



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	砂ろ過施設（上向流移床型ろ過器）による窒素除去
Author(s)	石井, 実; 森田, 健史; 野本, 睦志 他
Description	第13回衛生工学シンポジウム（平成17年11月17日（木）-18日（金） 北海道大学クラーク会館） . 一般セッション . 6 水処理 . 6-2
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 13, 187-190
Issue Date	2005-11-16
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/1363
Type	departmental bulletin paper
File Information	6-2_p187-190.pdf



6-2 砂ろ過施設（上向流移床型ろ過器）による窒素除去

東京都下水道局 石井実、森田健史、野本睦志
株式会社タクマ 坂上正美、土井知之、○奥田正彦

1. はじめに

閉鎖性水域に放流している下水処理場では、富栄養化の原因とされる窒素・リンの除去対策が急務となっている。下水の窒素除去技術は、ステップ流入式多段硝化脱窒法や A₂O 法など生物反応タンクに関する技術が確立され実績を重ねつつあるが、従来の標準活性汚泥法に比べて建設コストが高くスペースの拡張を伴うため、特に用地の少ない都市部では早急に対応するのは難しいのが現状である。

一方、標準活性汚泥法においても BOD やアンモニア対策のため硝化を促進する運転を行い、また懸濁物質（以下 SS）の除去を目的として砂ろ過設備が導入されている処理場も少なくない。この砂ろ過設備に改良を加えることで下水二次処理水の窒素（硝酸性窒素）を除去できれば、即効性のある窒素・SS の同時除去システムとなると考えられる。

そこで本研究では、処理水 T-N 濃度 5mg/L 以下を目標とし、窒素・SS の同時除去が可能な上向流移床型砂ろ過器（以下、脱窒砂ろ過）の開発を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本実験は、東京都中野水再生センター内に実証プラントを設置して実施した。実験にはろ過面積 0.5m² の鋼製円筒型の上向流移床型ろ過器を使用した。ろ材は珪砂を使用し、ろ層高さは 1.0~2.0m とした。図 1 に実証プラントの概略フローを示す。

砂ろ過原水は、既設第二沈殿池越流水を用いた。通常、ろ過砂の洗浄排水は全量系外へ排出するが、本システムでは、ろ層内の DO 濃度低減等を目的として、洗浄排水の一部を原水と循環混合（排水循環）させる補助ラインを設けた。

また、脱窒用のメタノール（以下 MeOH）添加設備を設置した。MeOH 添加は、原水の流量、DO 濃度、NO₃-N 濃度をオンラインで測定して添加量の自動制御（フィードフォワード制御）が行えるようにした。

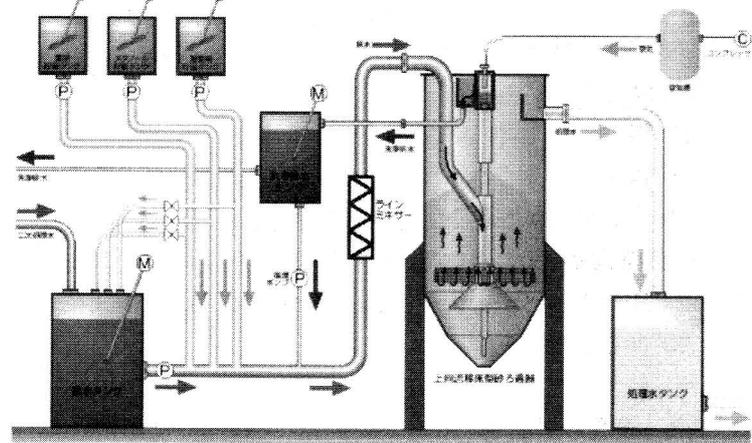


図 1 概略フロー

2.2 実験条件

実験は、平成 14 年度から 17 年度の約 3 ヶ年間 (RUN 1~RUN 17) 行った。RUN 1~RUN 11 では、ろ層高さ 1.0~2.0m、ろ過速度 100~300m/日の水量一定条件として、排水循環の効果、必要ろ層高さ、MeOH 添加の検討を行った。次に RUN 12~17 では、実施設での水量変動に準じた負荷変動（水量変動）実験を行った。ろ層高さ 2.0m、水量変動比 0.82~1.32（時間水量/平均水量）、平均ろ過速度 300m/日（245~400m/日）の条件を中心に行った（表 1）。MeOH 添加はフィードフォワード制御とし、完全に NO₃-N を除去する条件を把握するために必要量（理論値）より約 1 割程度多めに添加した。ただし、RUN12 では処理水の T-N 濃度 5mg/L 以下（完全脱窒をする必要がない場合）とする経済的な運転手法を確立するた

めに、MeOH 添加量を不足ぎみとした運転を行った。

表 1 実験条件

	RUN12	RUN13	RUN14	RUN15	RUN16	RUN17
ろ層高さ(m)	2.0					
ろ過速度(m/日)	227 (平均) 180~300	250 (平均) 204~331	300 (平均) 245~397			
排水循環の有無	○	○	○	○	○	×
MeOH 添加方式	原水 NO ₃ -N 濃度によるフィードフォワード制御					
水温(°C)	27.1 (22.4/29.6)	21.1 (19.0/22.8)	21.4 (18.4/22.9)	20.6 (17.8/21.5)	16.7 (9.0/18.0)	16.9 (15.5/17.5)

3. 実験結果及び考察

3.1 排水循環の効果

原水である二次処理水は、DO 濃度が 6~7mg/L と高く、SS 濃度が 1~2mg/L と低い性状であったため、ろ層内の無酸素ゾーンが減少し、NO₃-N 除去率が低下することが懸念された。そこで、排水循環を行い、ろ過器流入水 SS 濃度を高めることで DO 消費の促進を図った。

図 2 にろ層高さ 1.0m と 1.5m、図 3 にろ層高さ 2.0m におけるろ過器流入水 SS 濃度と NO₃-N 除去率の関係を示す。ろ層高さ 1.0m と 1.5m では、排水循環が必要条件となり、その効果を確認できた。一方、ろ層高さ 2.0m では、排水循環の有無にかかわらず NO₃-N 除去率 90%以上をほぼ達成することができたが、排水循環がない場合には原水 DO 濃度が高い時期(冬季、降雨時：図中▲印)にやや性能が低下することがあった。

排水循環は、NO₃-N の除去を安定化させる効果、砂ろ過施設から排出される排水量の低減効果、添加 MeOH による SS 発生量 (MeOH-SS 転換率) の低減効果があると考えられる。

3.2 必要ろ層高さ

図 4 にろ層高さ 2.0m、ろ過速度 400m/日におけるろ層内の水質変化を示す。ろ層高さを 2.0m とすることで、ろ過速度 400m/日 (水量変動運転時の最大ろ過速度) の高負荷条件でも NO₃-N をほぼ完全に除去することができた。また、添加した MeOH も NO₃-N 除去が進むにつれて消費されていた。このときのろ層接触時間 (反応時間) は、砂ろ過器流入水に対して 3.4 分で、NO₃-N 除去速度は、2.8 NO₃-N kg/m³・日 (ろ層容積あたり) と高い脱窒活性が得られた。なお、ろ材表面の走査電子顕微鏡観察では桿菌が多数観確認され、7.9×10¹²MPN/m³ (ろ層容積あたり) の脱窒細菌数が計測された。

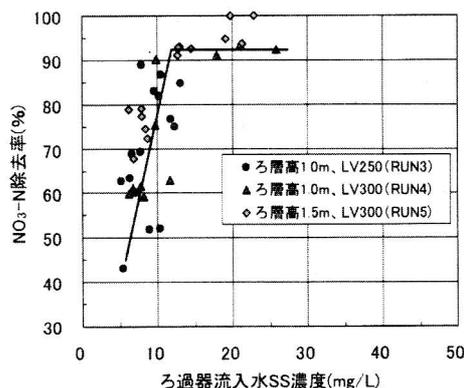


図 2 流入水 SS 濃度と NO₃-N 除去率 (ろ層高さ 1.0, 1.5m)

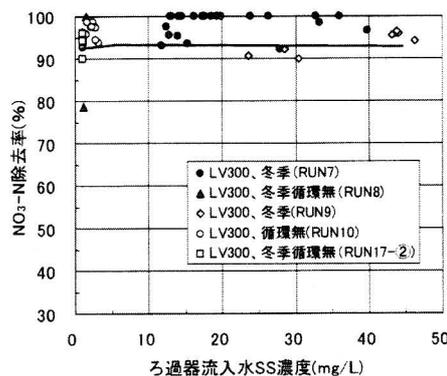


図 3 流入水 SS 濃度と NO₃-N 除去率 (ろ層高さ 2m)

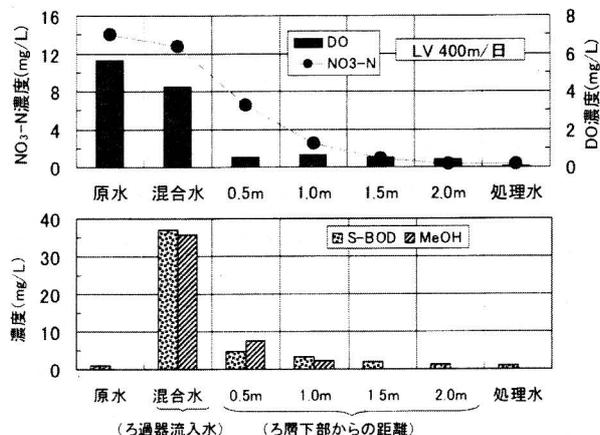


図 4 ろ層内の水質変化

図5にろ層高さ2.0m、ろ過速度300m/日におけるろ過器流入水と処理水SS濃度の関係を示す。ろ過器流入SS濃度が1~57mg/Lに対して、処理水のSS濃度が1~3mg/L程度となり、処理水を高度なレベルまで処理することができた。さらにろ過速度400m/日でも同様な処理性能が得られた。

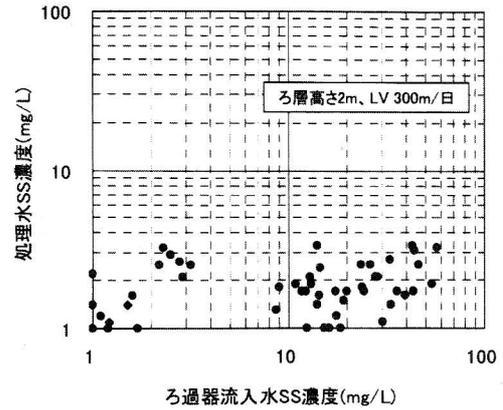


図5 流入水、処理水のSS濃度

3.3 MeOH 添加制御の効果

原水 NO₃-N 濃度の時間変動幅はプラス・マイナス 2mg/L 程度であるため、MeOH 添加を定量注入で行うと過剰添加と添加不足を繰り返して NO₃-N 除去が安定しなかった。このため、MeOH 添加はフィードフォワード制御で行った。フィードフォワード制御は、下記の McCarty の実験式から導かれる完全脱窒に必要な MeOH 量(必要 MeOH 量)を理論量として、制御比(添加量/理論量)を設定することで添加量を制御した。

$$\text{必要 MeOH 量 (mg/L)} = 2.47\text{NO}_3\text{-N(mg/L)} + 0.87\text{DO(mg/L)}$$

----- (McCarty の式)

$$\text{添加 MeOH 量 (mg/L)} = \text{必要 MeOH 量 (mg/L)} \times \text{制御比}$$

図6に水量変動運転でのフィードフォワード制御効果の例を示す。フィードフォワード制御とすることで、原水の水量、NO₃-N 濃度、DO 濃度の変動に MeOH 添加量を追随させる運転を行うことができ、処理水中に MeOH が残存することはなかった。

さらに、目標処理水質を達成する経済的な運転方法を検討した結果(RUN12)、目標処理水質から計算される除去すべき NO₃-N 濃度の約 3 倍量の MeOH を添加することが効率的であることがわかった。

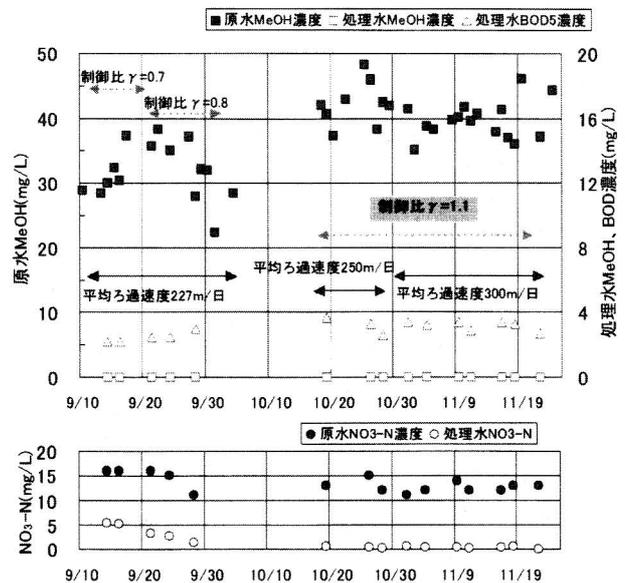


図6 フィードフォワード制御の効果

3.4 処理水質

表2に平均ろ過速度300m/日での処理水質の例を示す。水質分析は24時間コンポジットサンプルで行った。

窒素濃度については、ろ過速度が245~400m/日と大きく変動したにもかかわらず、低水温期(RUN16、水温16.7℃)において89.7%のNO₃-N除去率が得られ、処理水T-N濃度3.4mg/Lとすることができ、目標T-N濃度5mg/L以下を満足することができた。

SS濃度は、MeOH添加と排水循環を行っても原水(二次処理水)と同程度の1~2mg/L程度とすることができた。

BOD₅濃度は、MeOH添加制御を行うことで処理水を3mg/L程度とすることができた。原水BOD₅濃度が2mg/L程度と低か

表2 水質結果

RUN No.		RUN 14	RUN 16
ろ過速度 (m/日)		平均 300 (変動幅 245~400)	
水温 (℃)		21.4 (18.4/22.9)	16.7 (9.0/18.0)
DO	原水	6.5 (5.0/8.3)	7.1 (5.2/10.5)
	処理水 (ろ過器内)	0.4 (0.3/0.5)	0.8 (0.5/6.4)
	処理水 (処理水タンク)	5.1 (4.5/5.9)	6.5 (5.7/9.9)
T-N	原水	12.9 (12.0/14.0)	15.9 (13.0/19.0)
	ろ過器流入水	16.6 (13.7/18.8)	16.6 (13.3/19.6)
	処理水	1.6 (1.2/2.2)	3.4 (2.3/4.4)
除去率		87.4 %	78.5 %
NO ₃ -N	原水	12.4 (11.0/14.0)	14.9 (12.0/17.0)
	ろ過器流入水	10.8 (9.6/12.2)	13.9 (10.9/16.3)
	処理水	0.4 (0.0/0.6)	1.5 (0.3/3.0)
除去率		97.1 %	89.7 %
SS	原水	1.2 (1.0/1.5)	1.3 (1.0/3.0)
	ろ過器流入水	45.7 (24.3/64.9)	15.2 (8.2/23.4)
	処理水	1.4 (1.0/2.2)	1.8 (1.0/2.3)
BOD ₅	原水	2.1 (1.6/2.7)	2.5 (2.0/4.5)
	ろ過器流入水	30.4 (17.2/44.2)	12.3 (7.9/19.1)
	処理水	3.2 (2.7/3.4)	3.8 (2.9/5.0)

注記1: 除去率は原水、処理水で算出した。

注記2: ろ過器流入水は、原水と排水循環の混合水である (MeOH は含まず)。

ったため、原水に対しては若干上昇する結果となったが、排水循環をしても処理水質は安定していた。

4. ランニングコスト

表3に日最大水量 100,000m³/日で設計した砂ろ過施設のランニングコストを示す。電気代は、25.7kW/h × 24h/日 × 12 円/kWh = 7,402 円/日、1m³あたりでは 7,402 円/日 ÷ 100,000m³/日 = 0.07 円/m³となった。薬品代は、MeOH 単価を 50 円/kg、MeOH 添加量を除去 NO₃-N 量の 3 倍量、処理水 T-N 濃度 5mg/L (除去 NO₃-N 濃度 10mg/L) として計算した結果、処理水量 1m³ 当たり 1.50 円/m³であった。従って、処理コストは処理水量 1m³ 当たり 1.57 円/m³となる。

この結果をもとに既存技術「循環式硝化脱窒法 + 砂ろ過」と開発技術「標準活性汚泥法 (硝化促進運転) + 脱窒砂ろ過」でのランニングコストの比較を行ったところ、既存技術に比べて同等以下となることを確認できた。

表3 砂ろ過施設のランニングコスト

目標 T-N 濃度	10mg/L	5mg/L
砂ろ過原水 T-N(NO ₃ -N) 濃度	16(14) mg/L	
砂ろ過処理水 T-N(NO ₃ -N) 濃度	10(9) mg/L	5(4) mg/L
除去 NO ₃ -N 濃度	5 mg/L	10 mg/L
電気代	0.07 円/m ³	0.07 円/m ³
薬品代	0.75 円/m ³	1.50 円/m ³
合計	0.82 円/m ³	1.57 円/m ³

5. 脱窒砂ろ過の導入効果

反応タンクで硝化・脱窒を行うためには長い滞留時間が必要となり、大きな高度処理用地が必要となる。しかし、標準活性汚泥法 (硝化促進運転) と脱窒砂ろ過を組み合わせることで、大幅に設置スペースを削減することができる。

図7に既存技術「循環式硝化脱窒法 + 砂ろ過」と開発技術「標準活性汚泥法 (硝化促進運転) + 脱窒砂ろ過」の設置スペースの比較を示す。脱窒砂ろ過を組み合わせることで既存技術の約 2/3 の設置スペースとなることから、用地に余裕のない下水処理場では特にメリットのあるシステムとなると考えられる。

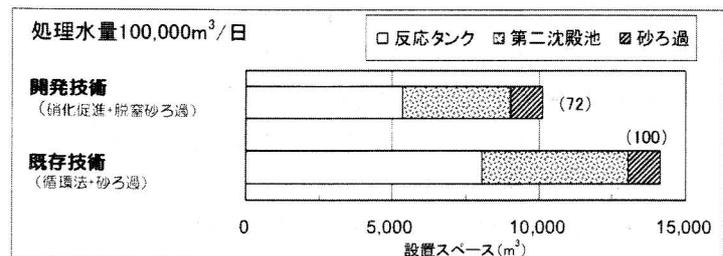


図7 設置スペースの比較

6. まとめ

上向流移床型ろ過器を用いてろ層高さを 2.0m、フィードフォワード制御による MeOH 添加を行うことで以下の結果が得られた。

- ① 平均ろ過速度 300m/日 (245~400m/日) の低水温期 (16.7℃) において、NO₃-N 除去率 89.7%、処理水 T-N 濃度 3.4mg/L (平均) とすることができた。
- ② MeOH 添加をフィードフォワード制御とすることで、処理水中に MeOH を残存させることなく、経済的な運転ができることを確認した。NO₃-N 10mg/L を除去するコストは約 1.57 円/m³(薬品費+電力費)であった。
- ③ 本技術は、既存技術に比べてランニングコストが同等以下で省面積となることを確認した。

以上より、本技術は用地に余裕がない下水処理場ではメリットが大きいシステムであると考えられる。なお、本実証実験は、東京都下水道局と株式会社タクマとの共同研究である。