

A₂O 法における反応タンク滞留時間短縮運転の検討

水再生水質課 ○ 浅野 卓哉
 環境科学研究所 片山 尚樹
 伊熊 信男

1. はじめに

横浜市では窒素・りん除去向上を目的として嫌気-無酸素-好気法（以下、A₂O 法）の導入を進めているが、標準法と比較して反応タンクの設計滞留時間（以下、HRT）が長く、施設の増築が必要となっている。一方で既存の A₂O 法施設では、HRT を設計値より大幅に短縮して運転し、処理水質が向上した事例がある。HRT 設定値を短縮しても処理性能が確保されるのであれば、施設整備計画の縮小が見込め、コスト削減と同時に温室効果ガス排出量の削減にも寄与する。そのためには、反応タンク各槽の最適・限界 HRT を把握することと同時に、それらの結果を設計指針に基づく容量計算で再現することが必要となる。

本検討では、まず既存 A₂O 法施設の運転実績を整理し、反応タンク各槽 HRT の短縮の可能性について検討した。次いで 3 系列について実測データを用いて構築された活性汚泥モデル（以下、ASM）を用いて HRT 短縮による窒素・りん除去への影響の机上検討を行った。さらに「下水道施設計画・設計指針と解説¹⁾」（以下、指針）に基づいた反応タンク容量計算方法について、既存施設収集データを用いて見直し検討を行い、実績流入水質を入力した際の各槽 HRT を算出した。最後に、算出結果の妥当性について、ASM を用いて評価を行った。

2. 既存 A₂O 法系列の運転状況

本市既存 A₂O 法施設の平成 18 年度冬期の処理実績平均値および設計値を表 1 に示す。系列 C と D では、期間中窒素・りん負荷の高い汚泥処理施設返流水を受入れ処理しており、りん除去のために硝化を抑制気味に運転していたため、T-N 除去率が低かった。他の系列は概ね良好な処理が行われていた。HRT は、近年設計された系列 E を除いて、設計値から大幅に短縮されている。一方、その分だけ終沈水面積負荷は設計値より高くなっている。設計指針では終沈負荷は 15~25m/d を推奨しており、各系ともその範囲内だが、特に SVI の高い系列では冬季降雨時には固液分離の管理が難しい状態である。なお、系列 D、F 以外は降雨時には晴天時の 1.3~2 倍の水量を処理している。

各系列の反応タンク流入水（以下、流入水）の冬季水質平均値を表 2 に示す。系列 C、D 以外は BOD/T-N 比、BOD/T-P 比とも高く、窒素・りん除去に適した流入水質だといえる。系列 A、B では稼働当初りん除去が不安定で、HRT を短縮することでりん除去が安定した経緯がある²⁾。系列 A との比較から、流入負荷の違いを考慮しても他系列でも HRT を更に短縮できる可能性がある。しかし、既存施設では前述の終沈性能やブロー・ポンプなど設備能力の制限により、更なる HRT 短縮は難しい状態である。

表 1 本市既存 A₂O 法系列の冬期運転状況

系列		A	B	C	D	E	F
稼働年度		H15	H12	H17	H14	H17	H15
合分流		合流	合流	合流	合流	合流	分流
HRT (hr)	全体	7.1 (13)	8.6 (13)	7.9 (16)	9.5 (14)	11 (10)	11 (15)
	嫌気槽	0.89 (1.4)	1.1 (1.6)	1.3 (2.5)	1.5 (3.4)	3.1 (1.7)	1.4 (1.9)
	無酸素槽	2.7 (4.1)	1.9 (2.4)	2 (3.4)	3.1 (2.1)	2.4 (2.7)	4.1 (3.7)
	好気槽	3.6 (7.2)	5.6 (8.7)	4.6 (9.9)	4.9 (8)	5.5 (5.8)	5.5 (9.3)
BODSS 負荷 (g/g/d)		0.09	0.09	0.10	0.07	0.09	0.10
SRT (d)		13	15	11	15	12	13
A-SRT (d)		6.4	9.7	6.6	8.4	6.1	6.3
MLSS (mg/L)		2700	2400	2200	2100	2200	2200
SVI		290	330	200	200	350	240
返送率 (%)		46	61	40	42	73	100
循環率 (%)		100	79	120	120	67	60
最終沈殿池水面積負荷 (m/d)		19 (9.9)	16 (10)	15 (9)	12 (9)	15 (16)	21 (16)
除去率 (%)	BOD	96	96	88	89	94	96
	T-N	73	67	47	51	66	69
	T-P	94	79	79	78	95	95

* 系列 C、D は期間中汚泥処理返流水を受け入れている * 系列 AB および CD はそれぞれ流入水は同一

表 2 各系列の冬期流入水質 (mg/L)

系列	A,B	C,D	E	F
BOD	80	64	100	100
SS	29	31	43	51
T-N	22	20	21	23
T-P	2.2	2.5	2.6	2.8
BOD/T-N	3.6	3.2	4.8	4.3
BOD/T-P	36	26	39	36

3. ASMを用いたHRT短縮運転の検討

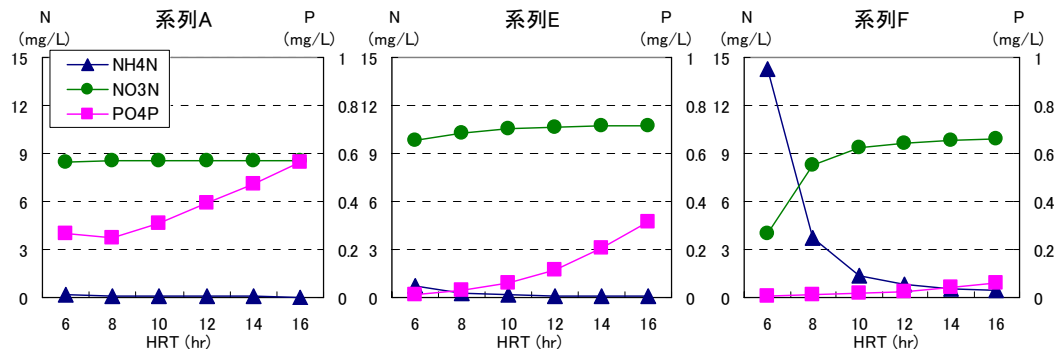
系列A、E、Fについて構築したASMを用いてHRT短縮が窒素・りん除去に与える影響について検討した。構築モデルの詳細は文献³⁾を参照されたい。

各系列のモデルを用いて、HRTを6~16hrに変化させたときの処理水質を算出した。流入水質はキャリブレーション時（冬期晴天時）のものとした（表3）。槽割合は表1のとおりとし、流入水量を変えてHRTを調整した。MLSSは余剰汚泥引抜き量を調整してあわせ、反応タンクDOは一律2.0mg/Lとした。

計算結果を図1に示す。各系列とも、概ねHRTが長いほどりん除去は低下していた。また、系列A、EではHRT6hrでもNH₄-N残存は1mg/L以下であった。系列FではHRT10hr以内ではNH₄-N残存が大きく、逆にHRTが長くてもりん除去悪化幅は小さかった。この結果から、窒素・りん除去の観点からは、硝化に十分な好気槽HRTが確保される範囲で、全体HRTは短いほうが望ましいことがモデル上で確認された。

表3 ASM設定流入水質 (mg/L)

系列	A	E	F
BOD	81.6	144	124
T-N	23.7	36.5	38.9
NH ₄ -N	21.4	23.8	24.8
T-P	2.69	4.26	4.75
PO ₄ -P	1.4	2.34	2.64



4. 指針に基づく容量計算方法の改良

本市における容量計算は、全センター一律の認可水質を用いて行っている。本検討では、実測水質を用いた容量計算を試みた。まず、既存施設での収集データを用いて、指針記載の反応タンク設計における諸式・設定値を見直し、改良を行った。以下、各槽の見直し内容を示す。

① 嫌気槽: 指針では、嫌気槽HRTは1~2hrとされている。過去の検討で晴天時の嫌気槽HRTは1hr以内で十分であることが示された⁴⁾。これは、りん放出には有機酸などの発酵生成物(S_A)が必要であるが、流入水中のS_Aは0.5hr以内に消費され、それ以降はりん放出速度が大幅に低下するためである。そこで、本検討では嫌気槽HRTは1hrと設定した。

② 無酸素槽: 無酸素槽の必要HRTは脱窒速度から求められる。指針では、低水温期における脱窒速度とBOD-SS負荷の関係式(式1)が提示されている。本市各施設における収集データを整理したところ、式2が得られた。式2において水温を15℃としたとき(式3)の傾きは式1の1.7倍であった。

③ 好気槽: 好気槽HRTは式4で求められ、A-SRTおよびa~c各係数の設定が必要となる。文献⁵⁾に必要なA-SRT算出式として式5が与えられている。本市収集データについて解析した結果、式5の妥当性が確認されたため、これを用いた。また、SBOD/TBOD値を0.67としてa

~c値を求めたところ、各系列ともa=0.6、b=1.0、c=0.03が妥当であった。

④ その他: MLSSは流入負荷および過去の設計実例から、系列Aは2500、EとFは3000とした。BOD-SS負荷については、本検討では他設定値や計算状況などを鑑み、0.115~0.13に設定した。また、指針の記述ではBOD-SS負荷から無酸素槽+好気槽の容量が算出されるが、本検討では嫌気槽での脱窒などによる有機物分解を考慮して、嫌気槽を含めた全容量が算出されることとした。窒素除去について、最終沈殿池での脱窒量を実測値にあわせて設定し、T-N負荷変動および脱窒速度に対して安全率を設定した。その他の各設定値を表4にまとめた。

$$y = 7.7x + 0.6 \quad (\text{低水温期}) \quad \dots \text{式1}$$

$$y = 9.2x \cdot \exp(0.024 \times t) + 0.4 \quad \dots \text{式2}$$

$$y = 13.2x + 0.4 \quad (\text{低水温期}) \quad \dots \text{式3}$$

y : 脱窒速度 (mg/gSS/hr)
 x : BOD-SS負荷 (g/gSS/d)
 t : 水温 (°C)

$$\tau_{XA} = \frac{\theta_{XA} \cdot (a \cdot C_{S-BOD,in} + b \cdot C_{SS,in})}{(1 + c \cdot \theta_{XA}) X} \quad \dots \text{式4}$$

$$\text{必要 } \theta_{XA} = 11.0 \cdot \exp(-0.0525t) \quad \dots \text{式5}$$

- τ_A : 好気槽HRT (d)
- θ_{XA} : A-SRT (d)
- X : MLSS (mg/L)
- $C_{SBOD,in}$: 流入水S-BOD濃度 (mg/L)
- $C_{SS,in}$: 流入水SS濃度 (mg/L)
- a : S-BODに対する汚泥転換率
- b : SSに対する汚泥転換率
- c : 内生呼吸による減量を表す係数
- t : 水温 (°C)

表4 各系列容量計算諸条件

	A	E	F
流入水質	表2のとおり		
水温 (°C)	15		
返送率 (%)	50		
循環率 (%)	100		
MLSS (mg/L)	2500	3000	3000
終沈脱窒濃度 (mg/L)	4.1	2.4	2.3
BOD-SS負荷	0.13	0.13	0.115
TN変動に対する補正係数	1.25	1.25	1.5
脱窒速度に対する安全率	1.25	1.25	1.5
設計目標水質 (mg/L)	TN	10	
	TP	0.5	

5. 容量計算結果およびASMによる検証

容量計算結果を図2に示す。現状と比較して、既に HRT を大幅に短縮している系列 A では 1hr 程度の差であった。一方、系列 E では嫌気槽と好気槽が、F については無酸素槽が大きく短縮され、全体としてはそれぞれ 42%、35% 短縮される結果となった。

算出結果について3. と同じモデルを用いてシミュレーションを行った。流入水質は表3とし、各セルの容量を算出結果にあわせて設定した。計算結果を表5に示す。

系列 A と E については水質目標値をクリアしていたが、系列 F では窒素・りんとも目標値を超過していた。しかし、シミュレーション設定流入水質 (表3) が冬期平均値 (表2) より大幅に高いことを考えると、各系列とも今回の容量計算結果に基づく HRT で窒素・りん除去は可能であるといえる。また、図1の同 HRT と比較して、系列 F のりん以外は概ね同等以上の水質であることから、

槽割合についても概ね妥当な結果であったといえる。

以上の結果から、本検討による容量計算方法は、流入水質による各槽の必要 HRT の違いを概ね再現しており、指針に基づく設計で HRT 短縮を表現できることが示された。

6. 最終沈殿池水面積負荷に関する考察

HRT 短縮や MLSS 濃度設定は終沈負荷に大きく影響する。文献⁶⁾に提案されている汚泥沈降速度推定式 (式6) を用いて、各系列の設定値 (表4) における沈降速度を算出した。算出値と、現状施設において図2の HRT となる処理水量における終沈水面積負荷との比較を図3に示す。理論上は沈降速度が水面積負荷を上回れば固液分離が達成されるが、特に系列 E、F では沈降速度は水面積負荷を大幅に下回っており、固液分離性能が大幅に不足することがわかる。

7. まとめ

本検討結果から、次の点が示された。

- ASM を用いた検討で、HRT を短縮することでりん除去が向上することが示された。
- 実データを基に改良された容量計算方法に実績水質を入力することで、HRT 短縮が表現された。
- ASM で机上検証を行った結果、対象系列の流入水質では嫌気槽 1hr、無酸素槽 2hr、好気槽 3hr~4.5hr で窒素・りん除去が可能であることが示された。
- 本検討結果を既存施設に適用する場合、終沈処理能力が大幅に不足することが示された。

本検討結果は、流入負荷の低い施設では従来の標準法レベルの HRT でも A₂O 法が導入でき、施設増設規模が大幅に削減できる可能性があることを示す。ただし、今回の HRT 計算結果 (図2) は処理限界に近い値と考えられる。実際には、将来的な流入負荷変動や工事、トラブルなどを考慮して、安全率を見込んだ設計が必要となる。また、今回使用したモデルは、定量的評価への適用には更なる精度向上が必要なレベルにある。本検討結果を実施設計に反映させるには、更に検討を重ねる必要がある。上述のように、既存実施設では更なる HRT 短縮の検証は難しいため、各系列の流入水を用いた実験プラントでの検証を行っていくことが望ましい。

参考文献

- 1) 「下水道施設計画・設計指針と解説 2001 年版 後編」(社)日本下水道協会
- 2) 浅野卓哉、森豊明、小菅博明「合流式 A₂O 法施設におけるりん除去安定化対策の検討」第 43 回研究発表会講演集 p794
- 3) 「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第 32 号 2008
- 4) 小川洋平、浅野卓哉「A₂O 法における嫌気槽滞留時間に関する検討」第 42 回下水道研究発表会講演集 p780
- 5) 高度処理施設設計資料検討プロジェクト報告書 (平成 15 年 3 月); 独立行政法人土木研究所
- 6) 川口幸男他「活性汚泥性状を考慮した最終沈殿池水面積負荷設計手法に関する考察」下水道協会誌 Vol.37 No.457 p107

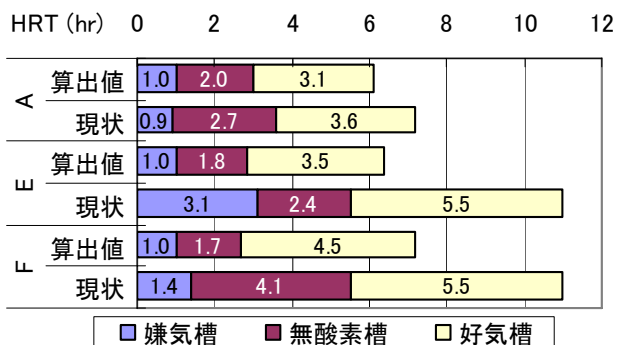


図2 各系列容量計算結果

表5 ASMによる容量計算結果検証 (mg/L)

	窒素			りん
	NH ₄ -N	NO ₃ -N	S-T-N	PO ₄ -P
A	0.79	8.38	9.17	0.02
E	0.98	8.79	9.77	0.10
F	1.41	8.85	10.26	0.65

$$\text{汚泥沈降速度} = 1.78 \cdot 10^7 \cdot \text{MLSS}^{-1.46} \cdot t^{0.853} \cdot \text{SVI}^{-0.804} \dots \text{式6}$$

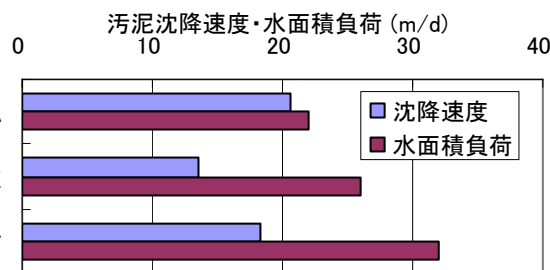


図3 検討条件による汚泥沈降速度と水面積負荷