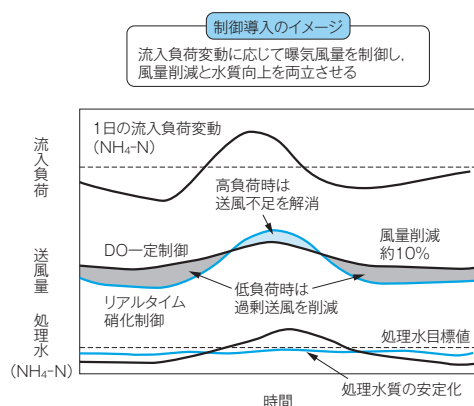


活性汚泥モデルを活用したリアルタイム硝化制御

宮原盛雄 Morio Miyahara
中田昌幸 Masayuki Nakata
豊岡和宏 Kazuhiro Toyooka
高倉正佳 Masayoshi Takakura

キーワード 活性汚泥モデル, 硝化制御, 送風量削減, 水質改善, アンモニア性窒素の連続計測

概要



リアルタイム硝化制御導入イメージ

下水の生物処理過程は水質改善のため、曝気に伴う多くの電力が消費されている。この背景から、水質改善と省エネルギーを両立できる新しい送風制御技術の開発が求められている。

本研究では、活性汚泥モデルを利用した「リアルタイム硝化制御」による送風制御について検討し、目標水質の達成に必要な送風量をフィードフォワード的に制御する技術の確立を目指した。

冬季における実施の制御実験では、晴天時のDO一定制御に比べて送気倍率が約10%低減された。また、雨天時の初期降雨による流入水質や水温の変動に対しても目標水質が安定して達成された。これらの結果は、水質改善と省エネルギーを両立できる有用な技術であることを示している。

1 まえがき

活性汚泥法は発明されてから100年以上の歴史を持ち、その原理は現在も下水処理の軸を担っている。同処理方法は、反応槽内の活性汚泥を曝気することで、微生物の酸素呼吸による有機物の分解やアンモニア性窒素(NH₄-N)の硝化を促し、汚水を処理する優れた処理方法である。しかし、微生物の代謝活動維持のため多大な空気を要し、送風にかかる消費電力は、下水道施設におけるその約23%を占める⁽¹⁾。

下水処理では、必要な空気を反応槽へ供給している送風機が多く電力を消費している。これは、有機物除去やNH₄-Nの硝化のために一定の空気量が必要となるからである。そして、送風量を削減することで電力使用量を低減できるが、過度な削減は処理水質の低下を引き起こす。このように、水質の改

善と電力使用量の削減はトレードオフの関係となる。そして、それをバランス良く両立させることが大きな課題であり、これを解決できる技術の開発が求められている⁽²⁾。具体的には、流入する汚濁負荷量に応じて必要となる空気量を制御し、適切な水処理と送風量削減を両立できる新しい送風制御技術である。

現在、送風制御には反応槽末端の溶存酸素濃度(DO)を一定に保つDO一定制御が広く用いられている。しかし、これは反応槽末端のDO値に基づき送風量を制御するフィードバック制御である。そのため、流入汚濁負荷量の変動に対して遅れが生じ、低負荷時には過剰な送風によるエネルギーロス、高負荷時には送風不足による水質悪化を招くおそれがある。流入負荷量の変動に追従し、生物処理に必要な空気量を送風する制御手法として、以下の二つの技術が挙げられる。

- (1) 流入負荷量の計測
- (2) 処理に必要な送風量を計算し、送風量をフィードフォワード的に変動させる技術

水質改善と省エネルギーの両立を更に進めていくためには、より高度な送風制御技術が必要となる。特に下水処理場で行っている硝化促進運転では、硝化を適切に進行させるために、流入する $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を把握しその硝化に必要な送風量を決定して送風することが重要となる。(1)については、センサによる反応槽流入水の $\text{NH}_4\text{-N}$ の連続測定が必要であるが、流入水における電極式アンモニア計（以下、アンモニア計）の長期安定性の検証は行われていない。(2)については、流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ を基に流下方向の濃度変化を考慮しながら、硝化に適切な空気量を推定する必要がある。現在、実施設での適用例が報告されている流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を用いた制御システムは、ファジー制御⁽³⁾⁽⁴⁾や処理特性モデル（実際の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の処理量と送風量と関係を用いたモデル）によって補正を行う制御⁽⁵⁾などが挙げられる。これらは、過去の処理状況を基に必要空気量を推定するもので、流入水質の急激な変動への対応や、流入水量・水温などの変化への対応が十分ではないおそれがある。また微生物反応モデルを用いることで、流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を基に必要空気量を推定できるが、当該モデルが送風制御へ適用された事例はほとんどない。

そこで本研究では、アンモニア計の性能検証とともに微生物反応モデルに国際水協会（IWA）が提唱する活性汚泥モデル（ASM：Activated Sludge Model）を採用し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の流入負荷量の測定とASMによる処理状況のシミュレーションを組み合わせ、目標水質を達成できる送風量を計算し、フィードフォワード的に送風量を制御する技術を開発した。この技術は流入負荷量の変動に即時に応答して硝化に必要な送風量を制御できることから、これを「リアルタイム硝化制御」と呼ぶこととした。具体的には、既存の下水処理施設で流入 $\text{NH}_4\text{-N}$ を測定するアンモニア計を設置し、その性能を評価した。また、ASMを利用した硝化制御用演算装置を設置し、既存の送風制御プロセスコントローラに接続して送

風制御を行い、リアルタイム硝化制御の制御性能、送風量削減効果及び水質改善効果を既存DO一定制御と比較検討した。

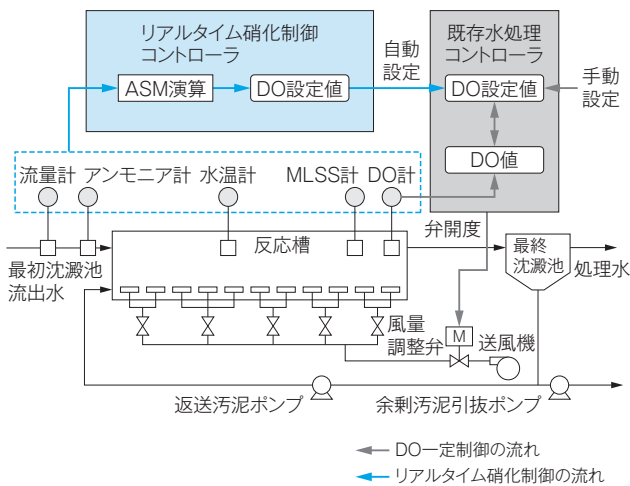
2 リアルタイム硝化制御

2.1 原理

ASMは、活性汚泥中の微生物の増殖反応を数学的に記述したものである。現在では活性汚泥プロセスにおける有機物・窒素・りん除去反応を記述するモデルの世界標準として、国際的にも認知されている⁽⁶⁾。ASMによって、処理水質・必要酸素量・余剰汚泥発生量などを推定できる。一方、ASMは複雑な反応モデルであり、これまでの汎用パーソナルコンピュータ（PC）などでは演算に長時間を要する欠点があった。そのため、ASMは反応槽の設計や運転条件の解析などに広く用いられているものの⁽⁷⁾⁻⁽¹³⁾、送風制御技術としての適用例はほとんどなく、適用例もASMの一部を利用するのみにとどまっている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。しかし、近年の計算機性能の向上で、市販のPCなどでもASMの演算を短時間で行えるようになった。

そこで本研究では、汎用PCを活用し、ASMの演算結果をリアルタイムで既存のDO一定制御に介入させることで、既存施設の大幅な改造を伴わずに容易かつ安価なコストで導入できる送風制御技術の開発を試みた。

ASMでは、シミュレーションを実施するために流入水の有機物分画が必要となる。有機物分画は、流入水中の有機物などASMで用いられる物質種を分類する指標であるが、これを現在実用化されている水質計器で行うことは困難である。一方、実際の下水処理施設では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化に視点を置いた運転実績がある。そこで本研究では、実用的な制御技術の構築の観点から、流入水の $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化に必要な送風量の制御に着目し、流入水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の連続測定と、ASMによるシミュレーションを組み合わせた制御技術（リアルタイム硝化制御）を検討した。**第1図**にリアルタイム硝化制御の構成図を示す。主な構成要素は反応槽の流入部に新たに



第1図 リアルタイム硝化制御構成図

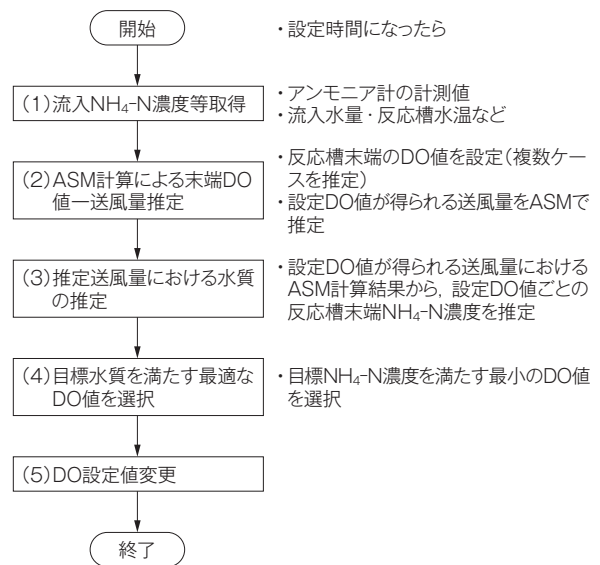
活性汚泥モデルシミュレーション (ASM) を用いた硝化制御フローを示す。

設置したアンモニア計とリアルタイム硝化制御コントローラ (演算用ノートPC) である。また、リアルタイム硝化制御コントローラで用いるASMモデルに実務レベルでの解析ツールとして利用実績が多いASM2d⁽⁶⁾⁽¹⁶⁾を採用した。また、シミュレーションシステムには当社製SIMWATER⁽¹⁷⁾を使用した。

2.2 制御フロー

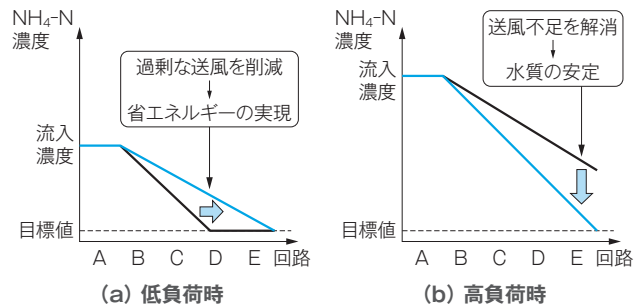
第2図にリアルタイム硝化制御の制御フロー (処理水質推定及びDO設定値決定の流れ) を示す。ASMを既存DO一定制御と組み合わせて用いる場合、ASMが複雑な反応モデルのため、目標処理水質を満たすDO設定値を直接求めることができない課題がある。そこで、NH₄-N流入負荷量に対して目標水質を満たすDO設定値を、以下の手順で決定した。

- (1) 流入NH₄-N濃度・流入水量・反応槽水温・MLSS濃度などを取得する。
- (2) これらの条件を基に、反応槽末端のDO値を複数ケース設定し、ASMを用いてそれぞれの反応槽末端DO値が得られる送風量をASMシミュレーションの反復計算によって求める。
- (3) 設定したDO値が得られる送風量におけるASMシミュレーション結果から、その送風量における反応槽末端のNH₄-N濃度が推定される。



第2図 リアルタイム硝化制御の制御フロー (処理水質推定及びDO設定値決定の流れ)

DO制御設定値を演算する際のフローチャートを示す。



第3図 リアルタイム硝化制御における処理概念

低負荷時には反応槽の途中で処理を終えている場合があるが、この場合は曝気風量が過多の可能性があるので、末端部までで処理が終わるよう曝気風量を下げる。一方、高負荷時に処理が終わらない場合には、曝気風量を増やして処理が終わるようにする。

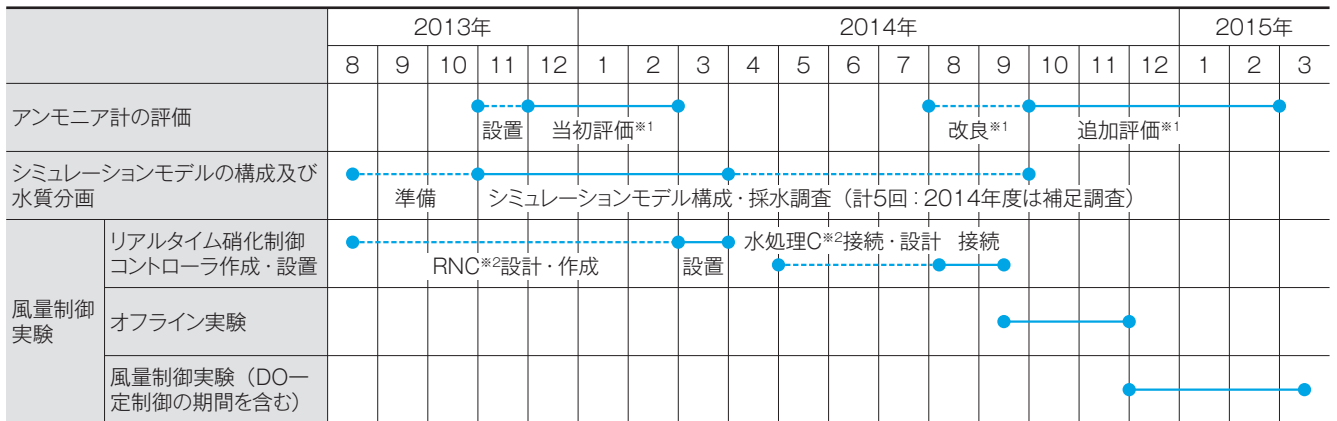
- (4) DO値ごとのNH₄-N濃度推定値と別途定めた反応槽末端での目標水質を比較し、目標水質を満たす最も低いDO値を決定する。
- (5) DO値を既存DO一定制御のDO設定値として更新する。

これにより、更新されたDO設定値に従った送風制御が行われ、NH₄-N流入負荷量の変動に応じて硝化に最適な処理条件を自動で設定するフィードフォワード的な制御が実現される。

第3図にリアルタイム硝化制御における処理の概念を示す。DO一定制御では、制御の目標値は過

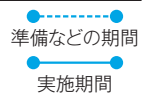
第1表 本研究における調査項目別の実施工程

本研究は、2013年8月12日～2015年3月20日にかけて実施した。



注. ※1. 当初評価、改良及び追加評価は、4.1項で詳細に説明する。

※2. 「RNC」はリアルタイム硝化制御コントローラ、「水処理C」は既設の水処理コントローラを指す。



去の経験を基に水量や水質の変動を考慮して安全側に設定される。そのため、流入NH₄-N濃度が低い場合や流入水量が少ない場合などの低負荷時では、反応槽の途中でNH₄-Nの硝化が終了し、それ以降の送風に無駄が生じる場合がある。しかし本制御では、流入水における流入負荷量の低下を検出しDO設定値を下げるため、処理水質を確保しつつ送風量を削減できる。

また、流入NH₄-N濃度が高い場合や降雨で流入水量が多くなった場合では、流入負荷量が短時間に増大するが、DO一定制御では流入水質・水量変動に対する制御の遅れが生じ、水質確保のための送風量が確保できないことがある。しかし、本制御では流入水における流入負荷量の増加を検出しDO設定値を上げるため、増加した負荷量に対応して処理水質を確保できる。

3 リアルタイム硝化制御のためのシミュレーションモデルの構築

3.1 実験施設と実験期間

リアルタイム硝化制御の実施設における実施試験は、合流式の処理場である東部第一下水道事務所砂町水再生センター東陽I系3-1号池（実験池及び対照池は同一）で実施した。3-1号池は疑似嫌気好

気法（疑似嫌気槽：A回路^(注1)、好気槽：B～E回路^(注1)）を採用し、反応槽容量は8443m³、水理学的滞留時間（HRT）は約8時間である。次実験期間は2013年8月12日～2015年3月20日とした。第1表に調査項目別の実施工程を示す。

3.2 ASMシミュレーションモデルの調整・評価

実施設でリアルタイム硝化制御を実施する前段階として、実験池の処理状況の把握、反応槽モデルの構築、ASMシミュレーションによる処理の再現、及び評価を行った。

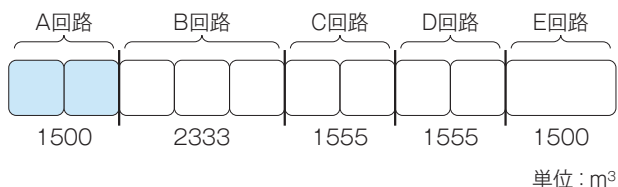
まず、ASMシミュレーションに使用する水質及び処理状況データを取得するため、対象池の反応槽流入水、A・B・C・D・E回路末端の水・終沈越流水・返送汚泥を水質調査した。採水は2013年11月～2014年9月の間に5回行い、各回とも13時・17時・9時は人手で採水し、21時・1時・5時は自動採水装置で採水した。特に反応槽流入水は、成分の詳細を決定するためにWERF法^(注)による反応槽流入水の有機物分画（以下、流入水分画）を行った。第2表に反応槽流入水分画データ（11月12日～13日）を示す。

次に、反応槽モデルを構築し、実験池の躯体構造を基に適合する槽列モデルを作成した。具体的には、実施設と同様に反応槽をA回路からE回路に分割

第2表 反応槽流入水分画データ (11月12日～13日)

ASMでは、シミュレーションを実施するために流入水の有機物分画（流入水中の有機物などのASM上で用いられる物質種へのふるい分け）が必要である。

名称	記号	値 (mg/L)
溶解性非生物分解性有機物	S _I	25
溶存酸素	SO ₂	0.1
窒素ガス	S _{N2}	0
発酵生成物	S _A	10
発酵可能な易分解性有機物	S _F	4
硝酸性窒素	SNO ₃	0
溶解性無機りん	SPO ₄	3
アンモニア性窒素	SNH ₄	15.5
アルカリ度	S _{ALK}	200
固形性生物非分解性有機物	X _I	10
遅分解性有機物	X _S	83.7
非ポリりん酸性従属栄養生物の総量	X _H	0
独立栄養微生物の総量	X _{ATU}	0
ポリりん酸従属栄養微生物の総量	X _{PAO}	0
ポリりん酸	X _{PP}	0
りん蓄積微生物の細胞内貯蔵物質	X _{PHA}	0
浮遊物質	X _{TSS}	82.275
金属水酸化物	X _{MeOH}	0
金属りん酸化物	X _{MeP}	0

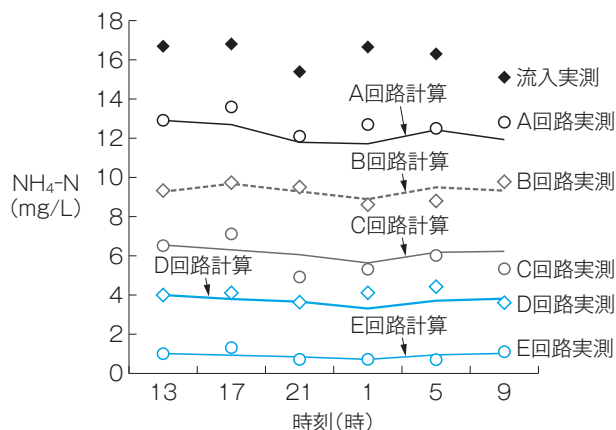


第4図 反応槽分割モデル及び容積

実施設ではA回路からE回路に分割し、各回路は1～3槽に分割した。

し、さらに容積比を考慮し各回路を1～3槽に分割した。第4図に反応槽分割モデル及び容積を示す。

これらの水質データと反応槽モデルによって、オフラインでリアルタイム硝化計算によるASMシミュレーションモデルの調整と評価を行った。得られた水質データの中で、晴天日の2013年11月12日～13日に実施した採水調査の結果でASMパラメータの設定を決定した。調整の流れは、流入水分画結果を用いてASMシミュレーションを行い、その結果を採水調査から得られた処理状況と比較し、ASMパラメータ（槽列モデルにおける各分割槽間

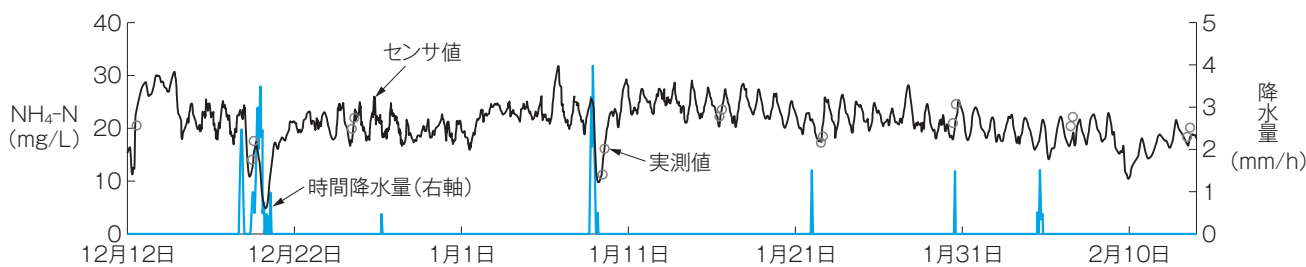


第5図 シミュレーション-実測値比較 (流入水及び各回路のNH₄-N濃度)

シミュレーション結果は各反応回路におけるNH₄-N濃度実測値とよく一致し、時系列の変化にもよく対応している。

の送風量配分、各分割槽のASM上の初期濃度)を検証する。また、各分割槽の送風量配分はライザー管の開度を基に、比較結果から調整を行い決定した。各分割槽初期濃度(第2表の全19種類)は各回路末端の水質実測値とシミュレーション結果との比較によって求めた。

第5図にシミュレーション-実測値比較(流入水及び各回路のNH₄-N濃度)を示す。本研究の制御対象であるNH₄-NのASMシミュレーション結果は、各反応回路における実測値とよく一致し、時系列の変化にも精度よく対応していた。なお、ASMシミュレーションによるNO₃-N濃度の計算値が実測値に対してやや低かったため、活性汚泥パラメータを調整した。具体的には、脱窒(窒素化合物を分子状窒素として大気中へ放散させる作用又は工程)に関連するパラメータであるKO₂.Hを典型値の0.20から0.05g-O₂/m³に変更した。KO₂.Hは従属栄養生物が行う脱窒反応が溶存酸素濃度によってどの程度阻害されるかを示し、従属栄養生物の溶存酸素濃度(SO₂)に対する飽和・阻害定数である。この値が大きい場合は溶存酸素濃度が高い状況でも脱窒が進行し、値が小さい場合は溶存酸素濃度が低い状況に限って脱窒が進行する。前述以外のパラメータ及び反応速度係数は、ASM2dの定める典型な例を使用した。



第6図 アンモニアセンサ計測値と手分析値のトレンドグラフ（当初評価期間）

センサ値は手分析値とおおむね一致しており、降雨によるNH₄-N濃度の増減に対しても良好な追従性を示している。

第3表 アンモニアセンサの評価における期間別の誤差・相関係数・決定係数

当初評価期間では誤差が平均1.9mg/L、誤差率が平均9.9%で、おおむね基準を満たしていた。精度低下時は誤差の平均が2.7mg/L、誤差率の平均が17%となり基準を満たさなかった。しかし、空気噴出しノズルの調整後の追加評価期間は誤差の平均が0.8mg/L、誤差率の平均が4.0%に改善され、基準を十分満たした。この時の、決定係数は0.880と実測値とよく一致するようになった。

	実測値の範囲 (mg/L)	誤差（絶対値）の 平均 (mg/L)	誤差率（絶対値） の平均 (%)	相関係数 R	決定係数 R ²
評価基準		(≤ 2.5)	(≤ 10)		
当初評価期間（3か月間：2013年12月～2014年2月）	11.2～24.7	1.9	9.9	0.825	0.680
精度低下時（1か月間：2014年3月）	11.3～20.1	2.7	17.0	0.428	0.184
追加評価期間（5か月間：2014年10月～2015年2月）	13.6～22.3	0.8	4.0	0.938	0.880

4 実施設での実証試験

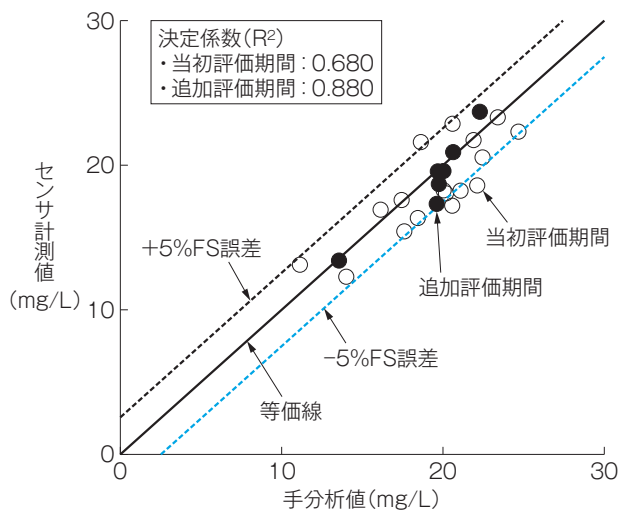
4.1 アンモニア計の評価

リアルタイム硝化制御は、反応槽の流入NH₄-N値を連続測定しながら制御する。実施設での制御実験の実施に伴い、アンモニア計の精度を評価した。使用したアンモニア計（イオン電極式、HACH社製NH₄Dsc）の仕様測定範囲は0.2～1000mg/Lであるが、3-1号池の流入NH₄-N濃度を考慮し、測定範囲を0.2～50.0mg/Lとした。アンモニア計には空気ノズルが設置され、これに間欠的に空気を計器に吹き付けることで電極表面の汚れが洗浄される。

第6図にアンモニアセンサ計測値と手分析値のトレンドグラフ（当初評価期間）を示す。実験反応槽の流入部に電極式アンモニア計を設置し、2013年12月から2014年2月までアンモニア計を性能評価した。評価期間中、精度を比較するためにアンモニア計設置箇所では反応槽流入水を採水した。現場で採水試料を孔径0.45μmのディスクフィルタ（アドバンテック東洋株製DISMICフィルタ、親水性PTFE〈4フッ化エチレン樹脂膜〉）で固液分離し、ろ液をバイアル瓶に保管した。イオンクロマトグラフ(IC)

で、ろ液中のNH₄-N濃度及び硝酸性窒素(NO₃-N)濃度を分析した。その結果、センサ値は手分析値とおおむね一致しており、降雨によるNH₄-N濃度の増減に対しても良好な追従性を示した。しかし、3か月終了時点で、電極表面への汚れの付着によってセンサ値と実測値との乖離が発生するようになった。そこで、間欠洗浄のための空気吹き出しノズルの位置と吹き出し方向を調整し、追加検証を行った。

第3表にアンモニアセンサの評価における期間別の誤差・相関係数・決定係数を示す。アンモニア計の性能評価には法定の基準がないため、総量規制用の窒素・りん自動計測器の性能基準⁹⁾を準用し、ICによる実測値とアンモニア計の測定値の誤差がフルスケールの±5%以内もしくは誤差率が10%以内であるかどうかを検証した。第7図に当初評価期間（実測値との乖離発生前）と追加評価期間（空気吹き出しノズル調整後）におけるアンモニアセンサ計測値と手分析値の比較を示す。当初評価期間では誤差が平均1.9mg/L、誤差率が平均9.9%で、個別の測定値もフルスケール（50mg/L）の±5%値（±2.5mg/L）の範囲におおむね収まっており、基準を満たしていた。精度低下時は誤差の平均が



第7図 アンモニアセンサ計測値と手分析値の比較

センサ計測値とイオンクロマトによる手分析値の相関を示す。白丸は当初評価期間を示し、黒丸は追加評価期間（空気噴出しノズルの調整後）を示す。個別の測定値はフルスケール（50mg/L）の±5%値（±2.5mg/L）の範囲内に収まっている。

2.7mg/L、誤差率の平均が17%となり基準を満たさなかった。しかし、空気吹き出しノズルの調整後の追加評価期間は、誤差及び誤差率ともに大幅に減少し、誤差の平均が0.8mg/L、誤差率の平均が4.0%となり、基準を十分満たした。この時の決定係数は0.880であり、実測値とよく一致するようになった。以上の結果から、アンモニア計を用いた初沈流入水の連続測定は可能であると評価した。

4.2 リアルタイム硝化制御実験

4.2.1 実施設におけるASMシミュレーションシステムの事前調整

ASMシミュレーションモデルとアンモニア計を用い、実施設におけるリアルタイム硝化制御による送風制御実験を行った。

ASMシミュレーションモデルを実施設の現状の処理状況に合わせるために、実験開始直前にASMシミュレーションモデルの反応槽内の物質収支を調整した。具体的には、制御実験前日の計器測定値（ $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度・流入水量・返送汚泥量）とASM上の各分割槽の風量配分及び初期濃度を用いてASMシミュレーションを行った。この時、MLSS濃度及び反応槽末端の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が、前日の平均値もし

くは実測値と一致するように、ASMシミュレーション上の余剰汚泥引抜量とASMパラメータである KNH_4A （硝化細菌の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度〈 SNH_4 〉に対する飽和・阻害定数）を調整した。物質収支の調整によって変更された各分割槽の初期濃度を制御実験に用いることで、制御実験時のMLSS濃度の影響をリアルタイム硝化制御に反映した。

制御時にDO設定値を決定する計算では、上記の物質収支の調整による各分割槽初期濃度と、流入水の計器測定値（ $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度・流入水量・返送汚泥量・水温）を用いてASMシミュレーションを行った反応槽末端のDO濃度を1.0～5.0mg/Lまでの範囲で0.5mg/L刻みとした合計9条件を設定し、反応槽末端でそのDO濃度が得られる送風量を求め、その送風量における反応槽末端（E回路）での $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を計算し、目標水質である1.0mg/L未満を満たす最小のDO値を実際に送風制御に用いるDO設定値とした。なお、使用したノートPC（CPU：Intel Core i5 2.6GHz使用）では、合計9条件の計算に約3分30秒を要した。

風量制御実験の実施に当たっては、前述の制御プロセスを行うリアルタイム硝化制御コントローラの動作確認及びモデル調整のためのオフライン実験と、実際の反応槽で送風制御を行う送風制御実験（オンライン実験）の二段階で検証した。

4.2.2 送風制御実験①—オフラインでの検証

オフライン実験では、リアルタイム硝化制御コントローラの動作確認及びモデル調整を実施した。活性汚泥モデルを用いた水質計算、リアルタイム硝化制御コントローラの設定及び制御関連ソフトウェアの動作確認及びモデル調整、リアルタイム硝化制御コントローラからのDO設定値が水処理上適切な範囲に収まるかを検証した。なお、本実験におけるDO設定値の更新は1時間ごととした。

検証では、リアルタイム硝化制御コントローラ上の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の計算結果が実測値よりやや高かった。この結果から、活性汚泥モデルのパラメータのうち KNH_4A を典型値の1.0から0.4gN/m³に変更した。これにより、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度計算結果と実測値が良く一致するようになった。 KNH_4A は硝化細菌

第 4 表 リアルタイム硝化制御による送風制御実験期間

リアルタイム硝化制御による送風制御実験の実施期間

実験期間	時間 (h)
2014年 12月 4日 9時30分～15時30分	6
2014年 12月 11日 9時30分～16時30分	7
2015年 1月 21日 9時30分～1月22日 13時	27.5
2015年 2月 4日 9時30分～2月 5日 13時30分	28
2015年 2月 17日 9時30分～2月 19日 8時30分	47
2015年 2月 24日 9時30分～2月 26日 13時30分	52
2015年 3月 9日 9時30分～3月 12日 13時30分	76

の増殖に関連するパラメータであり、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が低濃度の状況における硝化の進行に参与している。このパラメータ調整によって、晴天時及び雨天時に流入負荷量の変動に追従し、正常な範囲での最適と考えられるDO設定値を示すようにリアルタイム硝化制御コントローラを調整した。

4.2.3 送風制御実験②—オンラインでの検証

第 4 表にリアルタイム硝化制御による送風制御実験期間を示す。DO設定値は、反応槽内における微生物の安定と該当する機器（主に送風ブロアと風調弁）への安全性を考慮し、上下限值を設定した。なお、本実験におけるDO設定値の更新は、実験反応槽でのDO設定値の変更への追従が約10分で完了することが確認できたため、30分ごととした。

送風制御実験では、まず制御の安定性を2回の6時間制御実験（12月実施）で確認した後、送風量削減効果と水質改善効果を28～76時間の連続制御実験で検証した。

(1) リアルタイム硝化制御による送風制御の安定性
6時間程度の日中試験（**第 4 表**）の結果では、リアルタイム硝化制御実施時に通信の断絶や制御のトラブルは発生せず、導入・接続した制御設備やソフトウェアが問題なく稼働していた。また、実験反応槽でASMを用いたリアルタイム硝化制御でのDO変動制御によって、流入負荷量の変動に応じたフィードフォワード的な制御ができることを確認した。さらに28～76時間の連続実験でも、DO設定値の変更に対し実測DO濃度はよく追従しており、安定的な送風制御を確認した。

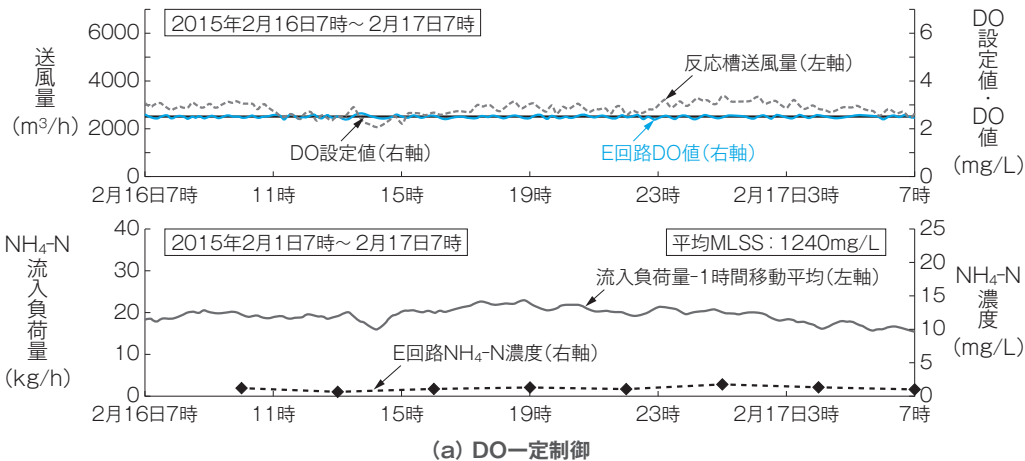
第 8 図に晴天時のDO一定制御とリアルタイム

硝化制御の運転と処理水質の比較を示す。評価期間中の制御実績を一例としたDO一定制御時（2月16日7時～17日7時）及びリアルタイム硝化制御時（2月4日10時～5日10時）のトレンドグラフである。図中には評価期間中の平均MLSS濃度及びASMシミュレーションに使用したE回路における微生物分画の代表例（ $X_H \cdot X_{AUT} \cdot X_{TSS}$ ）も示した。DO一定制御（**第 8 図 (a)**）ではDO設定値2.5mg/Lで一定しているのに対し、リアルタイム硝化制御（**第 8 図 (b)**）では、DO設定値は流入水の負荷変動に合わせて2.0～3.0mg/Lの範囲で変動し、設定値の変更に対して実測DO濃度の追従性は高く、およそ10分以内に設定値とほぼ同値となった。またリアルタイム硝化制御では、反応槽流出水質の測定結果から同程度の $\text{NH}_4\text{-N}$ 流入負荷量（約20kg/h）に対し、DO一定制御と同等に安定的な処理水質が維持されていた。

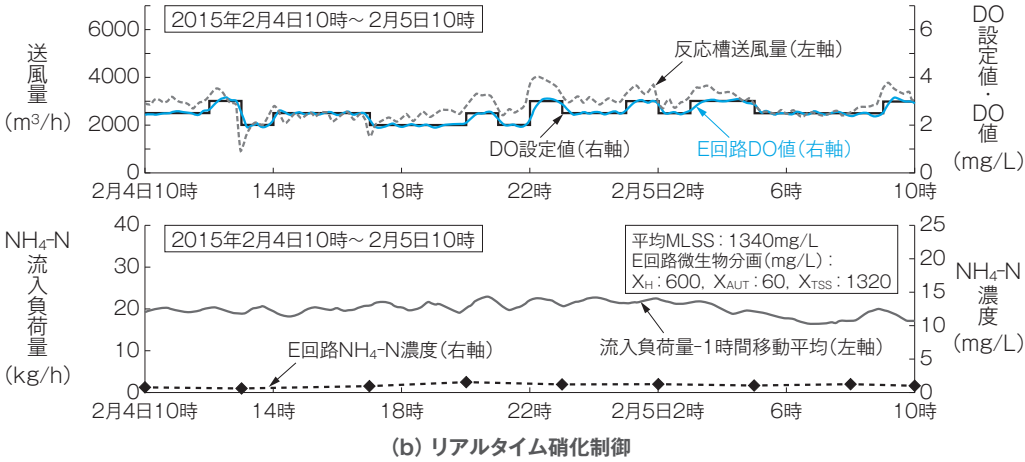
(2) リアルタイム硝化制御による送風量削減効果

リアルタイム硝化制御による送風量削減効果を検証するため、2014年1月6日～3月12日までの実験期間に、水質の変動が少ない晴天日の反応槽送風量を比較検証した。データは、①10時～翌日10時を一日分データとし、②降雨日を除外、③反応槽流出 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が1.0mg/L未満（砂町水再生センター日常試験結果より）を条件として抽出した。**第 5 表**にDO一定制御下の抽出データを、**第 6 表**にリアルタイム硝化制御下の抽出データを、**第 7 表**に反応槽送風量の比較を示す。期間中の反応槽送風量平均値は、リアルタイム硝化制御がDO一定制御に対して約4.5%の削減となった。同期間における流入水量・ $\text{NH}_4\text{-N}$ 流入負荷量を比較すると、リアルタイム硝化制御時に流入水量が5.9%増、流入負荷量が3.4%増であった。この流入水量・ $\text{NH}_4\text{-N}$ 流入負荷量の差を考慮して送風量を比較した場合、流入水量に対する送気倍率で約10%、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 流入負荷量に対する送気倍率で約7.5%の削減となった。

以上の結果から、晴天日には流入量及び流入水質が同等であれば、リアルタイム硝化制御によって送風量の削減を図れる可能性があると考えられた。なお、今回の比較は冬期のデータに基づいているが、



(a) DO一定制御



(b) リアルタイム硝化制御

第8図 晴天時のDO一定制御とリアルタイム硝化制御の運転と処理水質の比較

DO一定制御ではE回路のDO値が一定であるのに対し((a)の青線),リアルタイム硝化制御では,E回路のDO値は流入水の負荷変動に合わせて変動している((b)の青線)。リアルタイム硝化制御は,設定値((b)の黒線)の変更に対して実測DO濃度の追従性は高く,およそ10分以内に設定値とほぼ同値となった。また,同程度のNH₄-N流入負荷量(約20kg/h)に対し,リアルタイム硝化制御はDO一定制御と同等の安定的な処理水質を維持していた。

第5表 反応槽送風量:DO一定制御

DO一定制御下の反応槽送風量抽出データを示す。

日付	処理水 NH ₄ -N (mg/L)	送風量 (m ³ /h)	流入量 (m ³ /h)	NH ₄ -N 負荷量 (kg/h)
1月 7日~ 8日	0.0	3278	932	22.9
1月 9日~ 10日	0.2	2199	576	16.2
1月 13日~ 14日	0.3	2832	746	17.9
1月 14日~ 15日	0.6	3044	750	18.4
1月 19日~ 20日	0.3	3043	887	21.2
1月 26日~ 27日	0.4	3013	1022	21.3
1月 29日~ 30日	0.6	3252	1003	20.8
2月 2日~ 3日	0.1	2628	814	17.4
2月 3日~ 4日	0.3	2402	810	17.9
2月 6日~ 7日	0.6	3033	1044	20.9
2月 12日~ 13日	0.1	2907	803	19.4
2月 13日~ 14日	0.0	3210	849	20.5
2月 16日~ 17日	0.4	2728	781	18.9
2月 27日~ 28日	0.0	2606	936	20.9
3月 6日~ 7日	0.3	2971	1099	24.5
平均	0.3	2876	864	19.9

第6表 反応槽送風量:リアルタイム制御

リアルタイム制御下の反応槽送風量抽出データを示す。

日付	処理水 NH ₄ -N (mg/L)	送風量 (m ³ /h)	流入量 (m ³ /h)	NH ₄ -N 負荷量 (kg/h)
1月 21日~ 22日	0.0	2445	908	19.2
2月 4日~ 5日	0.0	2821	894	20.1
2月 17日~ 18日	0.0	2648	817	18.6
2月 25日~ 26日	0.0	2965	907	21.1
3月 11日~ 12日	0.0	2856	1046	24.2
平均	0.0	2747	915	20.6

夏期には水温上昇に伴い硝化の状況が変わるため,夏期を含んだ長期間の送風量削減効果についても今後検証を進める。

(3) リアルタイム硝化制御による水質改善の効果
リアルタイム硝化制御による水質改善効果を検証す

第7表 反応槽風量の比較結果

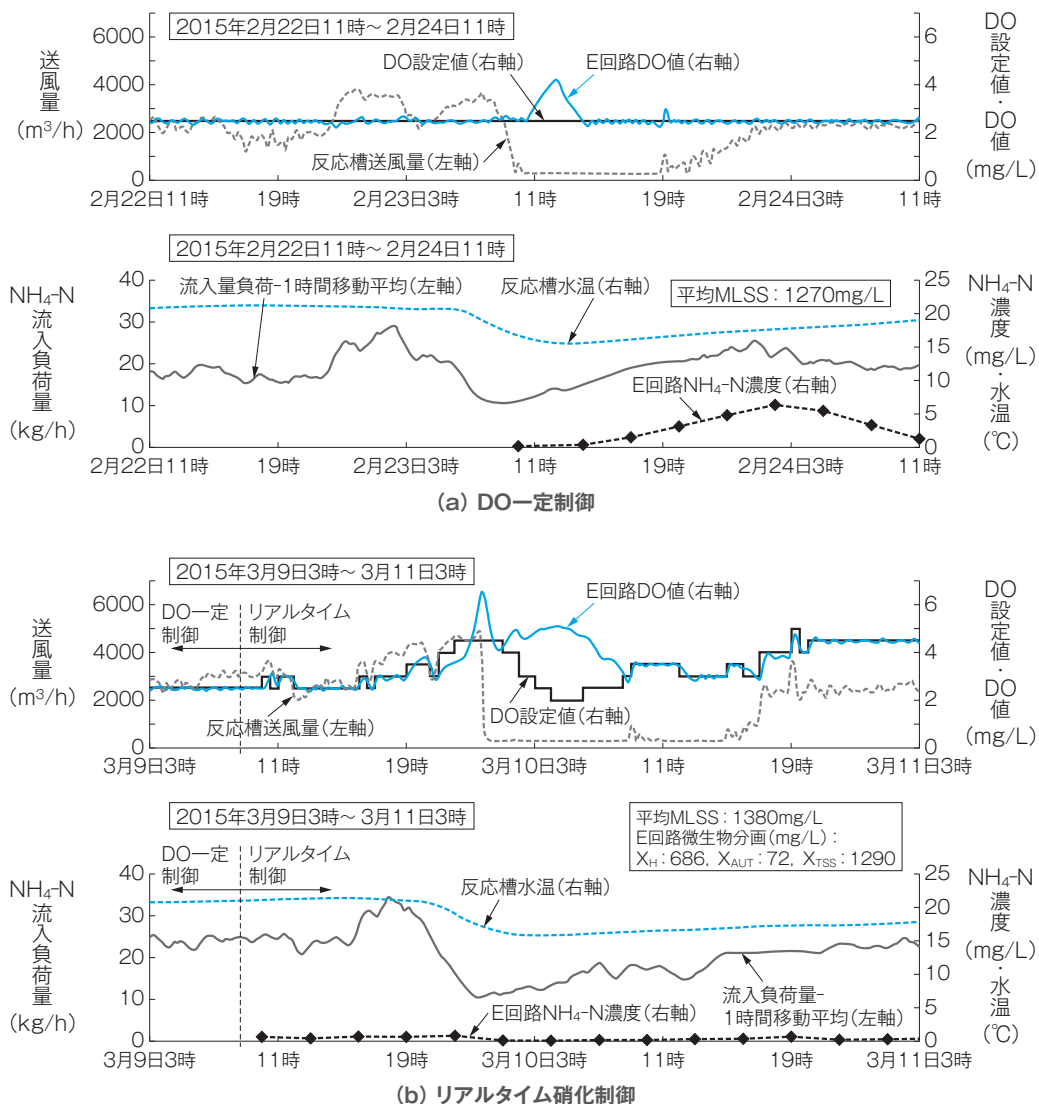
期間中の反応槽送風量平均値は、リアルタイム硝化制御がDO一定制御に対して約4.5%の削減となった。また、流入水量又はNH₄-N流入負荷量を考慮して送風量を比較した場合、流入水量に対する送気倍率で約10%、NH₄-N流入負荷量に対する送気倍率で約7.5%の削減となり、リアルタイム制御による風量削減効果を確認した。

比較項目	DO一定制御に対する比(%)※1
送風量	-4.5
流入水量	5.9
流入負荷量	3.4
送気倍率(流入水量)	-10.4
送気倍率(NH ₄ -N流入負荷量)	-7.5

注. ※1. マイナスの値は削減を意味する。

るため、実験期間中のNH₄-N流入負荷量が大きく変動する雨天時でのDO一定制御の結果(2月22日11時~24日11時)及びリアルタイム硝化制御の結果(3月9日3時~11日3時)の比較検討を行った。

第9図に雨天時のDO一定制御とリアルタイム硝化制御の運転と処理水質の比較を示す。評価期間中の平均MLSS濃度及びASMシミュレーションに使用したE回路における微生物分画の代表例(X_H・X_{AUT}・X_{TSS})も図中に示している。DO一定制御では降雨の持ち込み溶存酸素によるDO値の上昇



第9図 雨天時のDO一定制御とリアルタイム硝化制御の運転と処理水質の比較

DO一定制御時の反応槽流出水のNH₄-N濃度((a)の黒点線)は、2月24日2時頃5.3mg/Lまで上昇した。これは反応槽水温の低下((a)の青点線)によって硝化速度も低下したことを示している。一方、同様の状況下でリアルタイム硝化制御は、DO値を上昇させたため反応槽流出水のNH₄-N濃度((b)の黒点線)が上昇することなく1.0mg/L未満に維持された。これは反応槽水温の低下((b)の青点線)による硝化速度の低下を見込み、DO設定値を上昇させて水質悪化に対処したことを示している。

(2月23日12時付近)を除き、DO値はおおむね設定値である2.5mg/Lを示している。一方、リアルタイム硝化制御では、降雨の影響によるNH₄-N流入負荷量の増加(3月9日19時以降)に合わせDO値を上昇させた(最大4.5mg/L)。その後、降雨の持ち込みDOによって送風量が最低となり(3月10日0時以降)DO設定値とDO値が乖離した。そして、降雨の影響からの回復過程(3月10日15時以降)では、DO値を上昇(最大5.0mg/L)させる制御となった。これはNH₄-N流入負荷量の上昇と雨水流入によって低下した水温による硝化速度の低下を見込んでいる。具体的には、反応槽流出水のNH₄-N濃度は、DO一定制御時(第9図(a))では2月24日2時付近で、反応槽水温低下による硝化速度の低下によって5.3mg/Lまで上昇した。一方、リアルタイム硝化制御時(第9図(b))では、反応槽水温の低下から引き起こされる硝化速度の低下を見込みDO値を上昇させたため、NH₄-N流出濃度が1.0mg/L未満に維持された。またリアルタイム硝化制御では、流入NH₄-N負荷量の増加に対応してDO設定値を変動させたことで、期間の平均DO設定値が2.5mg/Lよりも高くなり送風量は増大する結果となった。

DO一定制御におけるフィードバック制御では、処理が終わった後の反応槽末端におけるDO値によって送風量を決定している。一方、リアルタイム硝化制御は、流入負荷量の変動に応じてフィードフォワード的にDO設定値の変更にてDO値を変動させることによって、処理水のNH₄-N濃度を一定に保つことを確認できた。特に、冬期の雨天時流入水に起因する水温低下によって硝化速度が低下するような今回の事例では、冬季の水質安定性の低下防止に寄与できる結果が得られ、更なる調査研究を進める必要性を再確認した。

5 むすび

本研究は、リアルタイム硝化制御による送風制御技術を実施設で検証したものである。この制御は、流入水質をアンモニア計で連続測定して流入負荷量を求め、反応槽内の処理状況を標準的な活性汚泥モ

デルであるASM2dからシミュレートし、反応槽内で硝化反応に必要なDO設定値をフィードフォワード的に定め、既設のDO制御に介入させるものである。これを検証した結果、アンモニア計の長期安定性を確認できたほか、この制御によって、晴天時では対流入量送気倍率を10%削減でき、雨天時では処理水質の改善を図ることができた。

本制御技術は汎用のソフトと市販PCを活用したもので、容易かつ安価で導入できるシステムである。さらに反応槽内の生物処理挙動をシミュレートしていることから、槽列などのモデルの変更が容易で、他の処理場及び処理法への適用性も高い。

現在、下水処理場では放流水質の高度化を図るため、施設の再構築や新たな処理技術の開発を進めているが、これらの推進には多くの時間と費用が必要である。そのため、現状の施設を生かしながら、早期にできる限りの水質改善と省エネルギーの両立を図るために本制御技術は有効である。

今後は、夏季を含むより長期間にわたる調査を実施するとともに、本制御システムのメリットを整理・標準化し、既存の下水処理場でも活用できる製品として展開していく。

- ・本研究は、東京都下水道局からの業務委託を実施して得られた成果である。
- ・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

(注記)

注1. 実験施設では反応槽内の区画を「回路」と呼んでいるため、施設の呼称に合わせ「回路」を用いた。

《参考文献》

- (1) 国土交通省：「下水道分野における地球温暖化対策について」、2007 (Available at : <http://www.mlit.go.jp/singikai/infra/kankyou/6/images/05.pdf>.)
- (2) 渡辺志津男・小田扇浩・野本睦志・坂巻伸一：「東京都における水質改善と省エネルギーの両立に関する考察」, 下水道協会誌論文集50, pp.108-113, 2013
- (3) Meyer, U. & Pöpel, H. J.: "Fuzzy-control for improved nitrogen removal and energy saving in WWT-plants with pre-denitrification," Water Sci. Technol. 47, pp.69-76, 2003
- (4) Åmand, L., Olsson, G. & Carlsson, B.: "Aeration control-a review," Water Sci. Technol. 67, p.2374, 2013

- (5) 後藤正広・山野井一郎・大塚真之・花本陽介・木村裕哉・井坂和一：「下水・排水の制御技術・高度処理プロセス・次世代型システム」, 日立総論97, pp.462-463, 2015
- (6) 味埜俊監 訳：「活性汚泥モデル」, 環境新聞社, 2005
- (7) 後藤浩之・佐藤茂雄・豊岡和宏・大石亮・沢井賢司・出口達也・中沢均・橋本敏一・糸川浩紀：「活性汚泥モデルを利用した高度処理施設の合理的な設計・運転手法の開発」, 環境システム計測制御学会誌7, pp.66-68, 2002
- (8) 糸川浩紀・村上孝雄：「実下水処理場における流入水有機成分の変動実態およびそれが活性汚泥モデルシミュレーションに与える影響」, 環境工学研究論文集41, pp.547-557, 2004
- (9) 河合富貴子・中沢親志・福山良和・上野隆史：「IWA活性汚泥モデルを用いた曝気風量制御における安定性評価」, pp.2-3, pp.45-48, 2006
- (10) 山野井一郎・上門卓矢・武本剛・田所秀之：「活性汚泥モデルに準拠したN₂Oガス生成モデルの開発」, 下水道協会誌論文集48, pp.65-74, 2011
- (11) 片山尚樹・伊熊信男・浅野卓哉：「活性汚泥モデルの構築と活用について」, 横浜市環境科学研究所所報32, pp.120-129, 2008
- (12) 阿部真由美・工藤和正・落修一：「活性汚泥モデルの利活用に関する研究」, 環境システム計測学会誌15, pp.59-66, 2010
- (13) 山中理・小原卓巳・川本直樹・山本浩嗣・萩原大揮・江口義樹：「風量削減と窒素除去の両立を図る曝気風量制御の実プロセスへの適用」, 環境システム計測制御学会誌18, pp.14-22, 2013
- (14) A. Thornton, N. Sunner, M. Haeck.: "Real time control for reduced aeration and chemical consumption: a full scale study," Water Sci. Technol. 61, pp.2169-2175, 2010
- (15) N. Sunner, M. Haeck, A. T.: "UK Experiences of Full Scale Activated Sludge Real Time Control Systems," Proceedings of the Water Environment Federation (ed. WEFTEC) 71-80, pp.5570-5588, 2012
- (16) (財)下水道新技術推進機構：「活性汚泥モデル利活用マニュアル」, 2010

- (17) 大石亮・後藤浩之・豊岡和宏：「下水処理プロセスシミュレータSIMWATER」, 明電時報310号, pp.19-23, 2006
- (18) Melcer, H.: "Modelling, Methods for Wastewater Characterization in Activated Sludge," IWA Publishing, 2004
- (19) 環境省 大気環境局：「窒素・りん自動計測器による水質汚濁負荷量測定方法マニュアル」, 2007

《執筆者紹介》



宮原盛雄
Morio Miyahara

水インフラシステム事業部戦略企画部
リアルタイム硝化制御の開発に従事



中田昌幸
Masayuki Nakata

水インフラシステム事業部戦略企画部
リアルタイム硝化制御の開発に従事



豊岡和宏
Kazuhiro Toyooka

水インフラシステム事業部戦略企画部
水処理関連技術・製品の企画開発に従事



高倉正佳
Masayoshi Takakura

ICT統括本部企画部
リアルタイム硝化制御の開発に従事