

3-1-4 最終沈殿池の脱窒汚泥浮上に対する

新たな運転管理手法を活用した取組について

中部下水道事務所 芝浦水再生センター 水質管理担当 笹田 良介
島田 祐介
内海 精司
松縄 愛
山本 央
前保 竜一

(現 西部第一下水道事務所 落合水再生センター)

東藤 義洋

(現 施設管理部 環境管理課)

1. はじめに

東京都心部に位置する芝浦水再生センター(以下、「当センター」)は処理区内の再開発に伴う人口増加によって流入負荷が上昇している。また、処理区域が千代田・中央・港・渋谷区を主としたオフィスや商業施設集積エリアのため、昼夜間人口比率が高く水量変動が大きい特徴を持つ。こうした背景から、窒素処理が進みにくく、年間を通じた硝化促進運転が困難であった。そこで2018年度に水質管理方針¹⁾を策定し、年間工事計画の調整や運転管理指標に基づく水質管理を行い、一年を通じての硝化促進運転を実現した。その一方、新たな課題として最終沈殿池(以下、「終沈」)での脱窒汚泥浮上(以下、「浮上」)が発生した。浮上は当センター深槽東西系の終沈で発生し、2018年度で透視度60以下の日数が、深槽東系終沈では年間約10日、深槽西系終沈では年間約30日確認された。浮上により活性汚泥が流出すると放流基準値の超過の恐れがあるため、浮上回数の多かった深槽西系を調査対象として、終沈での浮上抑制を目的に、実態把握、発生原因の確認、運転対応策の検討を行い一定の効果が得られたのでその取組について報告する。

2. 処理施設の概要

当センターの水処理は本系(浅槽系、深槽東西系)、西系及び東系に大別される(図1)。当センターは流入水量の変動幅が日平均値に対して0.5~2倍と大きいことに加え、高水温期であっても高負荷時にNH₄-Nが残存する。硝化の促進に伴い、深槽東西系の終沈で浮上が確認され、特に深槽西系(①)の終沈(②)で顕著となった。2018年度の運転実績を示す(表1)。深槽西系の処理方式は擬似A₂O法で、標準法の施設を改造し、嫌気・無酸素部と攪拌機、硝化液循環ポンプを整備した施設である。



図1 芝浦水再生センター平面図

また、当センターは汚泥処理施設を持たず、森ヶ崎水再生センターの汚泥処理施設に送泥している。その際、送泥まで一時的に汚泥を貯留する汚泥貯留槽は、初沈、終沈、高速ろ過で併用していることから、余剰汚泥の引抜量が制限され終沈に汚泥が堆積しやすい。加えて通年で硝化を促進するため、適宜硝化が良好な浅槽系の余剰汚泥を深槽東西系に転送している。

3. 脱窒汚泥浮上関連因子の探索

代表的な浮上時の運転状況を示す(図 2)。浮上(枠線内、透視度 60 以下)は朝 4 時頃から始まり、18 時頃まで継続していた。朝 4~8 時頃は終沈の流入水量が、日平均値 7,500m³/h の半分程度になるため、A-HRT の長期化によって、終沈流入水中における NO₃-N の上昇が推測された。また、返送汚泥率は 40% の設定だったが、朝 4~8 時頃は終沈の流入水量が少なく、返送汚泥量も少ない。その結果、朝方は終沈に汚泥が堆積しやすいと推測された。

以上を踏まえ、処理状況の確認を行った。浮上時の代表的な終沈流入水質の経時変化を示す(図 3)。NO₃-N は深夜 1~11 時にかけて 15mg/L 以上であり、特に A-HRT が長い朝方の時間帯は NO₃-N が 20mg/L 程度であった。

本結果を用いて、浮上時間帯における終沈流出水質を予測することとした。終沈流入水質は前日も同様の経時変化であったと仮定し、沈殿時間分ずらしたものを流出時間の水質とした。流出時間帯が重なるものは、水量をもとに流入水質を加重平均した(図 4: 枠線内は浮上時間帯)。本結果から、流出水の NO₃-N 濃度のトレンドを推定したところ、15mg/L 程度以上終沈で検出される時間帯と浮上時間帯が一致した。

以上のことから、終沈流入水中の NO₃-N と終沈の汚泥堆積量に焦点を当て、対策の検討を進めることとした。

表 1 2018 年度深槽西系の運転実績 (年平均)

	深槽西
処理方式	擬似A ₂ O法
日最大計画下水量 (m ³ /日)	120,000
処理水量 (m ³ /日)	138,040
HRT (時間)	8.8
A-HRT (時間)	6.6
BOD-SS負荷 (kg/kg/日)	0.19
MLSS (mg/L)	2,200
返送汚泥率 (%)	40
沈殿時間 (時間)	6.7

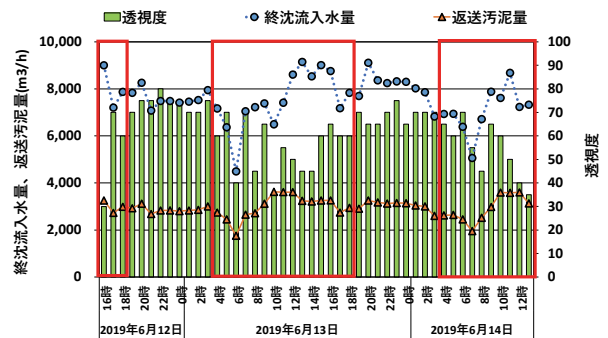


図 2 浮上時の運転状況

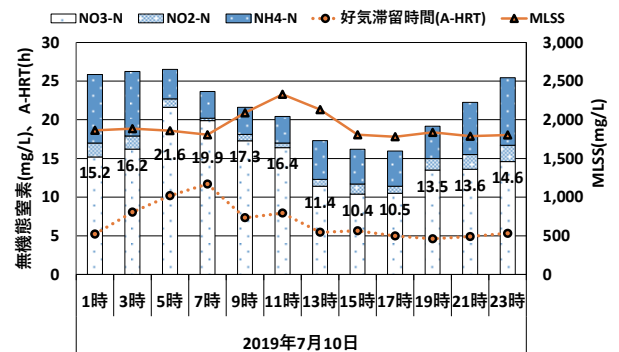


図 3 終沈流入水質の経時変化 (対策運転前)

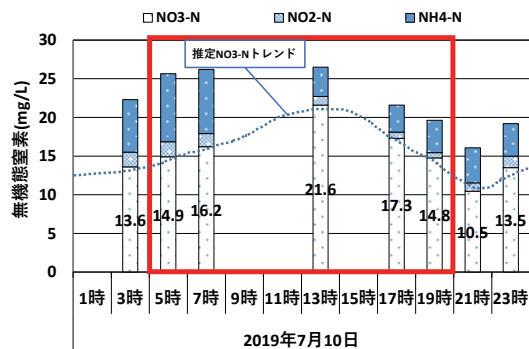


図 4 終沈流出水質の予想

4. 対策の検討

4.1 反応槽の運転管理

4.1.1 終沈流入水中の NO₃-N と溶解性有機物(S-COD)の影響

脱窒速度²⁾が大きいほど、浮上が発生しやすいと考えられたため、NO₃-N と S-COD の濃度条件を変え、脱窒速度を求めた(表 2: 2019 年 9 月 2 日)。MLSS は 1,700mg/L とし、実験開始 1~2 時間の平均脱窒速度は、NO₃-N と S-COD が高いほど概ね大きかった。しかし、表 2 の枠線内に示した当センターの終沈流入水質の範囲では、NO₃-N の高さと脱窒速度の大きさに明確な差は確認されなかった。

次に各条件で浮上試験を行った。試験では、深槽西系反応槽末端の混合液をふるい(75 μm)にかけ汚泥のみを回収し、500mL のフラスコに汚泥と NO₃-N、S-COD を調整した蒸留水を入れ、脱窒速度試験と同等の MLSS に調整し、室温(25℃)で浮上までの時間を 6 時間後まで確認した(表 3: 2019 年 9 月 18 日)。本結果から浮上は NO₃-N が 15mg/L 以上のときに発生しやすく、表 3 の枠線内に示した当センターの流入水質の範囲では、約 2.5 時間で浮上した。

表 2、表 3 より、実験条件であった MLSS が 1,700mg/L で、浮上するまでに脱窒した NO₃-N 濃度を計算した結果、概ね 6mg/L 程度になることから、この量が沈降汚泥を浮上させるための最低ガス生成量と推測された。一方、NO₃-N が 5~10mg/L の時に同様な傾向がみられなかった理由として、脱窒の進行に伴い基質が低下したことが一因と考えられた。

現在の深槽西系水処理状況では、脱窒によって NO₃-N を 15mg/L 程度以下に低減させることが困難なため、風量調整により NO₃-N の生成量を抑制する必要があると考えられた。

4.2 終沈の運転管理

4.2.1 汚泥界面について

返送汚泥量が少ない朝方の時間帯に、終沈に汚泥が堆積しやすいと推測されたため、汚泥堆積量を算出することとした。汚泥堆積量を求めるにあたり、まず終沈の汚泥界面を測定した。深槽西系終沈の諸元を示す(表 4)。全 6 池上段のうち、4 池の上・中・下流水路の汚泥界面を測定し、その平均値で評価した。汚泥界面は投げ込み式 MLSS 計を用い、水面から投げ入れ、測定濃度が 2,000mg/L 付近の深さを有効水深から差し引き求めた。流入水量との相関を示す(図 5: 2020 年 1 月 9 日~1 月 17 日、返送汚泥率 60%)。相関係数が 0.34 と、弱い相関が確認されたが、データ数の蓄積を今後の課題とし、この近似直線を活用することとした。

表 2 各条件での脱窒速度 (mgN/gMLSS/h)

S-COD NO ₃ -N	0 mg/L	10 mg/L	15mg/L
5mg/L	0.1	1.0	1.1
10mg/L	0.2	1.1	1.5
15mg/L	0.4	1.3	1.6
20mg/L	0.3	0.9	1.6
25mg/L	0.2	1.2	1.7

※枠線内: 深槽西の終沈流入水質の範囲

表 3 各条件での浮上状況(分)

S-COD NO ₃ -N	0 mg/L	10 mg/L	15mg/L
5mg/L	>360	>360	>360
10mg/L	>360	>360	230
15mg/L	315	150	110
20mg/L	250	140	110
25mg/L	250	140	110

表 4 最終沈殿池の諸元

型式	2階層平行矩形池	
系列	上段	下段
幅(m)	15.6	16.8
長(m)	38.3	38
有効水深(m)	4.8	4.2
池数(池)	6	6

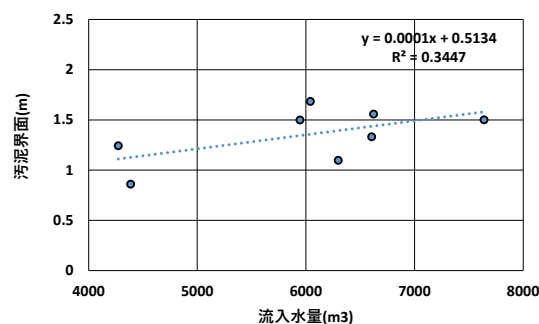


図 5 流入水量と汚泥界面の関係 (対策運転前)

4.2.2 汚泥堆積量・汚泥滞留時間について

図5の近似直線をもとに、浮上があった図3と同日の終沈汚泥堆積量と終沈汚泥滞留時間の経時変化を求めた。汚泥界面は流入水量から算出し、その結果をもとに終沈の汚泥堆積量を求め、それを同時刻の返送汚泥量で割り汚泥滞留時間とした(図6:返送汚泥率45%)。本結果から、他の時間帯に比べ、朝5~11時は汚泥堆積量が少なかった。また汚泥滞留時間は約3~4時間だった。表3の浮上試験結果より、終沈流入水質の範囲では、概ね2.5時間で浮上が確認されていることから、返送汚泥量の増量により、汚泥滞留時間を約2.5時間以下に短縮させることは有効な対策と考えられた。

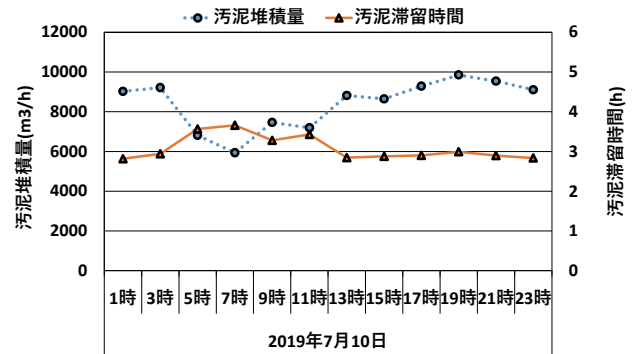


図6 終沈における汚泥堆積量と汚泥滞留時間の経時変化 (対策運転前)

5. 浮上抑制運転

浮上の実態や机上試験結果、施設の制約を踏まえ、2018年度の運転条件を参考に、2019年度は(1)風量調整による終沈流入水のNO₃-Nの低減(2)返送汚泥量の増量による終沈汚泥滞留時間の短縮・硝化の維持・脱窒促進の二点を目的に次の対策運転を実施した。対策運転の目標値と調査期間、実施条件をまとめた(表5)。

表5 調査期間と実施条件

	期間	送風制御方法		切替時間 (硝化促進/硝化抑制)	硝化液 循環率 (%)	返送 汚泥率 (%)	
		反応槽前半	反応槽後半				
			硝化促進				硝化抑制
2018年度	8~11月	DO制御 1.5~2.5 mg/L	DO制御 1.5~3.0 mg/L		-	30~50	
	12~3月		-	40			
2019年度	RUN1 2019/5/1 ~ 6/19	風量一定制御 or DO制御 NO3-N 5 mg/L程度	DO制御 2.5~3.0 mg/L	-	-	40	
	RUN2 2019/6/20 ~ 8/27			DO制御 1 mg/L程度	17~5時/5~17時	-	45
	RUN3 2019/8/28 ~ 11/4			風量一定制御 DO 1 mg/L程度	17~5時/5~17時	-	45
	RUN4 2019/11/16 ~ 12/26			-	-	40	45
	RUN5 2020/1/18 ~ 2/29			風量一定制御 DO 1 mg/L程度	11~1時/1~11時		60~70

5.1 流入負荷に合わせた段階的な風量調整

硝化を一律抑制すると硝化が停滞する恐れがあったため、硝化維持を前提に、風量抑制時間を設けた。終沈流入水のNO₃-Nが15mg/Lを管理値とし、10~15mg/Lの範囲になるよう風量を調整した。また風量抑制時間は時期ごとの硝化状況に合わせ、高水温期のRUN2、RUN3では5~17時、低水温期のRUN5では1~11時に設定した。

5.2 返送汚泥量の増量

RUN5 では汚泥滞留時間を約 2.5 時間以下に短縮させるため、返送汚泥ポンプ運転台数を通常の 3 台から 6 台にし、返送汚泥率を 45% から 70% に設定した。反応槽内の MLSS は硝化の維持・脱窒促進に必要な 2,000~2,500mg/L 付近に調整し、返送汚泥濃度は余剰汚泥量を増量することで、高水温期の約 7,000mg/L から、約 5,000mg/L に調整した。

6. 結果

6.1 対策運転時の浮上状況について

各条件での浮上抑制効果と終沈流入水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ と終沈透視度の変化をまとめた(表 6、図 7)。対策前の RUN1 では浮上が頻繁に生じたが、RUN3 では風量一定制御による風量抑制時間を設けたことで、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を管理値 15mg/L 程度以下まで低減させ、浮上を抑制し、透視度が改善した。RUN5 では風量抑制と硝化液循環の活用、返送汚泥量の増量により、脱窒を促進し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を管理値程度以下まで低減させた。また終沈の汚泥滞留時間を 2.5 時間以下に短縮させたことで、大規模な浮上は抑制され、対策の効果は十分に得られた。

風量抑制時間を設定したことによる硝化状況への影響は、毎週硝化速度試験³⁾を行い確認した。当センターでは $\text{NO}_3\text{-N}$ 生成速度が約 2mgN/gMLSS/h を下回った場合、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 生成速度が上昇し、硝化が停滞する傾向にある。硝化が停滞した場合、必要に応じて硝化が良好な浅槽系の余剰汚泥を深槽西系に転送することを想定していたが、調査期間中、硝化の悪化は確認されなかった(図 8)。

表 6 各運転条件時の浮上抑制効果

	対策運転	効果	対策効果の詳細
RUN1	・なし	×	$\text{NO}_3\text{-N}$ が高く、浮上が頻繁に生じ、透視度が悪化
RUN2	・DO制御による風量抑制時間の設定	×	$\text{NO}_3\text{-N}$ を低減できず、浮上が頻繁に生じ、透視度が悪化
RUN3	・風量一定制御による風量抑制時間の設定	○	$\text{NO}_3\text{-N}$ を低減でき、浮上を抑制し透視度が改善
RUN4	・硝化液循環の活用	×	$\text{NO}_3\text{-N}$ を低減できず、浮上が頻繁に生じ、透視度が悪化
RUN5	・風量一定制御による風量抑制時間の設定 ・硝化液循環の活用 ・返送汚泥量の増量	○	$\text{NO}_3\text{-N}$ の低減と汚泥滞留時間の短縮ができ、浮上を概ね抑制し透視度が改善

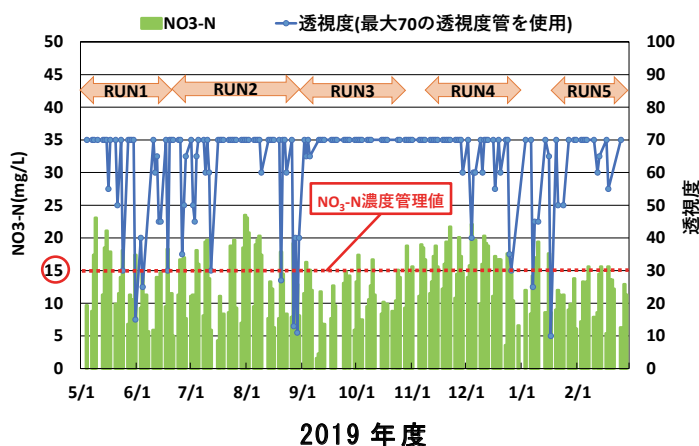


図 7 各運転条件時の $\text{NO}_3\text{-N}$ と終沈透視度

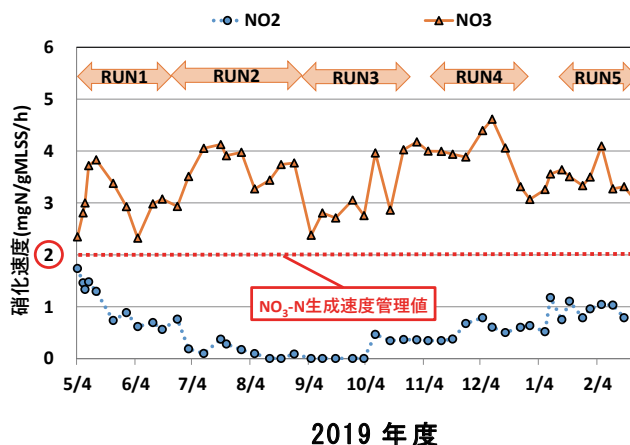


図 8 各運転条件時の硝化速度

6.2 対策運転後の終沈流入水と汚泥滞留時間について

段階的な風量調整と返送汚泥量の増量後(RUN5)の代表的な終沈流入水質と汚泥滞留時間の経時変化をそれぞれ示す(図10:区内点線は浮上抑制管理値)。対策運転前(図9)に比べ、夜間高負荷時にMLSSを2,000mg/Lに維持できており、A-HRTが長く、風量抑制時間を設けた1~11時のNO₃-Nは概ね15mg/L程度以下に抑えられた。また返送汚泥量を1槽あたり約200m³/h増量させたことで、終沈の汚泥滞留時間は約1~2時間短縮され、2.5時間以下に抑えられた。

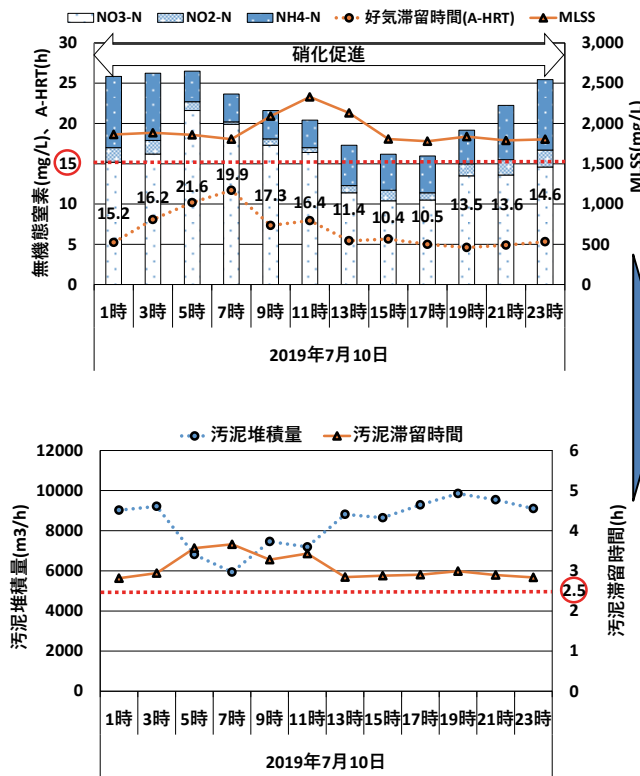


図9 対策運転前

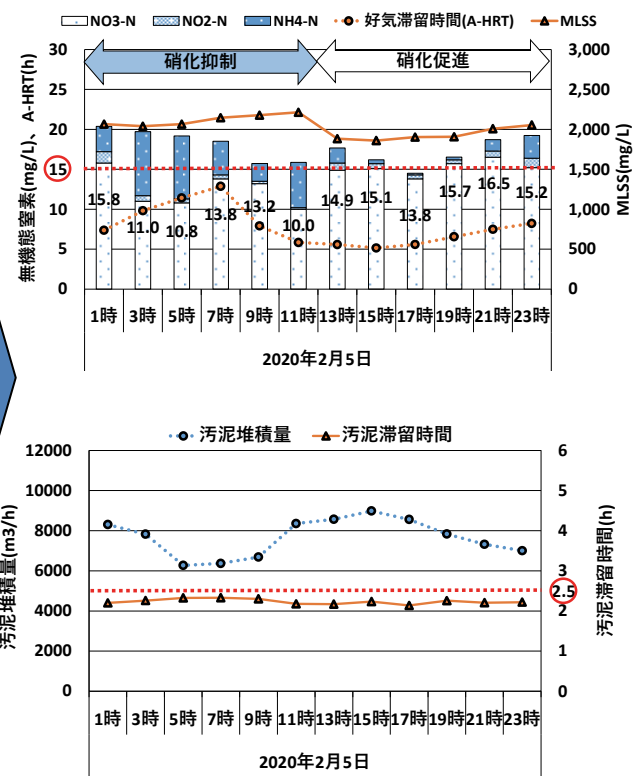


図10 対策運転後

6.3 処理水質と電力量原単位の推移

各運転条件における電力量原単位とT-N(無機態窒素合計)の推移を示す(図11)。今回の対策運転では反応槽後半の風量抑制や硝化液循環、返送汚泥量の増量で脱窒が促進され、T-Nは2018年度12~3月と比べ、同時期のRUN5では54%改善した。大幅な改善が達成された理由として、2018年度冬季は、硝化維持のため送風を強化し、脱窒量が少なかったためと考えられた。また送風電力量原単位は、2018年度同時期と比べ、風量抑制時間を17~5時に設定したRUN3では6%減少し、風量抑制時間を1~11時に設定し、硝化液循環と返送汚泥量を増量したRUN5では13%減少した。これによりRUN5は、2018年度同時期と比べ、返送汚泥ポンプ台数を3台から6台にしたことによる電力量原単位の増加を回避できた。

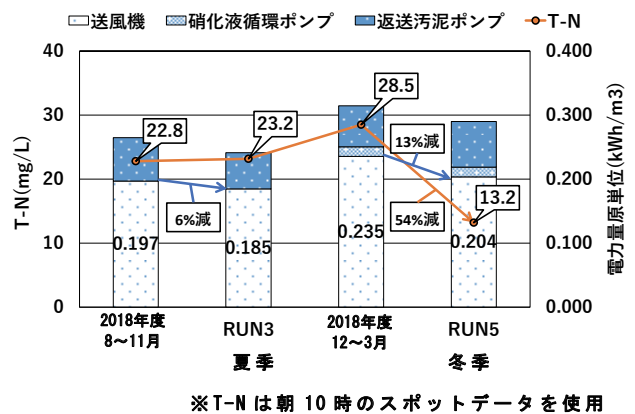


図11 電力量原単位とT-Nの推移

7. まとめ

- ・実態調査から、終沈に滞留する $\text{NO}_3\text{-N}$ が 15mg/L 程度以上であることが浮上原因と推測された。
- ・机上試験から、当センターの流入水質範囲では、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が 15mg/L 以上、汚泥滞留時間が約 2.5 時間以上になると、浮上が発生しやすい傾向を確認した。
- ・流入負荷や A-HRT に合わせた段階的な風量調整と硝化液循環の活用、返送汚泥量の増量により、脱窒を促進し、終沈に流入する $\text{NO}_3\text{-N}$ を低減させることで浮上抑制に一定の効果が得られた。
- ・返送汚泥量の増量は、終沈の汚泥滞留時間を 1~2 時間短縮させることに加え、硝化の維持や脱窒を促進した。
- ・風量抑制時間を設け、脱窒を促進することは、浮上抑制に効果があるだけでなく、窒素処理に伴う送風エネルギーの削減にも副次的な効果があることを確認した。

8. 今後の展望

冒頭で述べたように、深槽西系反応槽は深槽東系に比べ浮上が発生しやすい傾向であった。2018 年度の両反応槽の終沈流入水のデータを確認したところ、朝 10 時のスポットで、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の平均値は、両反応槽とも約 16mg/L であった。そこで 2019 年 12 月 1 日~2020 年 3 月 31 日の期間、朝 10 時のスポットで両反応槽の終沈流入水中の S-COD を確認した(図 12)。本結果から、S-COD の平均値は、深槽西系で 10.2mg/L 、深槽東系で 9.3mg/L であり、深槽西系の方が 1 割程度高かった。また、2019 年 7 月 1 日~2020 年 3 月 31 日の期間、朝 10 時のスポットで深槽西系終沈流入水の S-COD と $\text{NO}_3\text{-N}$ 、浮上の有無の関係を確認した(図 13)。本結果から、浮上は S-COD が 10mg/L 以上の条件で発生しやすいと推測された。

以上より、S-COD も浮上に大きく関与していると考えられたため、今後は、浮上と S-COD の関係性を調査し、本報告で検討した $\text{NO}_3\text{-N}$ の低減と汚泥滞留時間の短縮に加え、S-COD の低減による浮上抑制運転を検討、実施していきたい。

参考文献

- 1) 笹田良介ほか：水質管理におけるマネジメント力の向上を見据えた技術継承と人材育成の取組、第 56 回下水道研究発表会講演集、N-1-2-2、p. 293-295
- 2) 日本下水道協会：下水試験方法 上巻-2012 年版-、p. 708-709
- 3) 前保竜一ほか：放線菌による異常発泡の抑制に向けた取り組み、東京都下水道局技術調査年報 vol.43、No. 3-1-9、p. 229-236

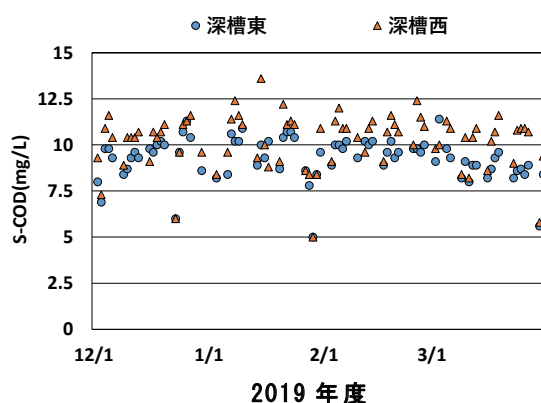


図 12 深槽東西の S-COD 経日変化

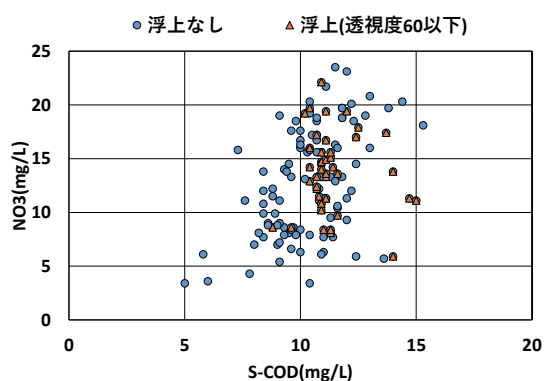


図 13 浮上因子と浮上有無の関係 (深槽西)