、目標とする放流水質に安定して追従する制御が実現できることを示した。また、目標とする放流水質に追従することで、過剰な曝気風量を削減する効果が得られることを確認した。

この制御技術を適用した曝気風量制御装置は、今後実プラントでの実証を行い、実運転での制御の安定性、風量削減効果を確認した後、2020年度を目途に製品化することを予定している。放流水質を確保しつつ省エネルギーに寄与する制御技術を下水処理場に適用することで、持続可能な水循環系の構築に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 日本下水道協会：平成28年度版下水道統計，日本下水道協会（2018）
- (2) 味埜 俊：活性汚泥モデルASM1，ASM2，ASM2d，ASM3，環境新聞社，21～72（2005）