

# 下水処理プロセスの曝気量制御技術

吉田 航\*  
Wataru Yoshida  
今村英二\*  
Eiji Imamura  
野田清治†  
Seiji Noda

木本 勲\*  
Isao Kimoto  
橋爪弘二‡  
Koji Hashizume

ライフ

インダストリー

インフラ

モビリティ

共通領域

Aeration Control Technology for Sewage Treatment Process

## 要旨

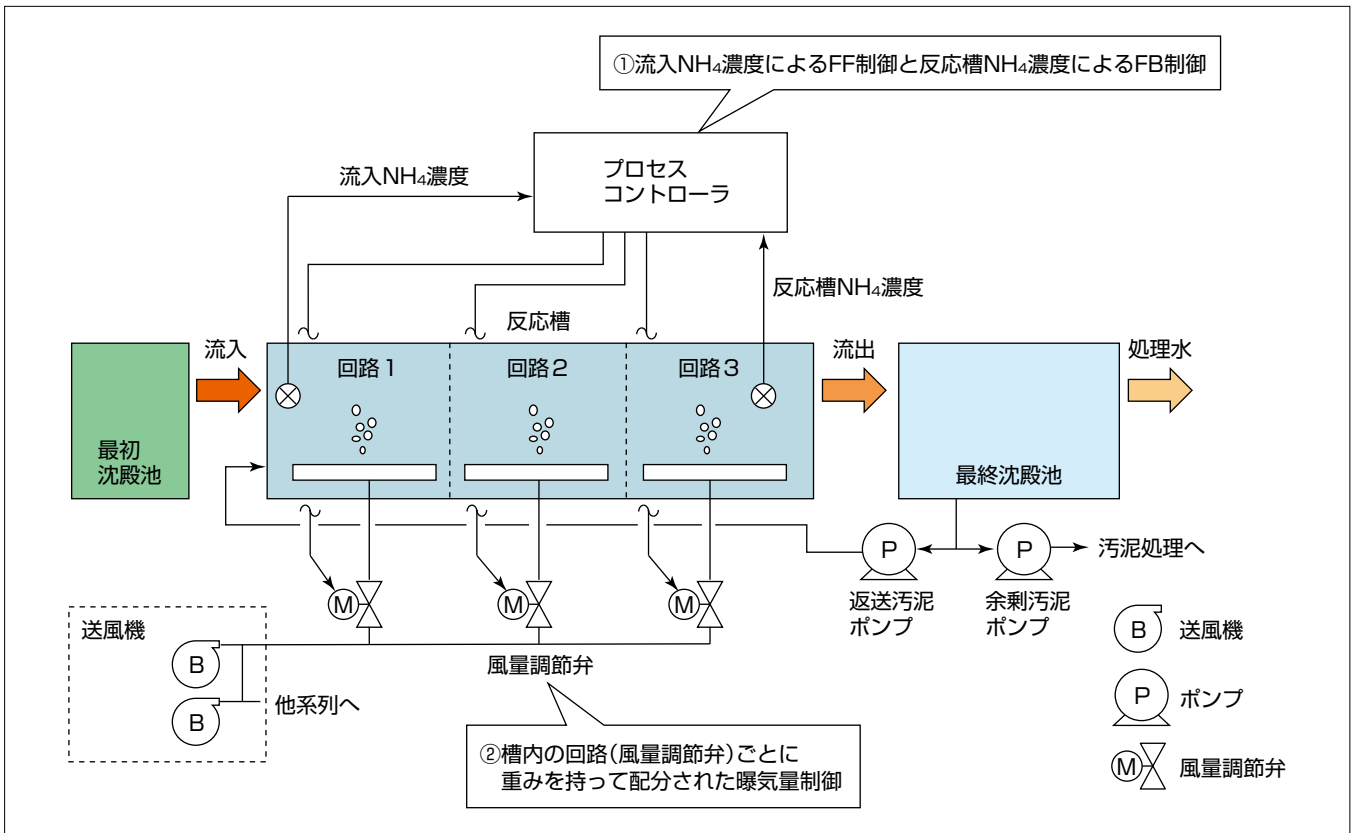
国連総会でのSDGs(Sustainable Development Goals)採択を受け、持続可能な社会の実現に向けて、水環境保全に関する関心が一層高まっている。下水処理場は都市部の水環境保全のために大きな役割を果たしているが、汚濁物質を除去する水処理反応槽で処理場全体の約半分の電力を消費している。特に、下水に含まれる窒素の除去には多量の空気供給(曝気(ばっき))が必要であり、目標にする処理水質を維持しつつ、過剰な曝気を削減する曝気量制御技術が求められている。

三菱電機では、従来開発してきた反応槽内のアンモニア(NH<sub>4</sub>)濃度によるフィードバック(FB)制御に、反応槽流入部で計測したNH<sub>4</sub>濃度の変動に応じたフィードフォワード(FF)制御を加えた曝気量制御技術を開発中である。こ

の制御技術は、反応槽前段でFF制御を主体とした制御を行い、反応槽後段で従来のFB制御を行う。従来のFB制御にFF制御を組み合わせたことで流入負荷の変動に素早く対応し、反応槽NH<sub>4</sub>濃度を目標値に制御できる。

シミュレーション評価によって、周期的な流入負荷変動に対して処理水質を一定に制御でき、一般的な溶存酸素(DO)制御と比べて14%の曝気量削減効果が得られることを確認した。また、反応槽前段のFF制御によって効率的なNH<sub>4</sub>除去が可能であることを明らかにした。

この技術を適用した曝気量制御の実用化を行い、良好な処理水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。



## 曝気量制御技術

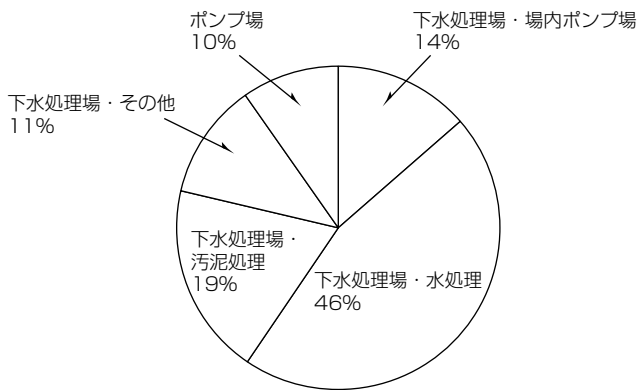
下水処理場の反応槽流入部に設置したNH<sub>4</sub>計の計測値によるFF制御と、反応槽内のNH<sub>4</sub>濃度を使ったFB制御を組み合わせ、反応槽内の回路ごとに曝気量制御を行うことで、流入負荷の変動に安定して追従できる曝気量制御方式である。

## 1. ま え が き

国連総会でのSDGs採択を受け、持続可能な社会の実現に向けて、水環境保全に関する関心が一層高まっている。下水処理場は都市部の水環境保全で重要な役割を果たしており、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。下水に含まれる窒素、リンなどの栄養塩類は、海や河川に放流されると富栄養化を引き起こし、赤潮など水域環境の悪化を招くおそれがあることから、生物学的高度処理の導入が進められている。

図1に下水処理場の消費電力を示す。下水道事業は下水の処理に7,554百万kWhという大量の電力を消費しており、これは172万世帯の年間電力使用量に相当するが<sup>(1)</sup>、その約半分は下水処理場の水処理施設によって消費される。よって、水処理施設で最も多く電力を消費する送風機の消費電力削減が求められている。

処理水質と消費電力はトレードオフの関係にあるため、処理水質を改善すると消費電力が増加する傾向がある。流入水中の汚濁物量の変動に応じた適切な曝気量制御によって、目標とする処理水質を維持しつつ、過剰な曝気量を削減できる。



引用元：平成29年度版下水道統計

図1. 下水処理場の消費電力 (平成29年度) (1)

## 2. 流入・流出データを活用した曝気量制御

### 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、送風機から空気が供給されることによって酸素の多い好気状態を作り出す。これによって、下水中の有機物の分解とアンモニア性窒素を硝酸に変換する硝化反応が進行する。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 従来型曝気量制御の課題

従来の曝気量制御としてDO制御が一般的である。DO制御は槽内のDOを一定値に保つ制御であるが、硝化反応の進行状況に基づく制御ではない。また、近年では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測定するFB制御が開発されている。

図3に曝気量制御の概念図を示す。流入NH<sub>4</sub>濃度の変動と各制御による反応槽末端のNH<sub>4</sub>濃度の変化を示しており、

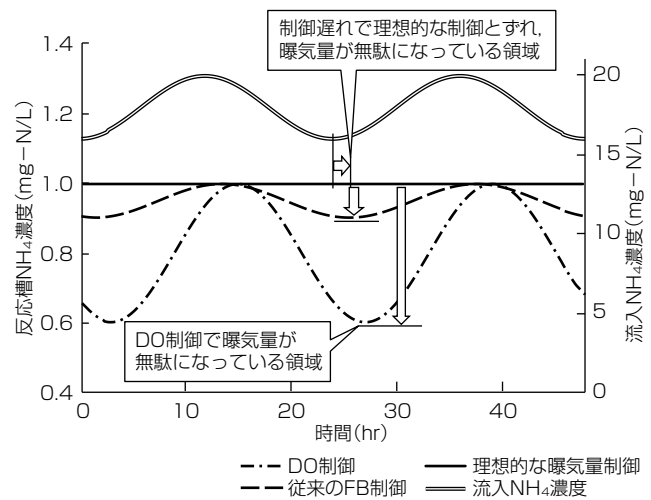


図3. 曝気量制御の概念図

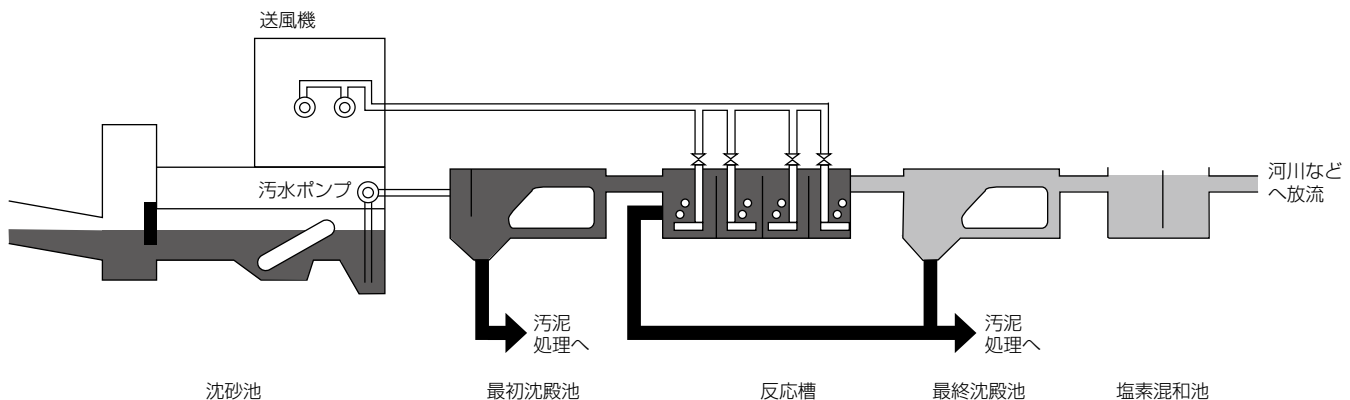


図2. 下水処理場の処理フロー

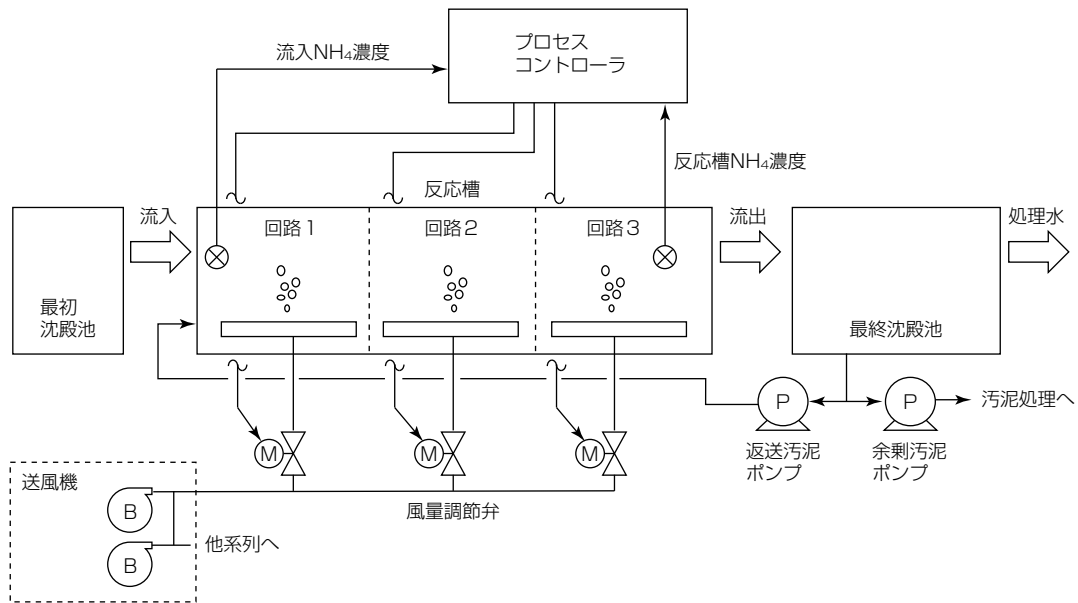


図4. 曝気量制御

理想的な曝気量制御は反応槽末端のNH<sub>4</sub>濃度が常に目標値に追従するよう制御する。

これに対し、DO制御は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、必要以上に空気を供給する時間帯が生じてしまう。また、従来のFB制御では反応槽の滞留時間経過後のNH<sub>4</sub>濃度に基づいて曝気量を制御するため、流入NH<sub>4</sub>濃度の変動に対する制御遅れが発生し、追従性に課題があった。

### 2.3 流入・流出水質データを活用した曝気量制御

今回開発した曝気量制御は、図4に示すとおり、反応槽出口(処理水)NH<sub>4</sub>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NH<sub>4</sub>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量制御を行うものである。

従来型のFB制御は、式(1)に示すとおり、処理水NH<sub>4</sub>濃度の計測値と目標値との差分に応じた比例項と、差分の積算値による積分項によって曝気量(Q)を算出するPI(Proportional Integral)型FB制御である。

$$Q = K_p \times ((NH_{4, eff} - NH_{4, target})) + \frac{1}{T_i} \times \sum (NH_{4, eff} - NH_{4, target}) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $K_p$  : FB比例定数  
 $NH_{4, eff}$  : 処理水NH<sub>4</sub>濃度  
 $NH_{4, target}$  : 目標処理水NH<sub>4</sub>濃度  
 $T_i$  : 積分時間

今回開発した制御(提案制御)は、式(2)に示すとおり、従来型のPI型FB制御に流入NH<sub>4</sub>濃度に比例するFF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。

$$Q_i = K_{a, i} \times NH_{4, inf} + K_{p, i} \times ((NH_{4, eff} - NH_{4, target}) + \frac{1}{T_i} \times \sum (NH_{4, eff} - NH_{4, target})) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $K_{a, i}$  : 回路iのFF比例定数  
 $K_{p, i}$  : 回路iのFB比例定数  
 $NH_{4, inf}$  : 流入NH<sub>4</sub>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污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NH<sub>4</sub>濃度の変動に応じて曝気量を変動させ、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NH<sub>4</sub>濃度によるFB制御を主体とすることで、目標とするNH<sub>4</sub>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

反応槽内部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<sup>(2)</sup>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NH<sub>4</sub>濃度の時間変化を示す。流入NH<sub>4</sub>濃度の平均値を24mg-N/Lとし、朝方と夕方に流入ピークになるように晴天時の流入負荷を正弦波曲線で模擬して設定した。

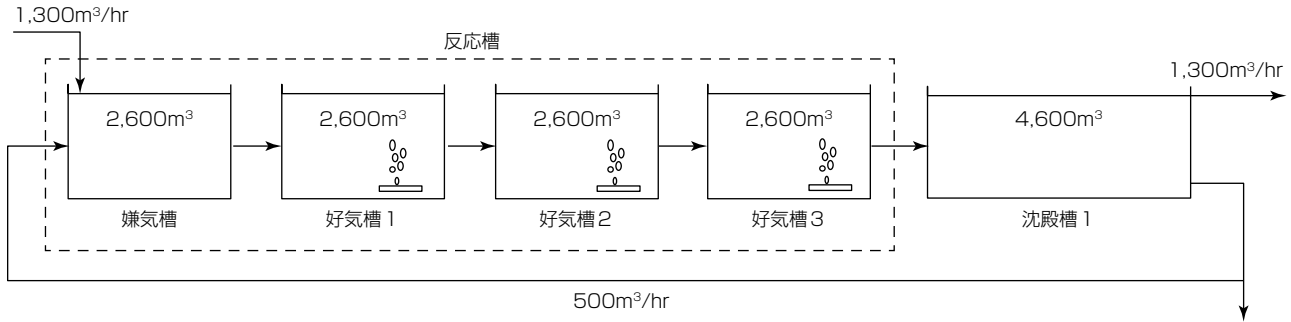


図5. シミュレーションモデル

表1. シミュレーション条件

項目	設定値	
平均処理水量	31,200m <sup>3</sup> /日 (1,300m <sup>3</sup> /hr)	
反応槽容積	嫌気槽	2,600m <sup>3</sup>
	好気槽1	2,600m <sup>3</sup>
	好気槽2	2,600m <sup>3</sup>
	好気槽3	2,600m <sup>3</sup>
水理学的滞留時間(HRT)	8.0hr	
返送汚泥流量	500m <sup>3</sup> /hr(一定流量)	
反応槽内MLSS濃度	2,000mg-COD/L	

MLSS: Mixed Liquor Suspended Solids  
COD: Chemical Oxygen Demand

表2. 制御係数

		制御係数設定			NH <sub>4</sub> -N target (mg-N/L)
		好気槽1	好気槽2	好気槽3	
一定係数	K <sub>a</sub> (流入項)	a	a	a	0.40
	K <sub>p</sub> (流出項)	p	p	p	
傾斜係数	K <sub>a</sub> (流入項)	1.5a	a	0.5a	0.47
	K <sub>p</sub> (流出項)	0.5p	p	1.5p	

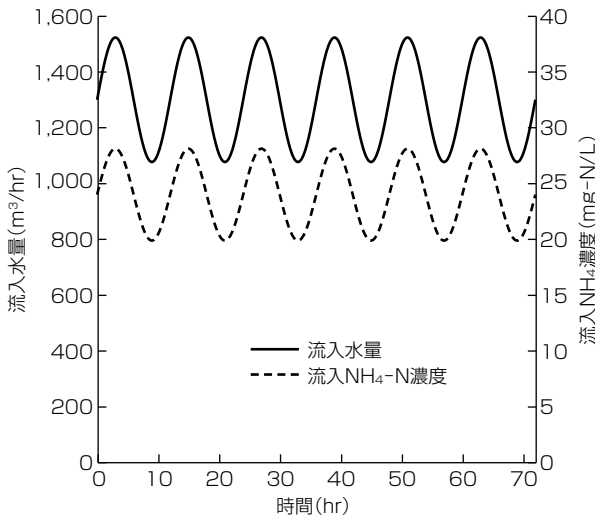


図6. 流入条件

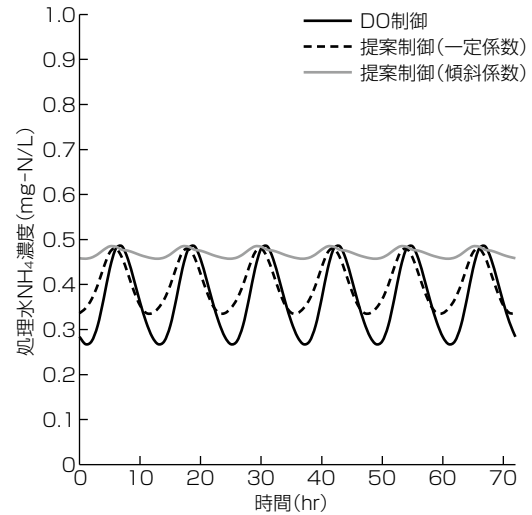


図7. 処理水NH<sub>4</sub>濃度

### 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曝気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に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、処理水の目標NH<sub>4</sub>濃度(NH<sub>4</sub>-N target)は、処理水NH<sub>4</sub>濃度が常に0.5mg/Lを超えないようそれぞれ設定している。また、比較例として、好気槽2のDO目標値を2mg/LとするDO制御のシミュレーションを行った。

図7に処理水NH<sub>4</sub>濃度の経時変化を示す。どの方式も放

流水質基準(1.0mg/L未満)を満たしている。DO制御の場合、流入負荷の変動に対して処理水のNH<sub>4</sub>濃度が変動幅0.23mg-N/L(0.27~0.5mg-N/L)で変動した。一方、一定係数で制御した提案制御の場合、処理水のNH<sub>4</sub>濃度が変動幅0.16mg-N/L(0.34~0.5mg-N/L)で変動し、傾斜係数で制御した場合、0.04mg/L(0.46~0.5mg/L)の変動幅で制御できており、処理水の水質変動が抑えられ、目標値に追従した制御になっていることが分かる。

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量とDO制御に対する曝気量削減率を表3に示す。提案制御は、どちらの方式もDO制御に対する曝気量削減効果が得られているが、係数を傾斜配分する制御が最も曝気量削減効果が高く、DO制御比で14.0%曝気量が削減された。

図8にASM(Activated Sludge Models)1の生物反応式

表 3. 曝気量削減率(対DO制御)

制御方式		3日間の 合計曝気量(m <sup>3</sup> )	曝気量削減率 (対DO制御)(%)
提案制御	傾斜係数	3.02×10 <sup>5</sup>	14.0%
	一定係数	3.41×10 <sup>5</sup>	2.80%
DO制御		3.51×10 <sup>5</sup>	

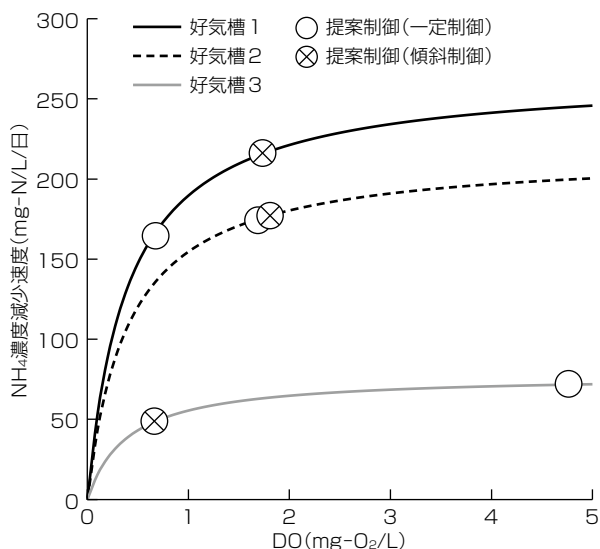


図 8. NH<sub>4</sub>濃度減少速度の溶存酸素(DO)依存性

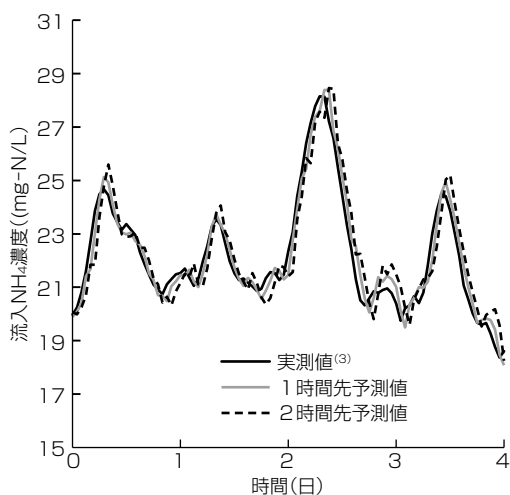


図 9. 流入NH<sub>4</sub>濃度予測結果

に基づいて算出した各好気槽での硝化菌増殖に伴うNH<sub>4</sub>濃度減少速度とDOの関係性を示す。なお、一定係数、傾斜係数でそれぞれ制御した提案制御の計算結果でのNH<sub>4</sub>濃度減少速度の平均値も図8のグラフ上に示す。傾斜係数にした提案制御で、好気槽1では流入NH<sub>4</sub>濃度に比例する曝気量制御を主体にして行ったことでDOが増加し、一定係数

にした提案制御に比べてNH<sub>4</sub>濃度減少速度が増加した。一方、好気槽3では傾斜係数にした提案制御でDOが大幅に低下したが、NH<sub>4</sub>濃度減少速度は一定係数にした提案制御と同等であった。よって、傾斜係数にした提案制御では好気槽前段で効率的にNH<sub>4</sub>濃度減少速度を増加させ、好気槽後段での過剰な曝気量を抑制したと考えられる。

さらに当社では、独自のAI(Artificial Intelligence)技術“Maisart (マイサート)”によって、生物反応槽への流入NH<sub>4</sub>濃度を数時間先まで高精度に予測する技術を持っている。このAIは、過去の流入NH<sub>4</sub>濃度を蓄積したデータベースから、現在の流入NH<sub>4</sub>濃度の変動を解析し、数時間後の水質を予測する。図9に下水処理場の流入NH<sub>4</sub>濃度変動<sup>③</sup>をこのAIで予測した結果を示す。1時間先、2時間先の予測値はともに実測値と良く一致しており、晴天時の流入NH<sub>4</sub>濃度変動は約10%の誤差で予測できた。

このAIが予測した流入NH<sub>4</sub>濃度に基づいてFF制御を実施することで、流入負荷の変動に対する曝気量制御の追従性を更に向上させることができる。具体的には、流入NH<sub>4</sub>濃度の減少が予測される場合には、前もって曝気量を減少させるように制御することで、曝気量の更なる削減が可能になる。

#### 4. むすび

反応槽へ流入するNH<sub>4</sub>濃度に比例するFF制御と反応槽出口のNH<sub>4</sub>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、流入負荷の変動に対して、目標にする処理水質に安定して制御できることを示した。また、これによって過剰な曝気量を削減する効果が得られることを確認した。さらに、当社AI技術Maisartによって晴天時の流入NH<sub>4</sub>濃度を約10%の誤差で予測できた。

この制御技術を適用した曝気量制御装置は、今後実プラントでの実証を行い、2020年度を目途に製品化する予定である。処理水質を確保しつつ省エネルギーに寄与するこの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29年度版下水道統計，日本下水道協会(2019)
- (2) 味埜 俊：活性汚泥モデル：ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3, 環境新聞社，21~72 (2005)
- (3) 東京都下水道局技術調査年報，40，77~87 (2016)